

# **La Biorremediación Como Técnica Para La Descontaminación De Suelos Contaminados Por Hidrocarburos En Los Municipios Del Bloque Cpo9**

Anderson Stivel Ruiz Olarte  
Junio 2019.

Universidad Nacional Abierta y a Distancia  
Acacias-Meta  
Especialización En Gestión De Proyectos

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo en primera instancia:

A mis Padres ejemplos de inspiración para mí, por sus sacrificios y esfuerzos y amor incondicional. Por su confianza en mí cuyo apoyo no hubiera sido posible llegar a este momento.

Al profesor, por el tiempo incondicional que me brindo transmitiendo sus conocimientos hacia mí y por su desempeño en la enseñanza, convirtiéndome en un profesional

A nuestros compañeros de la UNAD , quienes somos los más interesados en conocer de este tema que nos va a servir para el futuro por el desempeño demostrado en la realización del trabajo y el esfuerzo por la superación del mismo.

## **Agradecimientos**

El presente trabajo ,más que un requisito de grado es la fidelización de una larga etapa en la que fue necesario mucho sacrificio y en el que muchas personas me contribuyeron .La Universidad Nacional Abierta y a Distancia la cual fue un espacio propio para la consolidación de un gran proyecto de vida .

Mis mas sinceros agradecimientos a al licenciado Rubiel Guevara Garzón por su disposición y por sus valiosos aportes en la construcción de este documento

## Abstrac

This research proposal arises from the question: ¿How can we avoid hydrocarbon pollution in the municipalities of the CPO9 block. The hypothesis is focused on making bioremediation known as an alternative to offset the pollution that the oil industries have caused to the environment in the department of Meta, especially in the municipalities of the CPO9 block (Acacias, Guamal, Cubarral, San Martin and Castilla) the new one). Both in the distribution and transport, have generated accidental spills of hydrocarbons, these are some of the activities that cause the deterioration of the environment accumulating directly or indirectly in soil and water.

Pollution of waters with hydrocarbons is an environmental problem that causes ecological damage of great importance with a negative effect in different areas (fishing, health, agriculture) and therefore causes a concern at a scientific level.

Pollution in the case of soils their main environmental consequences that arise after an oil spill event are: the reduction or inhibition of the development of plant cover, changes in the population dynamics of the fauna, microbial biota and pollution by infiltration to underground bodies of water. In addition to the negative impact of economic type of public and social health in areas surrounding the affected area.

Bioremediation arises from the need to reduce the environmental impact that this entails, in order to detoxify pollutants in different environments (rivers, pipes and soils) using microorganisms, plants or enzymes of these, strategically. Thanks to biotechnology, various strategies have been developed in order to restore soil and environmental quality, according to the needs and

dimensions of the problem. The factors that condition Bioremediation, advantages, disadvantages and characteristics of each of its methods are taken into account.

## Tabla de contenido

Resumen.....	5
Introducción .....	11
1. Objetivos .....	13
1.1 Objetivo general.....	13
1.2 Objetivos específicos .....	13
2. Marco teórico .....	14
2.1. El petróleo.....	14
2.1.1 Composición del petróleo .....	16
2.1.1.1 Composición general .....	16
2.1.1.2 Composición del crudo según su origen .....	17
2.1.1.3 Composición por familias de hidrocarburos .....	18
2.1.1.4 Impactos ambientales de los hidrocarburos .....	20
2.2 Los suelos.....	21
2.2.1 Composición del suelo.....	22
2.2.2 Materia orgánica de un suelo .....	23
2.2.3 Estructura y agregación de un suelo .....	24
2.2.3.1 Estructura de un suelo.....	24
2.2.3.2 Agregación de un suelo .....	25
2.2.3.3 Humedad de un suelo .....	25
2.2.3.4 Gases de un suelo .....	26
3. Biorremediación.....	28
3.1 Antecedentes de la biorremediación .....	30
3.2 Ventajas y desventajas de la biorremediación .....	31
3.2.1 Ventajas.....	31
3.2.2 Desventajas .....	32
3.3 Factores que condicionan la biorremediación.....	32
3.3.1 Factor medioambiental.....	33
3.3.2 Factor físico .....	36
3.3.3 Factor químico .....	38
3.3.4 Factor microbiológico .....	38
3.4 Tipos de biorremediación .....	39
4.4.1. Degradación enzimática.....	40
4.4.2 Fito remediación .....	40
4.5.2 Remediación microbiana .....	41
3.5 Tecnologías de biorremediación .....	42
4.5.1 Biorremediación in-situ .....	42
4.5.2 Biorremediación ex - situ.....	46
3.6 Microorganismos degradadores del petróleo .....	52
4. Análisis para el presente estudio.....	55
4.1 Actividad petrolera en los municipios que conforman el bloque cpo9.....	55
3.1.1. Nuevas exploraciones petroleras.....	55

	vi
3.1.2. Contaminación por hidrocarburos en los municipios del bloque cpo9.....	57
3.1.3. Transporte de hidrocarburos en el meta.....	60
4.2 Resumen analítico de investigación.....	60
5. El compostaje como una estrategia de biorremediación.....	72
5.1 Propiedades del compostaje.....	72
5.2 Materia prima del compostaje.....	72
5.3 Factores que condicionan el proceso de compostaje .....	73
5.4 Proceso del compostaje.....	75
5.5 Tipos de sistemas del compostaje .....	75
Discusión final	
Conclusiones	
Recomendaciones	
Glosario	
Bibliografía	

**Lista de figuras**

Figura 1.	Tipos de biorremediación .....	39
Figura 2	Microorganismos que degradan los hidrocarburos contaminación río Orottoy... ..	53
Figura 3.	Mapa del bloque CPO9Forma de transporte de los hidrocarburos.....	56
Figura 4,	Forma de transporte de los hidrocarburos .....	57
Figura 5.	Contaminación río Orottoy .....	60
Figura 6.	Representación de un sistema de compostaje en hilera.....	76
Figura 7.	Representación de compostaje en pilas estáticas.....	76



**Lista de ficha Rai**

Ficha rai 1. Resumen analítico investigación en Colombia.....	60
Ficha rai 2. Resumen analítico investigación en Bucaramanga.....	62
Ficha rai 3. Resumen analítico investigación en Medellín.....	64
Ficha rai 4. Resumen analítico investigación Bogotá.....	67
Ficha rai 5. Resumen analítico investigación Bogotá.....	68
Ficha rai 6. Resumen analítico investigación Pereira.....	70

## Resumen

Esta propuesta investigativa surge de la pregunta: ¿Cómo podemos evitar la contaminación por hidrocarburos en los municipios del bloque CPO9? La hipótesis va enfocada en dar a conocer la Biorremediación como una alternativa para contrarrestar la contaminación que han generado las industrias petroleras al medio ambiente en el departamento del Meta, especialmente en los municipios del bloque CPO9 (Acacias, Guamal, Cubarral, San Martín y castilla la nueva). Tanto en la distribución como en el transporte, han generado derrames accidentales de hidrocarburos, estas son algunas de las actividades que ocasionan el deterioro del ambiente acumulándose directa o indirectamente en suelos y agua.

La contaminación de aguas con hidrocarburos es un problema medioambiental que ocasionan daños ecológicos de gran importancia con un efecto negativo en diferentes ámbitos (pesca, salud, agricultura) y por ello provoca una preocupación a nivel científico.

La contaminación en el caso de los suelos sus principales consecuencias ambientales que surgen después de un evento de derrame por hidrocarburos son: la reducción o inhibición del desarrollo de la cobertura vegetal, cambios en la dinámica poblacional de la fauna, de la biota microbiana y contaminación por infiltración a cuerpos de agua subterráneas. Además del impacto negativo de tipo económico de salud pública y social en zonas aledañas al lugar afectado.

La Biorremediación surge de la necesidad de disminuir este impacto ambiental que esto conlleva, con el fin de desintoxicar contaminantes en los diferentes ambientes (Ríos, caños y suelos) usando microorganismos, plantas o enzimas de estos, de manera estratégica. Gracias a la

biotecnología que han desarrollado diversas estrategias con el fin de restaurar el suelo y la calidad ambiental, de acuerdo con las necesidades y dimensiones del problema. Se tienen en cuenta los factores que condicionan la Biorremediación ventajas, desventajas y características de cada uno de sus métodos.

## Introducción

El Meta es uno de los Departamentos más productores de petróleo de Colombia, donde se ha generado un impacto ambiental grande por su extracción y transporte, etc. Por esta razón aparece la preocupación de continuar con procesos de crecimiento económico, mitigando y previniendo al máximo estos impactos ambientales sobre los ecosistemas y conservando sus funciones.

Por esto surge lo que conocemos como Desarrollo Sostenible, que se establece como un compromiso tanto de las empresas privadas como públicas. (Ecopetrol, institucionalidad y empresas aliadas). Ha sido necesario que existan estrategias de gestión ambiental orientadas a resolver, prevenir y/o mitigar estos problemas de carácter ambiental; esto implica que los recursos naturales sean racionalmente; por una parte, implementando medidas preventivas y por otras tecnologías que contribuyan a reducir y corregir estos impactos.

Existen muchas tecnologías de remediación de suelos contaminados y de acuerdo a Volke y Velasco (2002) se pueden agrupar en 3 tipos: 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; Físicoquímicos (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 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 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.

Con este proyecto se pretende realizar una revisión bibliográfica de la Biorremediación y los métodos más conocidos de dicha técnica para darla a conocer a las instituciones ambientales encargadas en los municipios del Bloque CPO9. Se tiene en cuenta los factores que condicionan la Biorremediación, ventajas, desventajas y características de cada uno de sus métodos, el compostaje como estrategia para darlo a conocer e implementarlo para descontaminar los suelos por los hidrocarburos.

**PALABRAS CLAVES:** Biorremediación, Biodegradación, Contaminación, Desarrollo Sostenible, Hidrocarburos, Microorganismos.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Investigar la efectividad que tiene la Biorremediación en los suelos contaminados por hidrocarburos, para darla a conocer en los municipios que comprende el bloque CPO9 en el Meta.

### **1.2 Objetivos Especificos.**

1. Estudiar la capacidad que tienen los microorganismos para degradar los hidrocarburos.
2. Comparar técnicas de Biorremediación para mejorar los suelos contaminados por hidrocarburos.
3. Establecer la estrategia del compostaje, enfocadas al manejo ambiental generado por el derrame de hidrocarburos.
4. Desarrollar el sistema de biorremediación Ex Situ como una alternativa para descontaminar los suelos contaminados por los hidrocarburos, para impulsarlo en los municipios del bloque CPO9 y así mitigar su impacto ambiental.

## 2. Marco teórico.

### 2.1 El petróleo.

El petróleo es un recurso natural no renovable, es el resultado de la degradación anaeróbica de materia orgánica, durante largos períodos de tiempo y bajo condiciones de alta temperatura y presión, que la convierte en gas natural, crudo y derivados del petróleo. El petróleo 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 monos cíclicos, el benceno, tolueno y xileno (BTEX) y los hidrocarburos poli cíclicos (PAHs) tales como el naftaleno, antraceno y fenantreno (**Vargas, P., et al., 2004**).

El petróleo y sus derivados, han sido una fuente de energía y materia prima, que el hombre ha aprovechado en su beneficio, para el transporte aéreo, acuático y terrestre, se utiliza en las industrias químicas, farmacéuticas, manufactura de plásticos y materiales diversos, incluyendo sus primeros usos: de impermeabilización, iluminación, como generador de electricidad, este corresponde al energético más importante en la historia de la humanidad, alimenta un porcentaje muy alto del consumo de energía del mundo, entre el 32% de Europa y Asia, hasta el 53% de Oriente Medio, en Sudamérica y América Central el 44%, África el 41% y Norteamérica el 40% (**Vasallo, J., y Herrera, D., 2002**).

La historia del petróleo como elemento vital y factor estratégico de desarrollo es relativamente reciente, de menos de 200 años. Se comercializó por primera vez bajo el nombre de "aceite de roca", en el año 1850, Samuel Kier, un boticario de Pittsburg, Pennsylvania de EE.UU., a partir de entonces se puede decir que comenzó el desarrollo de la industria del petróleo y el verdadero aprovechamiento de un recurso que indudablemente ha contribuido a la formación del mundo actual (**Vasallo, J., y Herrera, D., 2002**).

El petróleo contiene tal diversidad de componentes que difícilmente se encuentran dos tipos idénticos. Existen parámetros internacionales, como los del Instituto Americano del Petróleo (API) que diferencian sus calidades y por tanto su valor. Así, entre más grados API tenga un petróleo, mejor es su calidad.

Los petróleos de mejor calidad son aquellos que se clasifican como "livianos", "suaves" y/o "dulces". Los llamados "livianos" son aquellos que tienen más de 26° API. Los "intermedios" se sitúan entre 20° y 25° API, y los "pesados" por debajo de 20° API.

El sector petrolero en Colombia ha tenido una importancia creciente en la economía del país en los últimos años. Este sector es estratégico para la economía por su alta participación en el producto interno bruto, porque genera un porcentaje muy alto de las exportaciones totales y porque es también una fuente muy importante de recursos fiscales para el gobierno nacional y para los gobiernos seccionales (**Vargas, P., et al., 2004**).



