

Evaluación de los procedimientos de biorremediación para el tratamiento de fluidos aceitosos
(borras) en la industria de hidrocarburos del bloque Llanos34 ubicado en el municipio de
Villanueva, Casanare.

Derlin Vanessa Carvajal Martínez.
Noviembre 2020.

Universidad Nacional Abierta y a Distancia de Colombia.
Meta
Especialización en Gerencia de Proyectos

Evaluación de los procedimientos de biorremediación para el tratamiento de fluidos aceitosos (borras) en la industria de hidrocarburos del bloque Llanos34 ubicado en el municipio de Villanueva, Casanare.

Autor

DERLIN VANESSA CARVAJAL MARTINEZ

Director

ANA MARIA ROJAS

Monografía para obtener el título de especialización en Gestión de proyectos

**UNIVERSIDAD NACIONAL A DISTANCIA
ESPECIALIZACION EN GESTION DE PROYECTOS
ACACIAS-META
2020**

Dedicatoria

iii

Este trabajo esta dedicado a:

Primeramente quiero agradecer a Dios por la darme la sabiduria y el entendimiento para alcanzar las metas propuestas.

A mis padres por sus sacrificios y por el apoyo continuo, por el amor incondicional que me brindan como motivacion que hacen que sea el motor que mueva mi vida para vencer los obstaculos.

A mi hermano por su apoyo incondicional que me ha brindando en esta fase academica.

A mis tutores quienes transmitieron sus conocimientos y me orientaron en sus enseñanzas convirtiendome en mejor profesional.

A mis amigos cercanos que siempre han estado apoyandome y dando un consejo oportuno para no desfallecer ante las adversidades.

Agradecimientos

iv

Mis agradecimientos a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia porque me ha formado como profesional, porque fue un horizonte para mi proyecto de vida.

A mis tutores por sus enseñanzas, por sus exigencias y dedicación para transmitir sus conocimientos. A la tutora Ana Maria Rojas por su disposición y el tiempo de dedicación para construir este documento.

Esta propuesta va orientada en dar a conocer los procedimientos de biorremediación de los fluidos aceitosos (barras), ya que es la opción más usada al momento de tener inconvenientes en la disposición final de este residuo. Los fluidos industriales han generado impactos negativos en la zona Orinoquia ya que por inconvenientes de operaciones presentan fallas, ocasionando derrames y daños al medio ambiente. Afectando directamente al suelo y las fuentes hídricas aledañas.

La normativa nacional mediante el decreto 1594 de 1984 derogado por el Decreto 3039 de 2010, en el artículo 35 establece por parte de los usuarios que exploren, exploten, manufacturen, refine, transforme, procesen, transporte o almacenen hidrocarburos o sustancias nocivas para la salud, de elaborar e implementar los planes de contingencia.

Por tal motivo, se busca hacer seguimiento desde el transporte, recolección y disposición final de los residuos líquidos, utilizando procedimientos asociados a la biorremediación, de manera que se puedan mitigar algunos impactos ambientales.

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 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 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.

Palabras claves: Biorremediación, pH, Contaminación, tratamiento, Hidrocarburos, Microorganismos.

Abstract

This proposal is aimed at making known the bioremediation procedures for oily fluids (sludge), since it is the most used option at the time of having problems in the final disposal of this waste. Industrial fluids have generated negative impacts in the Orinoquia area since, due to operational inconveniences, they present failures, causing spills and damage to the environment. Directly affecting the soil and the surrounding water sources.

National regulations through Decree 1594 of 1984 repealed by Decree 3039 of 2010, in stable article 35 by users who explore, exploit, manufacture, refine, transform, process, transport or store hydrocarbons or substances that are harmful to health, to develop and implement contingency plans.

For this reason, it seeks to monitor the transport, collection and final disposal of liquid vii waste, using procedures associated with bioremediation, so that some environmental impacts can be mitigated.

Contamination in the case of soils, its main environmental consequences that arise after a hydrocarbon spill event are: the reduction or inhibition of the development of plant cover, changes in the population dynamics of fauna, microbial biota and contamination by infiltration into underground water bodies. In addition to the negative economic impact of public and social health in areas surrounding the affected place.

The contamination of water 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.