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**). El crudo de petróleo se caracteriza por ser una matriz contaminante que contiene una elevada diversidad de compuestos, por lo que es un sustrato ideal para evaluar el potencial catabólico de cepas o consorcios microbianos de interés en biorremediación.

### 2.1.1 Composición del Petróleo

#### 2.1.1.1 Composición General

El crudo de petróleo se caracteriza por ser un líquido negro, viscoso y con una composición química sumamente compleja, pudiendo contener un sin número de compuestos, básicamente de la familia de los hidrocarburos (**Rossini, 1960**). Los hidrocarburos hacen parte de la familia predominante de compuestos, por lo que constituyen uno de los grupos de contaminantes ambientales más importantes, tanto por su abundancia, como por su persistencia en distintos compartimentos ambientales (**Casellas et al., 1995**).

En su mayoría son alcanos de cadena lineal ( $n$  – alcanos o  $n$  – parafinas), alcanos ramificados (en menor cantidad), ciclo alcanos (o naftenos) y cantidades variables de hidrocarburos aromáticos. (**Fernández et al., 1992**). La composición elemental de un crudo está condicionada por la predominancia de los compuestos tipo hidrocarburo: 84 a 87% de carbono (C), 11 a 14% de hidrógeno (H), de 0 a 8% de azufre (S), y de 0 a 4% de oxígeno (O) y nitrógeno (N) y metales

como el níquel y el vanadio (**Clark y Brown 1977; Howe-Grant, 1996**). Los principales componentes se subdividen y purifican en distintas fracciones:

- Fracción saturada: n-alcanos, alcanos ramificados con cadenas alquílicas, las cicloparafinas o cicloalcanos y los hópanos.
- Fracción aromática: Hidrocarburos Mono aromáticos, diaromáticos y aromáticos policíclicos (HAP).
- Fracción de resinas: Agregados de piridinas, quinolinas, carbazoles, tiofenos, sulfóxidos y amidas.
- Fracción de asfaltenos. Agregados de HAP, ácidos nafténicos, sulfuros, ácidos grasos, metaloporfirinas, fenoles polihidratados. Son menos abundantes y consisten en compuestos más polares, pudiéndose encontrar hidrocarburos heterocíclicos, hidrocarburos oxigenados y agregados de alto peso molecular (**Speight, 1991**).

#### 2.1.1.2 Composición del crudo según el origen.

La composición de un crudo varía según su localización (**Müller, 1987**). Habitualmente, todos los crudos de petróleo (no degradados) contienen alcanos (de cadena lineal y ramificada, de C1 a C40 aproximadamente, cicloalcanos o naftenos e hidrocarburos aromáticos. Las fracciones de punto de ebullición menor, están formadas por alcanos en todos los casos, mientras que la composición de las fracciones superiores varía según la fuente del petróleo. Se denomina crudo parafínicos o ligero cuando el crudo contiene una elevada proporción de parafinas ( $n$  – alcanos y alcanos ramificados), y asfáltico o pesado si predominan naftenos (cicloalcanos), alcanos de

cadena larga (C30 a C45) y HAPs (**Howe- Grant, 1996**). Según el origen, se tienen crudos parafínicos o asfálticos

### 2.1.1.3 Composición por familias de hidrocarburos.

El estudio más detallado de los hidrocarburos de un crudo de petróleo agrupa estos compuestos en las siguientes familias:

- Parafinas volátiles. Representan hasta un 30% del crudo de petróleo. Son  $n$  – alcanos e isoprenoides (alcanos ramificados) de un tamaño C1 a C10. Es la fracción más volátil del crudo y por lo tanto la más susceptible de pérdidas abióticas por volatilización. La fracción gas natural contiene, principalmente C1 a C5. Los isoprenoides volátiles, están representados principalmente por el isobutano e isopentano. Los isoprenoides volátiles también pueden llegar hasta C10 (2,6 dimetil octano) (**Howe-Grant, 1996**).
- Parafinas no volátiles: Se definen como aquellos  $n$  – alcanos e isoprenoides entre C11 y C40. Los  $n$  – alcanos oscilan entre C11 y C40, aunque se han descrito cadenas más largas y pueden constituir entre el 15 y 20% de crudos no degradados; mientras que los isoprenoides varían de C12 a C22 y constituyen entre 1-2% del crudo, llegando a 15% en crudos degradados. Los componentes entre C11 y C15 son de volatilidad intermedia.
- Naftenos: Esta familia está compuesta por las cicloparafinas o cicloalcanos. Los compuestos más abundantes de esta familia son los ciclopentanos alquilados (fundamentalmente metilados), que pueden llegar a representar un 31% del crudo. Los compuestos mono y dicíclicos corresponden entre el 50 y 55% de esta fracción, los

tricíclicos al 20% y los tetracíclicos al 25%. Esta familia engloba a los hópanos (**Howe-Grant, 1996**).

- Oleofinas. Son alquenos, los cuales están poco presentes en el crudo de petróleo, encontrándose en concentraciones traza. Adquieren importancia en los productos resultantes del refinado, ya que se generan durante el proceso de cracking, existiendo hasta un 30% en gasolinas y un 1% en fueles.
- Aromáticos: El crudo de petróleo contiene una mezcla muy compleja de hidrocarburos aromáticos. Esta fracción la componen moléculas que contienen uno o varios anillos bencénicos en su estructura. Así se encuentran hidrocarburos mono aromáticos (un anillo bencénico), di aromáticos (2 anillos bencénicos) y poli aromático (HAPs, con más de dos anillos bencénicos). (**Howe-Grant, 1996**).
- Resinas y asfáltenos: Se trata de mezclas complejas, integradas por núcleos policíclicos o naftenoaromáticos. Contienen cadenas hidrocarbonadas con heteroátomos de oxígeno, nitrógeno y azufre (componentes NOS del petróleo) y a veces están asociadas con pequeñas concentraciones de metales como el vanadio y el níquel. Constituyen entre un 10% en crudos poco degradados o ligeros, hasta un 60% en crudos muy degradados. Es la fracción que presenta una mayor recalcitrancia de un crudo de petróleo. Se trata de agregados de piridinas, quinolinas, carbazoles, tiofenos, sulfóxidos, amidas, HAP, sulfuros, ácidos nafténicos, ácidos grasos, metaloporfirinas y fenoles polihidratados. (**Howe-Grant, 1996**).

#### 2.1.1.4 Impactos ambientales de los hidrocarburos.

En la actividad petrolera, las disposiciones y el manejo habitual de hidrocarburos y combustibles, en algunos casos conlleva a la contaminación del ambiente, cuando tanques, oleoductos y diversas instalaciones sufren daños. Los líquidos migran hacia el suelo, subsuelo (zona vadosa) y hacia el agua subterránea (zona saturada – acuífero) o superficialmente hacia un bajo topográfico o curso de agua, y sus componentes volátiles a la atmosfera. No solo las contaminaciones se producen por roturas de los sistemas de almacenaje o de transporte, sino que el mal manejo del producto puede provocar impactos negativos en la ecología regional (**Vasallo, J., y Herrera, D., 2002**).

El petróleo en el suelo, que pasa a considerarse como un contaminante, se convierte en un riesgo para la salud humana y el ecosistema. En algunos casos la contaminación no solo provoca problemas de toxicidad, sino que además puede ocasionar grandes riesgos de explosiones y/o incendios. "la contaminación por hidrocarburos" de petróleo ejerce efectos contraproducentes sobre las plantas indirectamente, generando minerales tóxicos en el suelo disponible para ser absorbidos, además conduce a un deterioro de la estructura del suelo; pérdida del contenido de materia orgánica; y pérdida de nutrientes minerales del suelo tales como potasio, sodio, sulfato, fosfato, y nitrato" de igual forma, el suelo se expone a la lixiviación y erosión. La presencia de estos contaminantes, ha dado lugar a la pérdida de la fertilidad del suelo, bajo rendimiento de cosechas, y posibles consecuencias perjudiciales para los seres humanos y el ecosistema entero.

La industria petrolera en su conjunto ha tenido un gran impacto negativo en materia ambiental. Debido a la amplia gama de productos derivados del petróleo que se manejan y que no ha sido

posible evaluar cuantitativamente la contaminación involucrada desde la fase de explotación hasta la obtención de los petroquímicos básicos, ni del seguimiento a la infraestructura petrolera, esta se integrada por:

- Pozos de explotación.
- Baterías de separación.
- Complejos procesadores de gas.
- Centrales de almacenamiento y bombeo.
- Redes de ductos y piletas para el confinamiento de desechos sólidos y líquidos procedentes de la perforación y mantenimiento de los pozos.
- Transporte y distribución en general.

Estas instalaciones poseen riesgos inherentes de fugas de petróleo, diésel y gasolina por roturas de los ductos, por filtración de aguas aceitosas, por daños en las estructuras de almacenamiento y transporte, por malas prácticas, entre otras, lo cual genera un riesgo a nivel de la contaminación ambiental e impactos negativos a los ecosistemas (**Vasallo, J., y Herrera, D., 2002**).

## **2.2 Los Suelos.**

Se denomina suelo al sistema estructurado, biológicamente activo, que tiende a desarrollarse en la superficie de las tierras emergidas por la influencia de la intemperie y de los seres vivos. Se trata de un sistema formado por componentes minerales, componentes orgánicos (humus y derivados, biomasa viva y muerta), gas (aire en el espacio existente en los poros), y agua envolviendo partículas y el espacio capilar (**Alexander, 1991**).

El suelo constituye la interfaz entre la tierra, el aire y el agua, lo que le confiere la capacidad de desempeñar tanto funciones naturales como de uso antropogénico. Los suelos proporcionan soporte físico y nutriente para el crecimiento de las plantas y los microorganismos. Existe una gran variedad de microorganismos (bacterias, actinomicetos, hongos, algas y protozoos) que casi siempre están presentes en ellos, aunque las densidades de población de las mismas varían ampliamente. La superficie de los suelos constituye el lugar donde se producen la mayoría de las reacciones bioquímicas pertenecientes al ciclo de la materia orgánica, el nitrógeno y otros minerales, a la meteorización de las rocas y a la toma de nutrientes por parte de las plantas **(Alexander, 1991)**.

### 2.2.1 Composición del suelo

La matriz de un suelo está compuesta por cinco componentes principales:

- **Minerales.** Los materiales minerales constituyen los principales componentes estructurales de los suelos y suponen más del 50% del volumen total.
- **Aire – agua.** Conjuntamente constituyen el volumen de poros, que, por lo general, ocupa entre el 25 y 50% del volumen total. La proporción aire – agua varía considerablemente con la humedad del suelo.
- **Organismos vivos.** Ocupan menos del 1% del volumen.
- **Materia orgánica.** Oscilan entre el 3 y 6% del volumen, con valor medio.

- La fracción mineral. El mineral predominante en un suelo es el dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). Igualmente se encuentran en abundancia el aluminio y el hierro, mientras que el calcio, magnesio, potasio, titanio, manganeso, nitrógeno, azufre, sodio y fósforo están presentes en menor cuantía (**Alexander, 1991**). La composición química varía de un suelo a otro y, en un mismo suelo, a diferentes profundidades. Los microorganismos obtienen parte de los nutrientes que necesitan de la fracción mineral del suelo, siendo dichos nutrientes nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, azufre, hierro, calcio, manganeso, zinc, cobre y molibdeno. Sin embargo, los microorganismos pueden disponer con facilidad únicamente de una pequeña parte de estos minerales, convirtiéndolos más en una provisión de lento empleo, que en una fuente de rápido uso.

Los suelos se clasifican según el tamaño de sus partículas<sup>1</sup>, teniendo en cuenta tres componentes principales:

- Arcilla. Pasa por un tamiz de 0,002 mm (2m).
- Limo. Queda retenido en el tamiz de 0,002 mm, pero pasa a través del tamiz de 0,05 mm.
- Arena. Queda retenida en el tamiz de 0,05mm, aunque pasa a través del de 2mm<sup>2</sup>.

### 2.2.2 Materia orgánica de un suelo.

La fracción orgánica del suelo está compuesta por:

- Residuos de plantas y animales.



- Células microbianas.
- Productos resultantes del metabolismo microbiano, comúnmente llamado humus. El humus es materia orgánica que ha sufrido varias degradaciones y transformaciones. Está compuesto en su mayor parte por sustancias polimerizadas: compuestos aromáticos, polisacáridos aminoácidos, polímeros del ácido urónico y compuestos que contienen fósforo (**Alexander, 1991**).
- Mucha de la materia orgánica de un suelo, en particular el humus, es ligeramente soluble únicamente en agua y de alguna forma, resistente a la biodegradación. El material húmico tiene propiedades coloidales y una carga neta negativa; por lo tanto, la importancia que tiene en el proceso de formación de complejos organometálicos es considerable.

### 2.2.3 Estructura y agregación de un suelo.

#### 2.2.3.1 Estructura de un suelo.

La estructura de un suelo se puede definir como la disposición y organización de las diferentes partículas del mismo. Dicha estructura constituye una propiedad cualitativa y depende de la porosidad total de un volumen de suelo, de la forma de cada poro y de la distribución global de los tamaños de los poros. Como consecuencia, la estructura de un suelo afecta en gran medida a las propiedades mecánicas de éste, principalmente al movimiento de fluidos, incluidas la infiltración, la retención de agua y la aireación.

Aquellos suelos en los que las partículas están sueltas y no adheridas entre sí (como los depósitos no consolidados de polvo del desierto), se definen como carentes de estructura o como poseedores de una estructura de grano simple. En contraposición, los suelos con partículas estrechamente unidas (como en una arcilla seca), se definen como poseedores de una estructura en masa. Los suelos que poseen una estructura intermedia entre las dos anteriormente descritas, se denominan como agregados.

#### 2.2.3.2 Agregación De Un Suelo.

La agregación de un suelo consiste en la estabilización de la arena, limos y arcilla, mediante la formación de complejos de materia arcillosa – orgánica en agregados. En comparación con las partículas minerales, los agregados constituyen unidades estructurales temporales, en los cuales, su estabilidad se ve afectada en gran parte por la actividad microbiana, los cambios climáticos y por las prácticas agrícolas (tales como la preparación del terreno para su sembrado).

La formación de agregados es el resultado de los enlaces iónicos originados entre arcillas, que poseen una gran superficie neta negativa, y materia orgánica, que también está cargada negativamente para valores de pH neutro, a través de los cationes polivalentes presentes en el suelo. Los agregados padecen una consolidación posterior debido a fuerzas físicas tales como evaporación, deshielo, el crecimiento de raíces y la compactación (**Eweis et al., 1999**).

#### 2.2.3.3 Humedad de un suelo

El contenido de agua en un suelo, en peso o volumen, es función de la presión de succión o, como también se le conoce, el potencial de la matriz. Como concepto, el potencial de la matriz constituye una medida de la tenacidad con la que el agua es retenida en los poros o en la matriz de un suelo. Principalmente, el agua es retenida en los poros por efecto capilar y por adsorción. En la práctica, el potencial de la matriz es una medida de la succión necesaria para que un determinado volumen de suelo contenga una cierta cantidad de agua. La relación entre el potencial de la matriz y la humedad del suelo se representa gráficamente mediante la curva característica de la humedad de un suelo, la cual es única para cada tipo de suelo. Según los diferentes tipos de suelo, cuanto mayor sea el contenido de arcilla de un suelo, mayor será su capacidad de retener agua y la variación de la pendiente de la curva característica suelo – agua será más gradual (Eweis *et al.*, 1999).

#### 2.2.3.4 Gases de un suelo

Existe una relación directa entre las cantidades de agua y aire contenidas en un volumen de suelo, ya que el espacio de poros que no ocupe el gas lo ocupa el agua. Los principales gases que conforman un suelo son, en esencia, los mismos que se encuentran en la atmósfera terrestre. El aire de la atmósfera está compuesto, aproximadamente, por un 78,08% de nitrógeno (N<sub>2</sub>), un 20,94% de oxígeno (O<sub>2</sub>), un 0,035% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y un 0,93% de gases inertes como el argón y el neón. Sin embargo, las concentraciones relativas de dichos gases en el suelo, específicamente del O<sub>2</sub> y del CO<sub>2</sub>, dependen de la aireación del mismo y de la actividad microbiana en todo el perfil.

En cuanto a la actividad microbiana. El suelo es un ambiente muy apropiado para el desarrollo de los microorganismos tanto eucariotas (algas, hongos, protozoos) como procariotas (bacterias y arqueas), además de encontrar virus y bacteriófagos. Todos estos organismos establecen relaciones entre ellos en formas muy variadas y complejas, también contribuyen a las características propias del suelo por su papel en la modificación de las fases sólida, líquida y gaseosa antes mencionadas. Los microorganismos desempeñan funciones de gran importancia en relación con procesos de edafogénesis; ciclos biogeoquímicos de elementos como el carbono, el nitrógeno, oxígeno, el azufre, el fósforo, el hierro y otros metales; fertilidad de las plantas y protección frente a patógenos; degradación de compuestos xenobióticos, etc. Aquellos suelos que en general están bien aireados pueden tener zonas microscópicas anaerobias en el interior de las formaciones de agregados, tales como los clostridium en las capas superiores de un suelo (**Eweis et al., 1999**). Las bacterias aerobias al mismo tiempo que colonizan zonas microscópicas, consumen todo el oxígeno allí almacenado, dando lugar a las condiciones que las bacterias anaerobias necesitan para desarrollarse y sobrevivir. Se calcula que la transición de condiciones aerobias a anaerobias tiene lugar para valores de la concentración de oxígeno inferiores al 1%; al mismo tiempo se cree que manteniendo una aireación adecuada del suelo, el porcentaje del espacio de los poros ocupado por aire no disminuiría por debajo de un 10%.

Los gases se mueven bien en la fase aire, esto es, a través de los poros, suponiendo que están conectados entre sí y en contacto con la atmósfera, o en fase líquida en forma disuelta. La solubilidad de los gases en agua depende de varios factores, incluyendo el propio gas, la temperatura y las presiones parciales de los gases en el espacio de poros (**Eweis et al., 1999**). Sin embargo, la difusión de gases en agua es unas diez mil veces más lenta que en el aire.

### 3. Biorremediación.

La Biorremediación, proviene del término de remediación que hace referencia a la aplicación de estrategias Físico-Químicas para evitar el daño y la contaminación del suelo y agua. La Biorremediación se concentra en la remediación biológica basada en la capacidad de los organismos vivos para degradar en forma natural ciertos compuestos contaminantes, los biológicos más utilizados frecuentemente son microorganismos o vegetales. Permite entonces reducir o remover los residuos potencialmente peligrosos presentes en el ambiente, y se puede utilizar para limpiar terrenos o aguas contaminadas.

Su ámbito de aplicabilidad es muy amplio, pudiendo considerarse como objeto cada uno de los estados de la materia

- 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, PAHs,).
- Hidrocarburos clorados (PCBs, TCE, PCE, pesticidas, herbicidas,).
- Compuestos nitroaromáticos (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.

De todas las técnicas dirigidas a la limpieza de emplazamiento contaminado, la Biorremediación por su interés potencial ha recibido una atención preferente en los últimos años por parte de los profesionales.

### **3.1 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 ("bioremediation"). Las primeras técnicas que se aplicaron fueron similares al "landfarming" (“labranza”) actual 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 de "air sparging" (burbujeo de oxígeno), 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. Paralelamente, se desarrollaron métodos de ingeniería que mejoraron los rendimientos de las técnicas más populares para suelos contaminados ("landfarming", "composting", 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. Esta “industria” busca seguir mejorando en sus líneas interdisciplinarias, que se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Integración en el proceso de técnicas innovadoras que ayuden a comprender y controlar los fenómenos de transporte de nutrientes y otros posibles aditivos.
- Desarrollo de técnicas rápidas de biología molecular que permitan caracterizar las poblaciones indígenas de los emplazamientos contaminados, así como su potencial enzimático.
- Exploración de las implicaciones del concepto de biodisponibilidad ("bioavailability") definido por las propiedades físico-químicas de los contaminantes. Se trata de un factor que en muchos casos está limitando la biodegradación y en otros reduciendo la toxicidad de los contaminantes.
- Desarrollo definitivo de técnicas de bioaumentación realmente útiles.

### **3.2 Ventajas y Desventajas de la Biorremediación.**

#### 3.2.1 Ventajas

- Suele tener costos más bajos, provoca una menor intrusión en el sitio contaminado y en consecuencia un menor daño en el proceso de destrucción de los productos contaminados.
- Se puede realizar en el lugar, lo cual permite que el uso y fabricación industrial del sitio pueda continuar mientras el proceso de la Biorremediación se está aplicando.



- Puede ser útil para retirar algunos de los componentes tóxicos del petróleo.
- Ofrece una solución más simple y completa que las tecnologías Físico-Químicas.
- La Biorremediación puede ser integrada con otras tecnologías en cadena, favoreciendo el tratamiento de los residuos moléculados.

### 3.2.2 Desventajas

- Cuando la Biorremediación se aplica sin conocer los procesos microbianos involucrados, las vías metabólicas y químicas participantes podrían conducir a una situación peor a la ya existentes.
- No es factible en lugares donde por razones económicas, políticas o ambientales es necesaria una rápida limpieza del lugar contaminado; ya que, en los procesos biológicos, en algunas ocasiones son más lentas esta técnica de Biorremediación.

### **3.3 Factores que condicionan la Biorremediación de un suelo.**

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.

### 3.3.1 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.

- 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 y 8. En general, el pH óptimo para las bacterias heterótrofas es neutro (pH 6 – 8), mientras que es más ácido para los hongos (pH 4 – 5). El pH óptimo establecido para procesos de biodegradación es neutro (pH 7,4 – 7,8)

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: 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 (condiciones mesófitas), decreciendo la biodegradación por desnaturalización de las

enzimas a temperaturas superiores a 40 °C e inhibiéndose a inferiores a 0 °C. Sin embargo, también se ha dado la biodegradación de hidrocarburos a temperaturas extremas:

- 10°C en suelos subárticos y subalpinos
  - 5°C en suelos árticos
  - 60°C por una cepa termófila de *Bacillus stearothermophilus* aislada de un suelo contaminado con crudo de petróleo del desierto kuwaití.
- **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).

Por lo anterior, la humedad del suelo puede limitar de forma severa la biodegradación, fundamentalmente en suelos superficiales afectados por oscilaciones importantes en el contenido de agua. No obstante, el nivel óptimo de humedad depende de las propiedades de cada suelo, el tipo de contaminación y si la biodegradación es aeróbica o anaeróbica.

- **El oxígeno:** Es el aceptor final de electrones generalmente empleado en procesos biológicos y también es necesario en determinados tipos de reacciones de oxidación – reducción 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. El aceptor final de electrones es el receptor de los mismos y, en el caso de un metabolismo aerobio,  $O_2$  es el aceptor y  $H_2O$  es el producto.

La mayor parte de hidrocarburos presentes en los productos petrolíferos son degradados con mayor extensión y rapidez de forma aeróbica ( $O_2$  como aceptor final de electrones), ya que en ausencia de  $O_2$ , y en presencia de aceptores de electrones alternativos ( $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $CO_2$ ,  $Mn^{4+}$  y  $Fe^{3+}$ ) los hidrocarburos pueden ser degradados, pero con unas tasas de biodegradación muy inferiores a las aeróbicas

Necesidad de nutrientes inorgánico: 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, mientras que otros nutrientes esenciales como el  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $Fe^{2+}$  y  $SO_4^{2-}$  ya están presentes en cantidades suficientes.

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 de C: N: P, descritas en la bibliografía, respecto al

contenido de carbono a degradar son muy distintas; el rango normal depende del sistema de tratamiento a emplear, siendo de modo habitual 100:10:1. Aunque en general la adición de fuentes de N y P (nitrógeno y fosforo) al suelo es beneficiosa para los procesos de biodegradación, de igual manera, el uso excesivo de nutrientes inorgánicos también puede inhibir los procesos de biodegradación. Para evitar el exceso de nutrientes, así como la pérdida de los mismos por lixiviación, también se han utilizado fertilizantes inorgánicos oleofílicos de liberación lenta para la Biorremediación de suelos contaminados. Además, es importante destacar que la acción de los nutrientes inorgánicos puede estar limitada debido a la interacción química con los minerales del suelo. (El amonio se puede unir a las arcillas por intercambio catiónico y el fosfato puede unirse y precipitar con iones calcio, hierro y aluminio) (Morgan y Watkinson ,1992).

### 3.3.2 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 adecuado, por ejemplo, el oxígeno.

- 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, disolución y la difusión son fenómenos, propios de la transferencia de masas, que condicionan la biodisponibilidad de los contaminantes. Un fenómeno que afecta de forma negativa a la biodisponibilidad de los contaminantes es el envejecimiento o ageing que se define como la pérdida de la biodegradabilidad de los compuestos a lo largo del tiempo en el suelo (aunque la población microbiana mantenga intacto su potencial catabólico), el cual es más importante en suelos con elevado contenido en materia orgánica. Este efecto se produce por una serie de fenómenos como son: la adsorción con la materia particulada del suelo, absorción a la materia orgánica del suelo, a la baja difusividad de los compuestos, principalmente desde los microporos; a la disolución en fases líquidas no acuosas, o a la formación de uniones covalentes con la materia orgánica e inorgánica del suelo.

- 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.

### 3.3.3 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. 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, la n-alcano y los alcanos ramificados (isoprenoides) de cadena intermedia (C<sub>10</sub>-C<sub>20</sub>) son los sustratos más fácilmente degradables por los microorganismos del suelo, y que por lo tanto tienden a ser eficazmente biodegradado. Sin embargo, los alcanos de cadena larga (>C<sub>20</sub>) 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 la n-alcano y alcanos ramificados.