Bioremediation arises from the need to reduce this environmental impact that this entails, in order to detoxify pollutants in different environments (rivers, pipes and soils) using microorganisms, plants or enzymes of these, in a strategic way. Thanks to biotechnology they have developed various strategies in order to restore the soil and environmental quality, according to the needs and dimensions of the problem. The factors that determine the advantages, disadvantages and characteristics of each of its methods are taken into account.

KEYWORDS: Bioremediation, pH, Contamination, treatment, Hydrocarbons, Microorganisms.

Tabla de Contenidos

viii

	Pag
Introducción	1
Objetivos	4
Objetivo general	4
Objetivos específicos	4
Marco teórico	5
Descripción de los procedimientos desde el transporte, recolección y disposición final de los fluidos aceitosos (borras)	27
transporte de borras	27
Recolección de fluidos aceitosos (borras)	28
Tratamiento y disposición final	29
Análisis de la investigación	33
Biorremediación de suelos contaminados por residuos industriales	33
Deducciones de este análisis	35
El compostaje como estrategia de biorremediación	38
Conclusiones	42
Recomendaciones	44
Bibliografía	46

Lista de tablas

ix

	Pag
Tabla 1. Características fisicoquímica de la borra	28

Lista de figuras

	Pag
Figura 1. Ubicación de GeoPark Colombia.	27
Figura 2. Muestra de borras.	29
Figura 3. Muestra de separación de la composición.	30
Figura 4. Tanques de almacenamiento.	31
Figura 5. Proceso de cultivo de bacterias aerobia.	32
Figura 6. Divulgación de la investigación.	37

Introducción

El Casanare 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. (Geopark, 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 (Volke & Velasco, 2020) 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 esta investigación 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 la zona de Llanos 34. 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 los procesos de disposición final de los residuos líquidos.

El enfoque de la investigación se realizó debido a que la zona Orinoquia, es donde principalmente el sector económico es la industria de hidrocarburos, generando grandes volúmenes de fluidos contaminados, aproximadamente 540 barriles diarios; especialmente en Llanos 34, ubicado en Villanueva- Casanare. Por temas operacionales tiene inconvenientes al momento de realizar los cargues o el despacho, generando derrames y afectando el suelo; perjudicando así la diversidad de animales que se encuentran en la zona (chigüiros, venados, corocoras). Para este tratamiento que se le realiza a los fluidos, se debe presentar antes a la autoridad ambiental, los procedimientos que se realiza,

evidenciando paso a paso con el fin de mostrar a la comunidad que el índice de contaminación es bajo.

Objetivos

Objetivo general

Demostrar el seguimiento mediante la biorremediación como proceso para el tratamiento de fluidos aceitosos (borras) derivados de la industria de hidrocarburos en Llanos 34.

Objetivos específicos

- ✓ Hacer el seguimiento a los procesos de descontaminación en residuos industriales, por medio de la alternativa de biorremediación.
- ✓ Socializar a la comunidad aledaña de tratamientos que se realizan a los fluidos, con el fin mitigar daños ambientales.
- ✓ Establecer estrategias enfocadas al manejo ambiental, teniendo en cuenta las actividades de transporte, recolección y disposición final de residuos líquidos.

Marco teórico

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, Cuellar, & Dussan, 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 & Herrera, 2005).

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 & Herrera, 2005).

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 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.

Composición del petróleo: A continuación, se da a conocer los diferentes componentes del petróleo:

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, Fernandez, Bayona, & Solanas, 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 (Fernandez, Grifoll, Solanas, & Albaiges, 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 (HoweGrant, 1996) Los principales componentes se subdividen y purifican en distintas fracciones:

- Fracción saturada: n-alcanos, alcanos ramificados con cadenas alquílicas, las ciclo parafinas 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).

Composición del crudo según su 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 (HoweGrant, 1996). Según el origen, se tienen crudos parafínicos o asfálticos.

Composición de 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) (HoweGrant, 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.

- 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).
- 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(HoweGrant, 1996).

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 & Herrera, 2005).

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 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 integra 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 & Herrera, 2005).

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):

- 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 (Petro & Mercado, 2014).

Antecedentes de 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 (Suarez, 2013).

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.
- 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.