### 3.3.4 Factores Microbiológicos

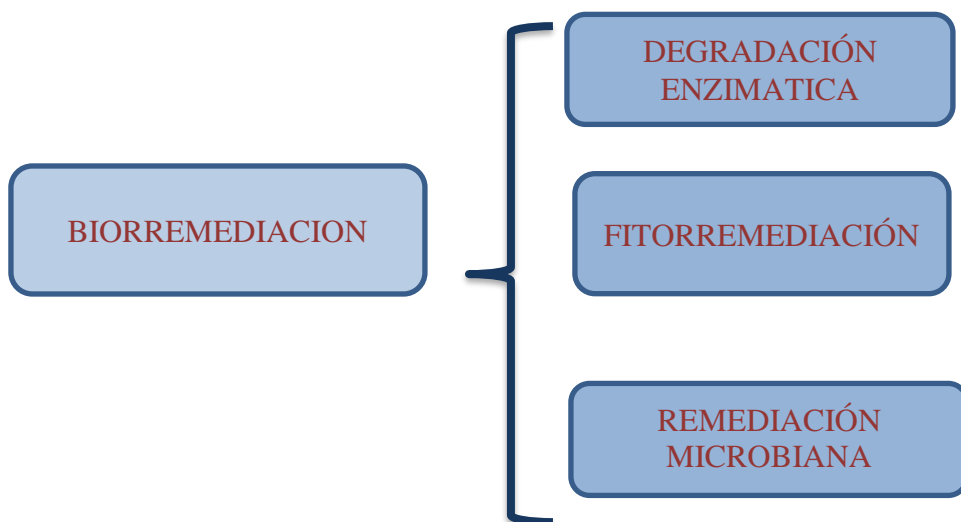
El factor microbiológico más importante en la Biorremediación es la transformación biológica de compuestos orgánicos, catalizada por acción de las enzimas. La biodegradación de un compuesto

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.

### 3.4 Tipos de Biorremediación.

En la Biorremediación se emplean mezclas de ciertos microorganismos o plantas capaces de degradar o acumular sustancias contaminantes tales como metales pesados y compuestos orgánicos derivados del petróleo. En estos procesos se pueden utilizar tres tipos:

Figura 1. Tipos de Biorremediación



Fuente: Elaboración propia



### 3.4.1 Degradación Enzimática

Este tipo de degradación consiste en emplear enzimas como las bacterias que generalmente son percibidas como microorganismos dañinos causantes de diversas enfermedades para el ser humano, sin embargo, son capaces de procesar químicamente sustancias debido a su metabolismo y pueden procesar fácilmente en el sitio contaminado; Con el objetivo de degradar las sustancias nocivas. Estas encimas se obtienen en cantidades industriales por bacterias que se producen naturalmente, o por bacterias modificadas genéticamente que se comercializan por empresas Biotecnológicas. Estas enzimas se usan en tratamientos en donde los microorganismos no pueden desarrollarse debido a la alta toxicidad de los contaminantes, entre ellas tenemos: *Dietza sp*, *Gordonia alkanivorans*, *Micobacterium giluum*, *Sphigomonas sp*.

### 3.4.2 Fitorremediación

En este proceso se utilizan plantas para limpiar ambientes contaminados, aunque está en desarrollo se constituye en una estrategia muy interesante debido a la capacidad que tiene algunas especies vegetales en acumular, absorber y/o tolerar altas concentraciones de contaminantes como los metales pesados, compuestos orgánicos y radioactivos.

Las ventajas que ofrece la Fitorremediación frente a los procesos descritos anteriormente son el bajo costo y la rapidez con que pueden llevarse a cabo ciertos procesos degradativos.

Según la planta y el agente contaminante, la Fitorremediación puede producirse por:

- Acumulación del contaminante en las partes aéreas de la planta (por ejemplo, metales pesados),
- Absorción, precipitación y concentración del contaminante en raíces (por ejemplo, metales pesados, isótopos radioactivos)
- Reducción de la movilidad del contaminante para impedir la contaminación de aguas subterráneas o del aire (por ej. lagunas de deshecho de yacimientos mineros)
- Desarrollo de bacterias y hongos que crecen en las raíces y degradan contaminantes (por ej. hidrocarburos del petróleo, benceno, etc.).
- Captación y modificación del contaminante para luego liberarlo a la atmósfera con la transpiración (por ej. mercurio, selenio y metales clorados)
- captación y degradación del contaminante para originar compuestos menos tóxicos (por ej. pesticidas, herbicidas, TNT, etc.).

### 3.4.3 Remediación Microbiana

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

Existen hongos y bacterias que pueden degradar con facilidad el petróleo y sus derivados, ejemplo el benceno, tolueno entre otros. Los metales pesados como el cadmio, mercurio y el uranio no son biodegradables, pero las bacterias pueden concentrarlos de tal manera de aislarlos para que fácilmente se puedan eliminar.

### **3.5 Tecnologías de Biorremediación.**

Existen dos tipos de tecnologías:

#### **3.5.1 Biorremediación in-situ**

Esta tecnología busca estimular y crear un ambiente favorable para el crecimiento microbiano a partir de los contaminantes. Este objetivo generalmente puede lograrse con el suministro de aire u oxígeno (Bioventeo), nutrientes (bioestimulación), microorganismos (bioaumentación) y/o humedad, además del control de temperatura y PH.

- Bioaireación o bioventeo: Es una variante de la técnica de extracción de gas con vapor (“Soil Gas Extraction” o “Volatilización”), que consiste en suministrar aire al terreno contaminado para promover la actividad de los microorganismos presentes en el subsuelo y biodegradar los hidrocarburos. El aire se suministra mediante un sistema de extracción e inyección. 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. La bioaireación generalmente se lleva a cabo en áreas poco profundas y pequeñas; a menudo es factible la instalación de barreras para guiar el flujo, el uso de cubiertas, un control intensivo, un plan de muestreo y un sistema de ventilación. 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 bioventeo puede ser una alternativa económicamente interesante. No requiere área adicional para llevar a cabo el tratamiento, ni el uso de maquinaria pesada.

#### Desventajas. Las limitantes de este método son:

- Tipo y concentración del contaminante.
- Pérdida 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.
  - Pueden ser inseguros en cuanto a uniformidad, en las características del suelo.
  - Dificultad para verificar la eficacia del proceso.
- 
- 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.

Las características determinantes en la selección, el éxito o el fracaso de esta técnica de remediación son:

- Tipo de suelo. Los suelos deben ser lo más homogéneos posible, con un valor de porosidad y permeabilidad al aire adecuado ( $> 10^{-10}$  cm<sup>2</sup>).
- 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.

#### Desventajas.

- Esta tecnología no es recomendable para suelos arcillosos, altamente estratificado o demasiados heterogéneos, ya que pueden provocar limitaciones en la transferencia del O<sub>2</sub>

- Bioaugmentación

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 birreactor, pero en ambientes externos (suelo o agua) su implantación depende de una serie de factores (Alexander, 1999).

- 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.

### 3.5.2 Biorremediación Ex – situ

Se incluye procesos de biodegradación en fase de lodos, en donde el suelo se mezcla con agua (para formar lodo), microorganismos y nutrientes; y de biodegradación en fase sólido, donde el

suelo se coloca en una celda de tratamiento (composteo) o sobre membranas impermeables (biolabranza) donde se agrega agua y nutrientes. Algunas técnicas son:

- Disposición sobre el suelo: También conocido como “Landfarming”, tratamiento en lechos o tratamiento vía sólida. 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.

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 para la biodegradación. 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. Además, el espesor del suelo extendido debe ser menor de 70 u 80 cm, con el fin de permitir la transferencia de oxígeno del aire atmosférico a la pila del suelo, El sitio donde se realice el tratamiento debe ser adecuado para el manejo de aguas lluvias y control de agua de escorrentía. Los factores a tener en cuenta en la aplicación del “Landfarming” son:

La existencia de unas condiciones geológicas y geoquímicas favorables.



- El manejo de un consorcio microbiano sobre la utilización de un solo morfo tipo, debido a que los morfo tipos al estar en grupo pueden tolerar mejor los cambios físico-químicos en el campo y sus actividades metabólicas pueden interactuar entre sí para la parcial o final biorremediación.
- Conocer las condiciones ambientales en las cuales se desea que los morfo tipos trabajen, para así poder optimizar la biorremediación, cambiando los posibles parámetros físicos o químicos que puedan ir en contra de la actividad microbiana en el material a biorremediar o en el ambiente.
- Resaltar la importancia que tiene la selección de microorganismos autóctonos (aislados del lugar para la biorremediación), debido a que estos morfo tipos se encuentran mejor adaptados al contaminante; a diferencia de morfo tipos foráneos, que, aunque con una gran actividad biorremediadora, pueden no funcionar bajo las condiciones ambientales del lugar.

#### 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.
- 
- **Bioceldas o 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 geo membranas 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. Entre los factores que influyen en la aplicación de las biopilas se destacan:

- 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.
- Necesidad de una densidad de poblaciones microbianas ( $>1.000$  CFU/gramo de suelo), condiciones de humedad (40 a 85% de capacidad de campo), temperatura (10 a 45°C), textura (baja proporción de arcillas), pH del suelo adecuadas (6 a 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.

#### 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 colectar 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.
- Tratamiento de biosuspensión: También conocido como sistema birreactor o contacto líquido-sólido. 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.

### 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.
- El tratamiento vía suspensión puede aplicarse en particular a los suelos contaminados con residuos oleosos y de consistencia alquitranada (siendo estos compuestos difíciles de biodegradar).
- Es más rápido y requiere menos superficie que otros sistemas.

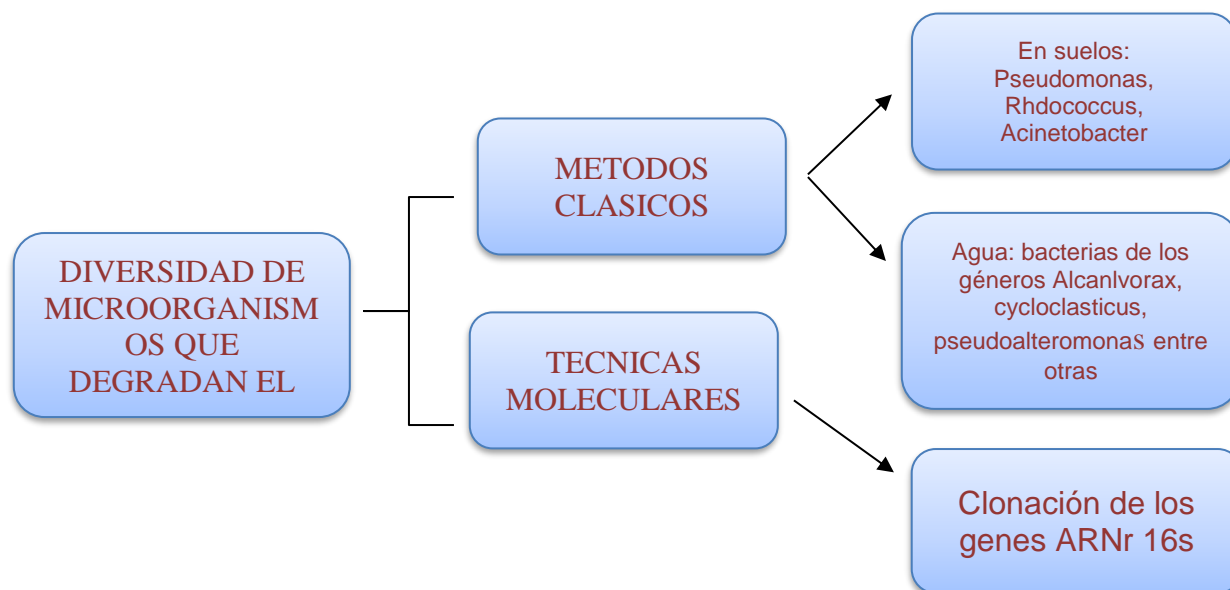
Desventajas.

- 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.

### **3.6 Microorganismos degradadores de Petróleo**

Los llamados organismos hidrocarboclasticos son bacterias y hongos capaces de degradar petróleo fisiológica y metabólicamente. Se distinguen 3 grupos de microorganismos:

Figura 2. Microorganismos que degradan los Hidrocarburos



Fuente: Elaboración propia

- Bacterias: los Pseudomonas, Rhdococcus, Acnetobacter o Bacillus entre son bacterias capaces de degradar el petróleo por poseer el mayor número de especies con esta capacidad.
- Hongos: encontramos varios géneros de hongos capaces de degradar petróleo en este caso los Aspergillus, Penicillium y cándida (este último dentro de las levaduras).
- Algas microscópicas: fundamentalmente cianobacterias.

En ecosistemas no contaminados, los microorganismos degradadores de hidrocarburos constituyen menos del 1% de la comunidad microbiana; mientras que en ecosistemas contaminados con hidrocarburos pueden constituir el 100% de la comunidad microbiana.

Las poblaciones dominantes en estas comunidades poseen características nutricionales, relacionadas al contaminante y puede ser también resistentes a muchas formas de estrés ambientales. Cuando la fuente de carbono es un substrato insoluble como un hidrocarburo, los microorganismos facilitan su difusión hacia la célula, produciendo sustancias como carbohidratos, ácidos grasos, enzimas y biosurfactantes.

## **5. Análisis Para El Presente Estudio**

### **4.1 Actividad petrolera en los Municipios que conforma el Bloque CPO9**

La actividad petrolera data de los años cincuenta, iniciándose en el municipio de Castilla la Nueva, donde se estableció el campo de explotación petrolera pertenecientes entonces a la empresa Chevron Petroleum of Colombia hoy propiedad de ECOPETROL S.A, en las últimas décadas se incrementó la exploración y producción petrolera en el departamento especialmente en los municipios del bloque CPO9. La actividad petrolera constituye el primer renglón económico del departamento del Meta, con un aporte al PIB departamental del 70%.

#### **4.1.1 Nuevas exploraciones petroleras**

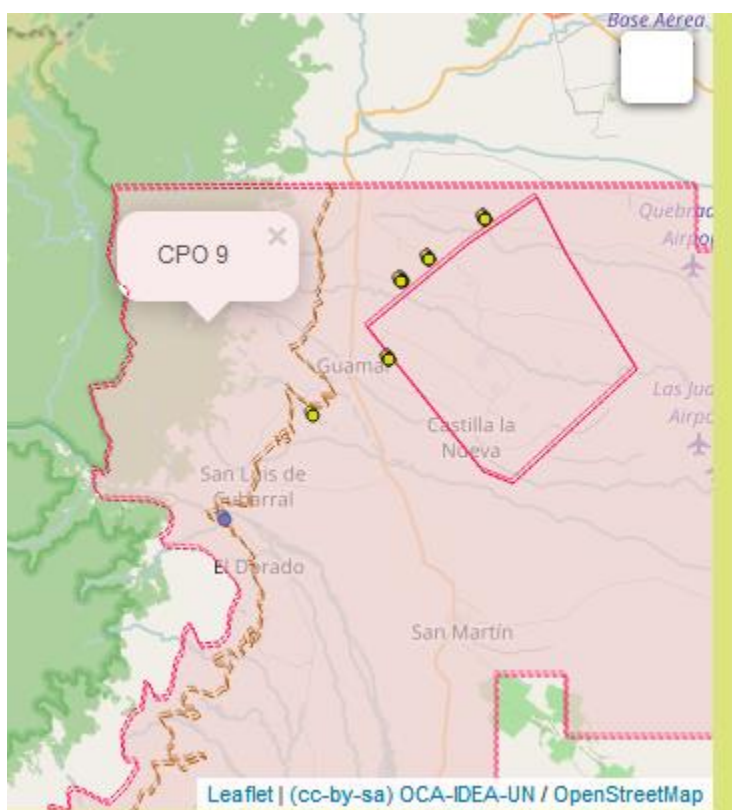
Desde principios del 2008 la empresa ECOPETROL S.A en socio con la petrolera Talismán Energy, recibió en concesión el Bloque CPO9 (territorio para la exploración y explotación petrolera). Ubicado en el Departamento del Meta en este territorio se encuentra distintas áreas para el desarrollo de esta actividad.

En el 2011 después de haber realizado estudios sísmicos. La empresa ECOPETROL S.A contrato estudios socio ambientales para solicitar licencia ambiental en el área de perforación denominada APE-CPO9 ubicado en la jurisdicción de los municipios de Acacias, Castilla la Nueva, Guamal, Cubarral y san Martín de los llanos del departamento del meta. (Gutiérrez J, 2014).



El ANLA (2011) afirma que mediante Resolución No. 331 del 15 de mayo de 2012 otorgó Licencia Ambiental a ECOPETROL S.A. para el proyecto denominado “Área de Perforación Exploratoria CP09”.

Figura 3. Mapa del Bloque CPO9, comprende los siguientes municipios ( Acacias, Guamal, Castilla la nueva, Cubarral y San Martin de los Llanos)



Fuente: Cartilla de divulgación del CPO9, Ecopetrol 2012

#### 4.1.2 Contaminación por hidrocarburos en los municipios del bloque CPO9

Un derrame que dio mucho de qué hablar ocurrió en 2009, cuando una sustancia tóxica afectó 20 de los 54 km del río Orotoy. En esa ocasión, Ecopetrol fue señalado por el Ministerio de Ambiente como responsable de afectaciones en las fuentes hídricas por contaminación, por limitar su uso para las poblaciones ribereñas, por provocar mortandad de peces y por haber usado sustancias químicas sin contar con un plan de contingencia.

Figura 4. Contaminación río Orotoy



Fuente: fotografía tomada por RCN

Otras contingencias tuvieron lugar entre septiembre de 2010 y enero de 2014 en el bloque Cubarral, como se puede ver en el Auto 511 de 2015 de la ANLA. Cuatro de los derrames ocurridos afectaron al Caño Alfije, uno al Caño Lejía y al Caño San Luis, y el más grave de ellos, al Caño La Berraquera, con un derrame de 1.698 barriles de crudo en 2011. El Caño Alfije

ya había sido impactado con dos derrames en 2010: el rebosamiento de una piscina de agua tratada de la Estación Castilla 2, y el de una piscina de aguas aceitosas en la Estación Acacias.

Los impactos ya mencionados se suman a otros producidos por distintas actividades del proyecto, como la exploración sísmica, los vertimientos, y el rebosamiento y filtración de lodos y cortes de perforación por piscinas que no cumplen con las especificaciones técnicas. Esto último ha sido reportado en varias ocasiones en el bloque Cubarral desde 2008, cuando Cormacarena señaló que “los líquidos con hidrocarburos se siguen almacenando en piscinas excavadas en tierra y a cielo abierto, lo que genera la contaminación de las aguas lluvias que caen directamente y posiblemente la contaminación del suelo, aguas subterráneas y superficiales”.

En 2013, la ANLA advertía que Ecopetrol no utilizaba los materiales exigidos por la normatividad en ninguna de sus piscinas para almacenamiento de residuos en Castilla y Chichimene, por lo que sus contenidos se filtraban. Tiempo después, en una Audiencia Pública Ambiental celebrada en diciembre de 2015 en Acacias, la comunidad continuaba denunciando el desbordamiento de las piscinas en múltiples puntos del bloque.

Ecopetrol le explicó al OCA que tras el derrame de unas piscinas que fueron contratadas con terceros y que afectaron el Caño San Luis en 2012, se instaló una planta de tratamiento de lodos aceitosos propia en la Estación Acacias que inició operaciones en julio de 2015. “Actualmente no tenemos piscinas de almacenamiento ni de tratamiento *in situ* de lodos aceitosos”, afirmó

Claudia Villalobos, profesional de viabilidad ambiental de la empresa. Sin embargo, las piscinas de cortes de perforación, que contienen temporalmente los residuos de la excavación de nuevos pozos se mantienen, y no deja de ser preocupante que lo advertido en 2008 por la corporación ambiental, tardase 7 años en solucionarse.

Sobre todo, teniendo en cuenta que la producción del campo Castilla, que se realiza por empuje, estaría utilizando las aguas del río Orotoy y los caños Grande, el Cacayal, Tres Ranchos y el Blanco, razón de la disminución drástica de los caudales de estas fuentes hídricas. También, que con el tiempo la acumulación de elementos en el agua derivada del proceso del petróleo, como calcio, bario, níquel y nitratos, entre otros, tenga efectos letales en la vida humana y animal.

Al ver este tipo de accidentes o fallas operacionales que impactan las aguas con residuos contaminantes, cabe preguntar qué tan probable es la contaminación de las capas de agua que se almacenan bajo la superficie, más conocidas como acuíferos. El riesgo de contaminación se establece a partir de la estimación de su vulnerabilidad, la cual según el Plan de Manejo Ambiental del bloque Cubarral “se asocia principalmente a la cercanía de la lámina de agua a la superficie y a los suelos con predominio de arenas y gravas presentes en el área de estudio, donde la permeabilidad de los mismos puede facilitar el movimiento de los contaminantes al acuífero”.

### 4.1.3 Transporte de hidrocarburos en el Meta

Actualmente en el Meta se cuenta para el transporte de hidrocarburos con una red de tubería de 4.184 km de oleoductos para transporte de petróleo y 3.952 km de poliductos para transporte de productos refinados. El total de estaciones de bombeo y terminales es de 67, distribuidas en 37 para oleoductos y 30 para poliductos.

Figura 5. Formas de transporte de hidrocarburos



Fuente: Cartilla de divulgación del CPO9, Ecopetrol 2012

## 5.2 Resumen analítico de investigación

Ficha RAI 1– Resumen Analítico Investigación en Colombia

No. de la ficha: 01
---------------------

Fecha: 20 de abril del 2019
-----------------------------

**IDENTIFICACIÓN DE LA PUBLICACIÓN:**

Tipo de publicación o documento: Documento en pdf	Año de publicación: 2012
Es resultado de: la investigación acerca de la Biorremediación, técnicas y normas aplicables en Colombia.	
Título: Biorremediación en suelos contaminados por Hidrocarburos en Colombia	
Autor (es): María Alejandra Trujillo Toro y Juan Fernando Ramírez	
Editorial:	Ciudad: Medellín, Colombia
Número de páginas: 26	
<b>PALABRAS CLAVES:</b> Bioaumentación, bioareación, biodegradación, bioestimulación, Inoculación.	
<b>DESCRIPCIÓN DE CONTENIDO:</b>	
<p>1. Biorremediación en Colombia Técnica y Normatividad</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tratamientos ecoeficientes de residuos contaminados con Hidrocarburos en Colombia.</li> <li>• Experiencias de investigación de Biorremediación en Colombia.</li> </ul>	
<b>RESUMEN DEL CONTENIDO</b>	
<p>En la naturaleza los hidrocarburos son eliminados del suelo por procesos de biodegradación, volatilización, y drenaje superficial, por esto es los últimos años se ha prestado mucha atención a los métodos biológicos; tanto para el tratamiento de residuos industriales como en la recuperación de sitios contaminados. Estos métodos se conocen generalmente como proceso de Biorremediación y tienen como objetivo el aprovechamiento y optimización de las capacidades biodegradadoras naturales.</p> <p>Se analiza la Biorremediación como alternativa saludable frente al deterioro progresivo de la calidad del medio ambiente por derramamientos de crudos, ya que esta problemática genera una amenaza real a la salud pública, así como el deterioro de los suelos, las aguas y la extinción de especies vegetales y animales.</p> <p>En la actualidad, la capacidad de eliminación con que cuenta el país comprende las siguientes instalaciones autorizadas para el tratamiento y eliminación de desechos peligrosos (residuos contaminados con hidrocarburos), como alternativas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• PETROLABIN LTDA: Manejo de residuos propios de la industria del petróleo (Biorremediación de lodos, estabilización de lodos de petróleo, lavados químicos de petróleo, des-adsorción térmica)</li> <li>• ATP INGENIERIA LTDA: Biorremediación y y/o Landfarming estimulado.</li> <li>• TOTAL WSATE MANAGEMENT LDA-TWN: Biorremediación de suelos</li> </ul>	

contaminados.

Las experiencias en Biorremediación que tiene Colombia, se ha realizado en forma experimental por centros académicos y de investigación; algunas experiencias son:

- Proyecto liderado por la Universidad de Santander: Biorremediación de lodos contaminados por aceites lubricantes usados. (Rev. Colombia biotecnol 2010)
- Proyecto liderado por el centro de investigación microbiológicos-CIMIC: Biorremediación de residuos del petróleo. (Vargas Cuellar, y Dussan et al, 2004).

#### **CONCLUSIONES DEL AUTOR (ES):**

Una de las ventajas del proceso de Biorremediación es que no genera corrientes de residuos y que inclusive después de suspendido el tratamiento, dadas las condiciones en que se efectúa, se espera un proceso de atenuación natural. En el que, además de la reducción de los hidrocarburos, se reduce las poblaciones bacterianas.

Actualmente en Colombia las empresas del sector petrolero y las multinacionales, comercializadoras de hidrocarburos han venido implementando este tipo de práctica de Biorremediación de lodos contaminados por hidrocarburos como alternativa de saneamiento de campos contaminados.

La Biorremediación es la vía más efectiva para la remediación de suelos contaminados, en contraste a alternativas más costosas como la incineración.

Fuente: (Trujillo Alejandra y Ramírez Juan 2012)

Ficha RAI 2– Resumen Analítico Investigación en Bucaramanga.

No. de la ficha: 02

Fecha: Junio del 2010

#### **IDENTIFICACIÓN DE LA PUBLICACIÓN:**

Tipo de publicación o documento: Rev. colomb. biotecnol.,  
Volumen 12,

Año de publicación:  
2010

Es resultado de: Investigación de lodos contaminados por aceites lubricantes usados

Título: **Biorremediación de lodos contaminados con aceites lubricantes usados**

Autor (es): María Cristina Vásquez, Jennifer Guerrero y Andrea del Pilar Quintero

Editorial: Volumen 12, Número 1, p. 141-157, 2010.	Ciudad: Bucaramanga, Colombia
Número de páginas:	
<b>PALABRAS CLAVES:</b> Biorremediación, biopilas, aceites usados, hidrocarburos totales del petróleo, microorganismos nativos.	
<p><b>DESCRIPCIÓN DE CONTENIDO:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aislamiento, identificación y mantenimiento de los microorganismos</li> <li>2. Preparación del inóculo</li> <li>3. Construcción de biopilas</li> <li>4. Resultados</li> </ol>	
<p><b>RESUMEN DEL CONTENIDO</b></p> <p>Los lodos contaminados con residuos de aceites lubricantes usados generan gran impacto ambiental negativo al no ser manejados adecuadamente. Se propuso la Biorremediación para disminuir la concentración de dichos contaminantes. Los ensayos fueron realizados en las instalaciones de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Río Frío (Girón, Santander, Colombia), donde se evaluaron consorcios microbianos nativos, que posteriormente se adicionaron a las biopilas conformadas por lodos deshidratados provenientes del tratamiento primario de aguas residuales domésticas (usados como fuente de materia orgánica), lodos provenientes de lavaderos de carros y lodos de alcantarillado de la zona industrial de la ciudad de Bucaramanga (Colombia). Se aislaron, identificaron y conservaron cepas microbianas con capacidad degradadora de hidrocarburos totales de petróleo (TPH).</p> <p>Como <i>Pseudomonas</i> spp., <i>Acinetobacter</i> spp, <i>Enterobacter cloacae</i>, <i>Citrobacter</i> spp., <i>Bacillus brevis</i>, <i>Micrococcus</i> spp y <i>Nocardia</i> spp. Se hizo una serie de pruebas piloto donde se inoculó cada montaje con un consorcio bacteriano a una concentración de <math>3 \times 10^8</math> UFC/ml de bacterias y microorganismos fúngicos como <i>Aspergillus</i> spp. <i>Fusarium</i> spp., <i>Trichoderma</i> spp., a una concentración de <math>1 \times 10^6</math> esporas/ml; se monitorearon parámetros de temperatura, pH, humedad y oxigenación.</p> <p>Dentro de las técnicas utilizadas en el proceso de Biorremediación se emplean la Bioaumentación y bioestimulación. En este caso se realizó la Bioaumentación con la adición de soluciones acuosas en concentraciones de <math>3 \times 10^8</math> UFC/ml de los microorganismos nativos seleccionados, y bioestimulación con la adición de Nitrógeno, Fósforo y Potasio; además, se realizó el monitoreo de los parámetros abióticos como temperatura, pH, humedad, oxigenación (volteo).</p> <p>Las muestras fueron recolectadas de diferentes puntos al azar, tomando 500 g a una profundidad no mayor de 15 cm de lodos aceitosos provenientes de lavaderos de carros, lodos de sistemas de alcantarillado de zonas industriales de la ciudad de Bucaramanga, y lodos estabilizados del tratamiento de aguas residuales domésticas, Posterior a la</p>	



identificación de los microorganismos se realizaron pruebas de degradabilidad y compatibilidad. Para la prueba de degradabilidad (cualitativa) se empleó un medio de cultivo líquido modificado a diferentes concentraciones de aceites quemados.

#### Resultados

Se aislaron 22 microorganismos de importancia en procesos de Biorremediación en la fase 1 del proyecto dentro de los que se encuentran gram positivos, gram negativos y hongos, los que posteriormente se utilizaron para la conformación de consorcios y la aplicación en las diferentes biopilas para llevar a cabo el proceso de descontaminación de los TPH presentes en los lodos contaminados.

#### **CONCLUSIONES DEL AUTOR (ES):**

Con este trabajo se lograron porcentajes considerables de remoción de TPH entre el 74,03 y 87,09% en 40 días y 87, 94 y 95% en 120 días con la aplicación de los consorcios microbianos obtenidos y la metodología aplicada en el proceso de Biorremediación en las pruebas de campo.

Se pudo evidenciar que estos residuos depositados en los suelos no son degradados sin la realización de un adecuado tratamiento. El uso de microorganismos nativos representa una alternativa para reducir la contaminación generada por residuos peligrosos y recuperación de zonas impactadas.

**Fuente:** Vásquez, Guerrero y Quintero et al (2010)

Ficha RAI 3– Resumen Analítico Investigación en Medellín.

No. de la ficha: 03	
Fecha: 20 de Abril 2019	
<b>IDENTIFICACIÓN DE LA PUBLICACIÓN:</b>	
Tipo de publicación o documento: Documento en pdf	Año de publicación: 2009
Es resultado de: Investigación de los suelos contaminados por hidrocarburos	
Título: Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos	
Autor (es): Katherine Torres Delgado y Tatiana Zuluaga Montoya	
Editorial:	Ciudad: Medellín, Colombia.
Número de páginas: 92	
<b>PALABRAS CLAVES:</b> hidrocarburos, contaminación, Biorremediación,	
<b>DESCRIPCIÓN DE CONTENIDO:</b>	
1. Hidrocarburos y contaminación	

2. Causas de los derrames por la actividad petrolera
3. Ventajas y desventajas de la Biorremediación.
4. Fitorremediación otra alternativa de Biorremediación.

### **RESUMEN DEL CONTENIDO**

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. La Biorremediación surge de la necesidad de disminuir el impacto ambiental que esto conlleva, con el fin de detoxificar 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.

### **HIDROCARBUROS Y CONTAMINACION**

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.

### **FORMAS DE CONTAMINACION POR LA OPERACIÓN PETROLERA**

La operación sísmica. Es una de las más utilizadas en la etapa de exploración, y consiste en la medición de las ondas de resonancia que produce la detonación de cargas de dinamita.

Esto significa que la zona explorada queda completamente llena de agujeros dinamitados.

La fase exploración. Durante este proceso son utilizados lodos químicos, los cuales son altamente contaminantes, para la mayor penetración en el terreno de los taladros que deben ser enfriados constantemente con agua. También se construyen piscinas para depositar las aguas ácidas y los lodos contaminados que salen junto con el petróleo.

La fase de extracción. Comienza cuando alguno de los pozos exploratorios toca un yacimiento. En tierra o en mar las operaciones a realizarse en esta etapa alteran el ambiente natural y lo contaminan. Esta etapa presente riesgos adicionales de accidentes, relacionados con gases tóxicos, aguas ácidas y los depósitos de crudo.

El transporte. Se da después de la extracción del crudo. El transporte del crudo es una de las

etapas más riesgosas y costosas en términos de destrucción ambiental. Desde que se transporta el crudo masivamente, son millones de barriles que se han derramado en zonas selváticas, ríos, lagos y mares. Las consecuencias de tales derrames continúan afectando estos ecosistemas muchos años después.

## VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA BIORREMEDIACIÓN

### Ventajas

1. 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.
2. Es una tecnología poco invasiva y generalmente no requiere componentes estructurales o mecánicos que signifiquen una amenaza para el medio.
3. Comparativamente, es económica viable y al tratarse de un proceso natural, suele tener aceptación por parte de la opinión pública.

### Desventajas

1. 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 a Biorremediación.
2. 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.

### FITORREMEDIACIÓN OTRA ALTERNATIVA DE BIORREMEDIACIÓN:

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

### CONCLUSIONES DEL AUTOR (ES):

Tanto los tratamientos ex-situ como in-situ son una buena alternativa para conseguir degradar el contaminante, siendo los tratamiento ex-situ los que mejores resultados presentan, ya que las variables pueden ser mejor controladas, es un tratamiento costoso a causa del transporte del terreno contaminado a la zona de tratamiento. El tratamiento in situ es el más recomendado para suelos permeables cuando la contaminación afecta a los horizontes subsuperficiales. En cualquier tratamiento de Biorremediación la velocidad de descomposición por los organismos va a depender de su concentración, de determinadas características del suelo (disponibilidades de oxígeno y de nutrientes, pH, humedad y temperatura) y de la estabilidad del contaminante. Para definir el tratamiento más apropiado es necesario un estudio previo de las características edáficas del suelo y el nivel de contaminación que presenta, con el fin recuperar sus características biológicas y

morfológicas.

**Fuente:** Torres, Katherine Y Zuluaga Tatiana (2009).

Ficha RAI 4– Resumen Analítico Investigación en Bogotá- Colombia.

No. de la ficha: 04

Fecha: 21 de Abril 2019

**IDENTIFICACIÓN DE LA PUBLICACIÓN:**

Tipo de publicación o documento: Documento en pdf

Año de publicación: 2013

Es resultado de: investigación sobre los métodos de Biorremediación

Título: Guía de métodos de Biorremediación para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos.

Autor (es): Roland Mauricio Suarez Beltrán.

Editorial:

Ciudad: Bogotá. Colombia

Número de páginas: 60

**PALABRAS CLAVES:** Biorremediación, in Situ, Ex Situ, bioestimulación, fitorremediación

**DESCRIPCIÓN DE CONTENIDO:**

1. Marco referencial
2. Marco legal
3. Metodología
4. Resultado

**RESUMEN DEL CONTENIDO**

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.

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

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 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, etc. 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

#### **CONCLUSIONES DEL AUTOR (ES):**

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 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.

**Fuente:** (Suarez,2013)

Ficha RAI 5– Resumen Analítico Investigación en Bogotá- Colombia.

No. de la ficha: 05

Fecha: 25 de abril del 2019

#### **IDENTIFICACIÓN DE LA PUBLICACIÓN:**

Tipo de publicación o documento: Documento en pdf

Año de publicación: 2011

Es resultado de: línea de investigación

Título: Modelo para Biorremediación de suelos contaminados	
Autor (es): Danny W. Ibarra y Johan M. Redondo.	
Editorial:	Ciudad: Bogotá, Colombia
Número de páginas: 6	
<b>PALABRAS CLAVES:</b> Landfarming, Dinámica de sistemas, Biorremediación, suelos, contaminación.	
<b>DESCRIPCIÓN DE CONTENIDO:</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Introducción</li> <li>2. Metodología</li> <li>3 Simulación y análisis de los resultados</li> </ol>	
<b>RESUMEN DEL CONTENIDO</b>	
<p>Existen diferentes técnicas físico-químicas para controlar y mitigar este tipo de contaminación por los hidrocarburos, sin embargo, en los últimos años se ha demostrado que las aplicaciones de métodos biológicos han resultado ser eficientes y adecuados, debido a que causa menos impacto en el sitio del problema.</p> <p>Entre las técnicas biológicas de descontaminación la más conocida es el proceso de Biorremediación, esta es una tecnología que utiliza el potencial metabólico de los microorganismos (bacterias) para transformar contaminantes orgánicos en compuestos más simples.</p> <p>El objetivo de esta investigación es crear un modelo a través de la dinámica de sistemas, que se aproximen al proceso de Biorremediación (Landfarming) que hoy en día se aplica en diferentes lugares del mundo.</p>	
<b>METODOLOGIA:</b>	
<p>Debido a la cantidad de factores que intervienen en la Biorremediación y su relación con la degradación microbiológica, se hace necesario implementar un sistema que permita trabajar dicha complejidad. Unas de las alternativas que se adapta a este tipo de problemas sistémico es la que nos ofrece la “dinámica de sistema”.</p>	
<b>SIMULACION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS</b>	
<p>Después de realizar algunas simulaciones este nos muestra que teniendo en cuenta la población de microorganismos disponibles para poder llevar a cabo el proceso de Biorremediación se tuvo que aumentar la concentración de sustrato y el tiempo de duplicación de la población de los microorganismos.</p> <p>Podemos predecir que aumenta la actividad enzimática, lo cual lleva a que el proceso de Biorremediación comience a arrojar resultados óptimos.</p>	
<b>CONCLUSIONES</b>	
El modelo nos permitió observar el comportamiento de las variables, población de los	

microorganismos, suelo biorremediado, suelo contaminado y residuos peligrosos. Lo cual nos muestra que la Biorremediación es un proceso biológico de mucho potencial, para biorremediar los suelos contaminados con hidrocarburos; siempre y cuando tengan las condiciones ideales para estimular el crecimiento microbiano.

Fuente: W, Ibarra Y M. Redondo (2011)

Ficha RAI 6– Resumen Analítico Investigación en Pereira- Colombia.

No. de la ficha: 06	
Fecha: 28 de abril del 2019	
<b>IDENTIFICACIÓN DE LA PUBLICACIÓN:</b>	
Tipo de publicación o documento: Documento en pdf	Año de publicación: 2010
Es resultado de: investigación para la descontaminación de hidrocarburos en el servicio de combustible de Dosquebradas – Risaralda	
Título: Biorremediación para la degradación de hidrocarburos totales presentes en los sedimentos de una estación de servicio de combustibles.	
Autor (es): Diana Cuartas Ñustez	
Editorial:	Ciudad: Pereira, Colombia
Número de páginas: 113	
<b>PALABRAS CLAVES:</b> Bioaumentación, bioestimulación, microorganismos, mesocosmos	
<b>DESCRIPCIÓN DE CONTENIDO:</b>	
1.Marco teórico	
2.Metodología	
3. Resultado	
<b>RESUMEN DEL CONTENIDO</b>	
Se valoró el efecto de la Bioaumentación y Bioestimulación de sedimentos contaminados con hidrocarburos de la Estación de Servicio de Combustible INTEGRAL de Dosquebradas – Risaralda - Colombia, estos sedimentos son producto del mantenimiento de las unidades de tratamiento de aguas residuales industriales, como son: la trampa de grasa, canales perimetrales de la zona de distribución y/o venta del combustible, canales perimetrales de la zona de llenado de tanques de almacenamiento de combustible y desarenador del lavado de vehículos en la Estación de Servicio. Para el avance de esta investigación, en la técnica de bioaumentación se adicionaron a los sedimentos de la Estación de Servicio, microorganismos adaptados a hidrocarburos, los cuales fueron incorporados con un suelo que fue contaminado anteriormente por un derrame de combustible, para la técnica de bioestimulación, a los sedimentos contaminados, se les adicionó un nutriente (Urea), se les agregaba agua y se realizaba un volteo manual, beneficiando el desarrollo y crecimiento de los microorganismos degradadores. Para esta investigación se utilizaron ocho (8)	

mesocosmos, compuestos por canastas de polietileno de alta densidad (57x37x15 cm), estos estaban conformados, primero, solo los sedimentos contaminados de la Estación de Servicio, segundo se tomaron sedimentos contaminados y se les adicionó urea como nutriente, tercero se tomaron 40% de suelos con microorganismos adaptados, más 60% de sedimentos contaminados y cuarto se tomó nuevamente 40% de suelos con microorganismos adaptados, más 60% de sedimentos contaminados y se le adicionó urea como nutriente, a cada mesocosmos se les realizó una réplica. Para su seguimiento y control, se realizaron mediciones a lo largo de los experimentos, de temperatura, pH, y porcentaje de humedad una vez por semana, hidrocarburos totales de petróleo dos veces al mes, porcentaje de nitrógeno, porcentaje de materia orgánica, Fósforo, Potasio y microorganismos degradadores de hidrocarburos, una vez al mes. La duración total fue de veintitrés (23) semanas. Los mesocosmos presentaron tasas de degradación entre el 87,32 mg de Hidrocarburos totales de petróleo (HTP)/kg de suelo seco y 105,41 mg de HTP/kg de suelo seco, con porcentajes de reducción de contenido de hidrocarburo entre 79,7% y 95,1%. Las dos estrategias de biorremediación, la bioestimulación y bioaumentación, no presentaron diferencias estadísticamente significativas.

#### **CONCLUSIONES DEL AUTOR (ES):**

En las primeras siete semanas se observan altas reducciones en las concentraciones de hidrocarburos en los mesocosmos, tiempo en el cual se evidencia también un incremento en la temperatura de los mesocosmos, esto debido al aumento en el proceso metabólico de los microorganismos y su actividad enzimática, llegando a beneficiar la degradación del contaminante, los mesocosmos presentaron al final de la investigación tasas de degradación entre el 87,32 mg/kgss\*d al 105,41 mg/kgss\*d, con porcentajes de reducción de contenido de hidrocarburo del 79,7% al 95,1%, los mesocosmos que presentaron valores un poco más altos en las tasas de degradación fueron los mesocosmos a las cuales se les aplicó urea como nutriente (bioestimulación), esto sin diferencias significativas.

Con los resultados de esta investigación, se sustenta que la presencia de microorganismos nativos, la adición de agua y los volteos manuales, para los sedimentos contaminados producto de las actividades de la estación de servicio de INTEGRRA (Dosquebradas – Risaralda - Colombia), tienen efectos positivos en la reducción de las concentraciones de hidrocarburos totales, no se requiere la compra de nutrientes para tratar estos sedimentos, sin descartar que se debe hacer un análisis del laboratorio al sedimento para decidir el aplicar o no los nutrientes, ya que se puede favorecer la degradación del hidrocarburo dentro de estos.

**Fuente:** Ñuestez, Diana. (2012).



## **5. El Compostaje Como Estrategia De Biorremediacion**

El compostaje o “composting” es el proceso biológico aeróbico, mediante el cual los microorganismos actúan sobre la materia rápidamente biodegradable, (restos de coseche, residuos de casa y excrementos de animales).

El compost o mantillo es un nutriente para el suelo que mejora la estructura y ayuda a reducir la erosión y a la absorción de agua y nutrientes por parte de las plantas.

### **5.1 Propiedades Del Compostaje.**

- Mejora las propiedades físicas del suelo: la materia orgánica favorece la estabilidad de la estructura de los agregados del suelo agrícola, aumenta la porosidad y permeabilidad. Se obtiene suelos más esponjosos y con mayor retención de agua.
- Mejora las propiedades químicas: Aumenta el contenido de macronutrientes N, P, K y micronutrientes, es fuente y almacén de nutrientes para cultivos.
- Mejora la actividad biológica del suelo: Actúa como soporte y alimento de los microorganismos ya que viven a expensas del humus y contribuyen a su mineralización.
- La población microbiana es un indicador de la fertilidad del suelo.

### **5.2 Materia prima del Compostaje.**

Para la elaboración del compost se puede emplear materia prima procedentes de:

- Restos de cosechas: Pueden emplearse para hacer compost o como acolchado. Los restos vegetales jóvenes como hojas, frutos, tubérculos, etc. Son ricos en nitrógenos y pobres en carbono.
- Hojas: pueden tardar entre 6 meses a dos años en descomposición, se recomienda mezclarlos en pequeñas cantidades con otros nutrientes.
- Estiércol de animal: se destaca el estiércol de vaca ya que posee un mayor de nutrientes, aunque hay otros de gran interés como la gallinaza, conejina, estiércol de caballo, de ovejo y los purines.
- Abonos verdes, siegas de césped y malas hierbas.

### **5.3 Factores que condicionan el proceso de Compostaje.**

Para que estos microorganismos puedan vivir y desarrollar la actividad descomponedora se necesitan unas condiciones óptimas de temperaturas, humedad y oxigenación. Los factores más importantes son:

- Temperatura: se considera optimas las temperaturas entre 35- 55 °C, para conseguir la eliminación de patógenos, parásitos y semillas de las malas hierbas. Cuando la temperatura es muy alta muchos microorganismos interesantes para el proceso mueren y otros no actúan al estar esporados.

- **Humedad:** es importante que la humedad alcance unos niveles óptimos del 40-60%; si el contenido de humedad es mayor, el agua ocuparía todos los poros y por lo tanto se produciría una putrefacción de la materia orgánica.
- **Oxígeno:** el compostaje es un proceso aeróbico por lo que la presencia de oxígeno es esencial. La concentración de oxígeno dependerá del tipo de materia, textura, humedad, frecuencia de volteo y de presencia o ausencia de aireación forzada.
- **pH:** influye en el proceso debido a su acción sobre los microorganismos, los hongos toleran un margen de pH entre 5-8, mientras las bacterias tienen menor capacidad de tolerancia (pH 6-7, 5).
- **Relación C/N:** El carbono y el nitrógeno son los dos constituyentes básicos de la materia orgánica, es importante realizar una mezcla adecuada de los distintos residuos con diferente relación C/N para obtener un compost equilibrado. Materias orgánicas ricas en carbono y pobres en nitrógeno son: la paja, el heno seco, las hojas, las ramas el aserrín. Los pobres en carbón y ricos en nitrógeno son los vegetales jóvenes, las deyecciones de animales y los residuos del matadero.
- **Población microbiana:** El compostaje es un proceso aeróbico de descomposición de la materia orgánica llevando a cabo una amplia gama de población de bacterias, hongos y actinomicetos.

#### **5.4 Proceso del Compostaje.**

En el proceso de compostaje puede dividirse en cuatro periodos atendiendo la evolución de la temperatura.

- **Mesolítico:** la masa vegetal está a temperatura ambiente y los microorganismos mesofilos se multiplican rápidamente. Como consecuencia de la actividad metabólica, la temperatura se eleva y se producen ácidos orgánicos que hacen bajar el pH.
- **De enfriamiento:** Cuando la temperatura es menor a 60°C reaparecen los hongos que reinvasen el mantillo y descomponen la celulosa.
- **Termofilico:** Cuando se alcanza una temperatura de 40°C, los microorganismos termofilico actúan transformando el nitrógeno en amoniaco y el pH medio se hace alcalino. A los 60°C estos hongos desaparecen y aparecen las bacterias esporigenas y actinomicetos. Estos organismos son los encargados de descomponer las ceras, proteínas y hemicelulosa.
- **De maduración:** es un periodo que requiere meses a temperatura ambiente, durante los cuales se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización del humus.

#### **5.5 Tipos de sistemas de Compostaje.**

Hay tres tipos las hileras, pilas estáticas y reactores cerrados. La forma de aireación es lo que diferencia a las pilas estáticas de las hileras; las hileras son aireadas por volteo mientras las pilas estáticas se introducen por aireación forzada.

- **Hileras:** Se apila el material ya mezclado con los agentes esponjantes y los nutrientes si son necesarios, formando hileras.

El alto y ancho de las mismas deben ser suficientes para permitir que el calor generado en el proceso metabólico sea mayor al disipado.

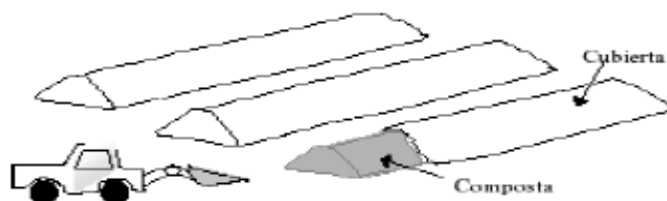


Figura 6: Representación de un sistema de compostaje en hilera

- **Pilas estáticas:** El material mezclado se coloca sobre un sistema de tubos perforados, conectados a un soporte o bomba de vacío. La aireación de las pilas puede lograrse mediante aire forzado o por vacío, las pilas pueden ser de 3 a 6 metros de altura.

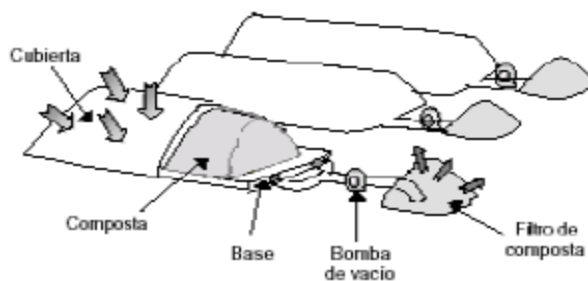


Figura 7. Representación de compostaje en pilas estáticas

- **Reactores cerrados:** Tiene altos costos de inversión, pero proporciona el mayor control de proceso, se equipa con mecanismos combinados para permitir frecuentes o continuas

mezclas de los residuos. Las mezclas mejoran la distribución de los contaminantes y permite mayor contacto entre los microorganismos.

## Discusión Final

### Ficha RAI 7. Resumen Analítico de Investigación

TITULO	AUTOR	RESULTADOS
Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos en Colombia	María Alejandra Trujillo Y Juan Fernando Ramírez	En Colombia se han realizado de forma experimental por centros académicos y de investigación buscando crear e importar nuevas técnicas de Biorremediación. Las empresas del sector hidrocarburos han venido implementando la biorremediación de lodos como una alternativa de saneamiento. Con el tratamiento “In Situ” como implementación de Bioaugmentación de microorganismos.
Biorremediación de lodos contaminados con aceites lubricantes usados	María Cristina Vásquez, Jennifer Guerrero y Andrea del Pilar Quintero	Se utiliza el tratamiento “Ex Situ” como alternativa de biorremediación por medio de Biopilas como técnica biológica o Bioestimulación, con (agua, melaza, sales minerales, extracto de levadura, la inoculación de microorganismos y los lodos contaminados). Se lograron porcentajes importantes (74- 95%) de descontaminación en tiempos cortos de 40 y 120 días
Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos.	Katherine Torres Delgado Y Tatiana Zuluaga Montoya	Tantos los tratamientos “Ex Situ” como los “In Situ” son una buena alternativa para conseguir degradar el contaminante siendo los tratamientos “Ex Situ” los que mejores resultados presentan. En cualquier tratamiento de biorremediación la velocidad de descomposición va a depender de su concentración y características

Guía de métodos de biorremediación para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos

Roland Mauricio Suarez

del suelo.

El proceso de Bioaumentación es el mejor proceso ya que implica menores niveles de impacto ambiental.

Se deben identificar y realizar un análisis de las ventajas y desventajas del suelo a remediar.

Modelo de biorremediación de suelos contaminados

Danny W Ibarra Y  
Johan M Redondo

Después del proceso de la bioestimulación con microorganismos se debe tener en cuenta las condiciones ideales para estimular el crecimiento microbiano y este logre adaptarse al medio donde se va a implementar. Para obtener un buen resultado de biorremediación.

Se sustenta que la presencia de microorganismos nativos, la adición de agua y los volteos manuales para los sedimentos contaminados en la estación de servicio, tienen efectos positivos en la reducción de concentración de hidrocarburos con la estrategia “In Situ” bioestimulación y bioaumentación.

Biorremediación para la degradación de hidrocarburos totales presentes en los sedimentos de una estación de servicio.

Diana Cuartas Ñustez

Elaborado por: Anderson Ruiz Olarte.

La naturaleza tiene mecanismos de autorregulación. Cuando un ecosistema es dañado o perturbado por la presencia de cualquier agente físico, químico o biológico, éste utiliza mecanismos de recuperación, como bacterias y hongos que pueden degradar a los agentes dañinos

Después de analizar todo el estudio realizado y ver los resultados de algunos trabajos hechos por diferentes autores, vemos que el mejor método de biorremediación para darlo a conocer en los municipios del bloque CPO9 es el “Ex Situ” por medio del compostaje, ya que se puede implementar debido a las siguientes ventajas



-Es amable al ambiente

-incremento de las concentraciones de microorganismos en ecosistemas

-no se genera un daño de segundo grado al medio ambiente

-en el caso de que la contaminación este en lugares inasequibles se puede realizar sin necesidad de cavar

-un menor costo

-no se utiliza la incineración dejando in-fértil el suelo

- tiene un costo de (2.000.000) Dos millones de pesos por hectárea

Con este estudio damos a conocer que Las condiciones óptimas y el éxito de un proceso de compostaje dependen de diversos parámetros, los cuales pueden resumirse en tres categorías: las características del suelo, las condiciones climáticas y las características de los contaminantes en este caso (suelos contaminados por hidrocarburos). Una de las ventajas que ofrece la tecnología ex situ como es el caso de las biopilas, el poder controlar dichas condiciones. Los parámetros que deben considerarse y controlarse para aumentar la eficiencia de un proceso de compostaje.

El sistema de compostaje es actualmente una de las tecnologías de biorremediación más utilizada a nivel mundial para la remediación de suelos contaminados principalmente por hidrocarburos.

El incremento en su aplicación se debe a que sus procesos son sencillos, tecnológicamente efectivos y sus costos son bajos en comparación con la mayoría de las tecnologías

fisicoquímicas. Sin embargo, aunque las tecnologías de compostaje para la remediación de suelos contaminados son procesos relativamente sencillos de implementar y desarrollar,

requieren del conocimiento de los factores (biológicos, físicos y químicos) involucrados. Para

esto, es necesaria la incorporación de equipos multidisciplinarios de trabajo integrados por

microbiólogos, biotecnólogos, químicos, edafólogos, ingenieros, entre otros. En el marco del

desarrollo sustentable, el proceso de compostaje presenta importantes perspectivas para resolver muchos de los problemas de contaminación por hidrocarburos en el Departamento del meta y el municipio de los bloques cpo9. Por ello, es necesario llevar a cabo con seriedad, responsabilidad y con un amplio conocimiento, la aplicación de esta tecnología como alternativa para la biorremediación de estos sitios contaminados. Antes de aplicar algún proceso de compostaje para la remediación de un sitio en particular, es indispensable contar con información completa del mismo (origen de la contaminación, caracterización del suelo y del contaminante a tratar) y establecer pruebas de biodegradación del contaminante por microorganismos autóctonos o exógenos para, posteriormente, seleccionar el tipo de tecnología con base en sus costos y a la disponibilidad de materiales y equipo para realizar el tratamiento. Las tecnologías de compostaje en particular y de biorremediación en general, son procesos viables de aplicación para la remediación de suelos contaminados por compuestos orgánicos en el departamento del meta en el municipio de Castilla la nueva ya que usualmente, la mayor parte de su territorio, cuenta con las condiciones climáticas adecuadas, con temperaturas medias anuales que oscilan entre los 28 y 35 °C, propicias para emplear estos tipos de procesos El funcionamiento del proceso (en hileras o en pilas) requiere una optimización de aireación, temperatura, humedad y pH. Generando buenos resultados y es un excelente regenerador de suelos.

Este método se puede implementar y darlo a conocer a las empresas aliadas a Ecopetrol ya que van a empezar a intervenir en estos municipios y así haya una disminución de contaminación en los suelos y mejorar al ambiente.

El costo de implementar una estrategia de biorremediación por compostaje es de \$2.000.00 (dos millones de pesos por hectárea cuadrada) mediante los cuales se adecuará el terreno y se adquieren los microorganismos con el fin de mitigar los impactos ambientales

los beneficios económicos son que el compostaje es un método orgánico el cual busca minimizar los impactos ambientales, este método es muy implementado en sectores de industria de hidrocarburos porque tienen un efecto positivo para el cultivo a nivel económico por año y por hectárea, como tal ayuda a mantener las propiedades y estructura del suelo de una manera natural ya que es una herramienta económica comparada con los procesos de descontaminación con productos químicos difíciles de conseguir en esta zona.

## **Conclusiones**

El desarrollo sostenible necesita una orientación que le dé un enfoque de gestión, que implique innovación y desarrollo de nuevas tecnologías para el control de la contaminación del ambiente.

Vemos que la biorremediación es una alternativa atractiva y prometedora a las tradiciones técnicas para la remediación de los compuestos que contaminan un lugar por hidrocarburos, ya que ha demostrado ser rentable y puede degradar selectivamente los contaminantes sin dañar la flora y fauna.

En esta investigación vemos que la biorremediación, tanto en los tratamientos Ex –situ como In-situ son una buena alternativa para darla a conocer a las empresas encargadas de remediar la contaminación, siendo los tratamientos por medio de in-situ los que mejores resultados presentan y se beneficia el ambiente como la comunidad afectada.

Se puede implementar el compostaje en los municipios que comprende el bloque CPO9, como remediación del suelo cuando ocurra un evento de contaminación por hidrocarburos ya que en estos sectores la industria petrolera ha empezado sus contrataciones de perforación y extracción de petróleo.

Este proceso es una ventaja ya que la mayoría del material que se utiliza para el compostaje (estierco de animal y otros desechos) los podemos recaudar en los sitios como complejos ganaderos o fincas de la región, y así su inversión será muy baja y facilita a las personas encargadas de remediar estos suelos contaminados por hidrocarburos una orientación que implique innovación y desarrollo de nuevas tecnologías para el control de estas.

## **Recomendaciones.**

Analizar la presente propuesta y ponerla en práctica como un proyecto piloto para luego continuar con un proyecto general de mejoramiento de todos los procesos de biorremediación. Se hace necesario que para la formulación de futuros trabajos en gestión de proyectos que sean dirigidos al manejo de esta técnica se cuente con un especialista de manera que se logre una estructuración y planeación completa, que conlleve a una ejecución satisfactoria y a la obtención de resultados esperados.

Todos aquellos proyectos que se vayan a realizarse en el territorio ante la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), Cormacarena y en la Evaluación de Impactos Ambientales (EIA) sean incluidos la biorremediación como una técnica amigable al ambiente.

Capacitar a las empresas contratista de Ecopetrol que ya están en la región, acerca de la importancia que tiene esta técnica y ponerla en práctica en futuros proyectos sostenibles que mejoren la calidad de vida de las personas.

Divulgar el uso de la tecnología de biorremediación como una alternativa para el tratamiento de suelos contaminados por hidrocarburos en la zona que comprende el boque CPO9, ya que en estos municipios se está empezando la exploración y explotación de los hidrocarburos.

En general, la contaminación del suelo por productos compuestos por hidrocarburos o desechos de la industria petrolera; pueden ser tratados y recuperados ecológicamente con la biorremediación, basado en la estimulación de los microorganismos.

En cualquier tratamiento de biorremediación la velocidad de descomposición por los organismos va a depender de la concentración de determinadas características del suelo. (Humedad, pH, disponibilidad del oxígeno y temperatura). Para definir el tratamiento apropiado es necesario un estudio previo de las características del suelo y el nivel de contaminación.

Divulgar el uso de la tecnología de biorremediación como una alternativa para el tratamiento de suelos contaminados por hidrocarburos en la zona que comprende el boque CPO9, ya que en estos municipios se está empezando la exploración y explotación de los hidrocarburos.

Explorar este tipo de biorremediación en suelos afectados con niveles de contaminación altos, no solo con hidrocarburos; si no con otro tipo de componentes tóxicos, ya que esta tecnología se puede realizar a bajo costo y es amigable al ambiente.

## **Glosario.**

**Abiótico.** Que carece de vida. Se dice de, los factores que conforman un ecosistema, tales como clima, suelo, etc.

**Actinomicetos.** Grupo de bacterias de aspecto bacilar o filamentoso según el medio de desarrollo.

**Biodegradación.** Se refiere al proceso natural mediante el cual bacterias u otros microorganismos alteran y convierten moléculas orgánicas en otras sustancias.

**Biorremediación.** Adición de materiales a ambientes contaminados, para producir una aceleración del proceso natural de biodegradación.

**Fertilización.** Método de biorremediación de adición de nutrientes, como nitrógeno o fosforo a un medio contaminado para estimular el crecimiento de microorganismos nativos.

**Fitorremediación.** Es el uso de plantas para limpiar ambientes contaminados.

**Inoculación.** Adición de microorganismos a un sitio contaminado, las cuales pueden adicionarse junto con nutrientes.

## Referencias bibliográficas.

- Alexander, M (1999). *Biodegradation and Bioremediation*. 2da Ed. London. Academic Press.
- ANLA, (2011). *autoridad nacional de licencias ambientales*. Recuperado el 25 de abril del 2019: [http://portal.anla.gov.co/sites/default/files/auto\\_5321\\_20112017\\_ct\\_5680.pdf](http://portal.anla.gov.co/sites/default/files/auto_5321_20112017_ct_5680.pdf)
- Casellas, M., P. Fernández., J.M Bayona y A.M. Solanas (1995). *Bioensayo Químico dirigido al análisis de componentes tóxicos en partículas urbano*. Barcelona- España.
- Eweis, J et (1999). *Principios de Biorrecuperación*. Malaysia. Mac Graw Hill.
- Fernández, P., M, Grifoll. A.M, Solanas. J.M Bayona y J, Albaiges. (1992). Ensayo dirigido al análisis químico de componentes tóxicos en sedimentos costeros. Environ. Sci. Techol.
- Howe- Grant, M. (1996). *Petróleo. Enciclopedia de la tecnología química*. 4th Ed. Wiley Inerscience publication. New York. Pp. 342-480.
- Martinez, Maricela. (2016). *Identificación de problemas socioeconómicos, ambientales y Conflictos sociales generados por la actividad petrolera en el municipio de acacias*. (Trabajo de grado). Universidad del Valle. Recuperado de: <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/9296/1/0534159-P-S-2016-1.pdf>
- Morgan, P y R.J Watkinson (1992). *Factores que limitan el suministro y la eficiencia de nutrientes y Suplementos de oxígeno para el tratamiento biológico in situ de suelos y aguas subterráneas contaminadas*. Wáter Res.
- Müller, (1987). Hidrocarburos en el medio ambiente de agua dulce. Revisión de la literatura. Arc. Hydrobiol.
- Ñustez, Diana. (2012), *biorremediación para la degradación de hidrocarburos totales Presentes en los sedimentos de una estación de servicio de combustible*. (Proyecto de Grado). Universidad Tecnológica de Pereira. Recuperado de: <http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesis/textoyanexos/6281683N975.pdf>
- Orosco, Verónica & SORIA, Mercedes. (2008). *Biorremediacion de vegetación contaminada Con petróleo por derrames en el campamento Guarumo-petroproduccion*. (Tesis de



Grado). Universidad politécnica de Chimborazo. Recuperado de:  
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/225/1/236T0009.pdf>

Prince, R. (1993). *Biorremediación en los ecosistemas marinos*. Crit. Rev. Microbiol.

Rossini, F.D (1960). *Hidrocarburos de petróleo*. Journal of chem. Ed. Uc.

Suarez, Roland. (2013). Guía de métodos de Biorremediación para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos. Universidad Libre. Bogotá. Recuperado de:  
<https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/10607/TRABAJO%20FINAL%20cd.pdf?sequence=1>

Speight, J.G. (1991). *La química y tecnología del petróleo*. Jhon Wiley and Sons. New York.

Torres, Katherine & ZULUAGA, Tatiana. (2009). *Biorremediación de suelos contaminados Por hidrocarburos*. (Trabajo de grado). Universidad de Colombia Medellín. Recuperado de: [http://www.bdigital.unal.edu.co/815/1/32242005\\_2009.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/815/1/32242005_2009.pdf)

Trujillo Alejandra y Ramírez Juan 2012. *Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos en Colombia*. Medellín, Colombia. Recuperado de:  
[https://www.researchgate.net/publication/282607936\\_Biorremediacion\\_en\\_suelos\\_contaminados\\_con\\_hidrocarburos\\_en\\_Colombia](https://www.researchgate.net/publication/282607936_Biorremediacion_en_suelos_contaminados_con_hidrocarburos_en_Colombia)

Volke, T y Velasco, J (2002). *Tecnología de remediación para suelos contaminados*. Instituto Nacional de Tecnología. México D.F.

Vargas, P. Cuellar R, y Dussan, J (2004). *Biorremediación de residuos del petróleo*. Ecopetrol. Apuntes científicos. N° 4 Colombia.

Vasallo, J y Herrera, D (2002). *Seminario de hidrocarburos*. Escuela Superior de Salud y Ambiente. Universidad Nacional.

Velasco, Juan & VOLKE, Tania. El composteo una alternativa ecológica para la Biorremediación de suelos mexicanos. Recuperado de:  
<http://www.redalyc.org/pdf/539/53906604.pdf>