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.

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 (C10-C20) 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 (>C20) son más

difíciles de degradar debido a su (elevado peso molecular) y su baja solubilidad en agua. Los cicloalcanos, por norma general, se degradan más lentamente que la n-alcano y alcanos ramificados(Suarez, 2013).

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 (Suarez, 2013).

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 coleccionar y tratar antes de ser emitidos a la atmósfera. Lo que incurre a costos adicionales.
- Como todos los tratamientos “Ex Situ”, cuando la contaminación es muy profunda, el movimiento de tierra puede requerir costos más altos.

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.

Las borras: Las borras generadas en los tanques y tuberías de la industria del petróleo son residuos que se forman después de largos periodos de tiempo, por sedimentación y aglomeración de compuestos hidrocarbonados, especialmente de cadenas más largas, presentes en el crudo; sólidos, sedimentos (rocas, arena, lodos de perforación, entre otros) y materia orgánica, y agua. Como consecuencia de las aglomeraciones de los hidrocarburos, la 5 emulsión del agua en el crudo y la retención de sedimentos en aquella; los grados API disminuyen, alcanzando valores incluso inferiores a 10 °API, formándose masas densas y viscosas, difíciles de bombear, que se depositan en el fondo de los tanques, reduciendo su capacidad, o generan taponamientos en las tuberías.

Tipos de borras: La clasificación de las borras dependerá directamente del tipo de crudo almacenado en el tanque, a su vez el tipo de crudo dependerá del su composición. En general según La Sociedad Nacional De Minería, Petróleo Y Energía, establece la composición de un crudo es: 83 – 87% de Carbono, 11 – 14% de Hidrogeno, 0 – 5 de Oxigeno, 0 – 6% de azufre, 0 – 0.5% de Nitrógeno y 0 – 0.1% de Compuestos inorgánicos. De acuerdo a esto el crudo se puede clasificar según su composición en:

- Parafínicos: sus compuestos principales son hidrocarburos saturados de bajo peso molecular, lo que permite que sean crudos muy fluidos. Tienen una densidad alrededor de 0,85 kg/L y están por encima de los 31° API. Son los crudos más apetecidos comercialmente y de mayor precio, por su facilidad de ser procesados y por la calidad de los productos obtenidos. Estos crudos producen mayores porcentajes de parafinas, naftas (solventes y gasolinas) y bases de aceites lubricantes que otros crudos.

- Nafténicos: sus compuestos principales son naftenos e hidrocarburos aromáticos; tienen un mayor peso molecular que los compuestos parafínicos y una densidad alrededor de 0,95 kg/L. Están entre los 10 y los 22° API, siendo muy viscosos y de coloración oscura. Generan gran cantidad de residuos en los procesos de destilación, principalmente asfalto.
- Mixtos: están formados por toda clase de hidrocarburos: parafinas, naftenos, hidrocarburos saturados, insaturados y aromáticos, entre otros, encontrándose densidades alrededor de 0,9 kg/L y gravedades API entre los 22° y los 31°.
- Dulce: su contenido de azufre es menor de 0,5%, por lo cual requiere menor costo en su proceso de refinación para producir gasolina. • Agrio: su contenido de azufre es mayor que 1%, necesitando mayor inversión en su procesamiento para retirar este contaminante.

Origen de las borras: Origen del tratamiento de borras A mediados del siglo XX se desarrollaron las primeras investigaciones encaminadas a estudiar el potencial de los microorganismos para biodegradar contaminantes. Este 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.).

Tratamiento de borras: Hay que resaltar que en las borras se distinguen tres fases a saber:

- Fase aceite.
- Fase acuosa.
- Fase sólidos.

Y que además teniendo en cuenta la eficiencia y el grado de especialización, el tratamiento puede ser clasificado en tratamiento primario, secundario y terciario. Dentro de esta clasificación, los métodos aplicados pueden agruparse de la siguiente manera:

- Métodos físicos
- Métodos químicos.
- Métodos térmicos
- Métodos biológicos

De la aplicación de uno o la combinación de estos métodos depende el éxito del tratamiento de la borra. De tal manera que muchos investigadores han concentrado sus esfuerzos en desarrollar estas técnicas con el objetivo único de lograr un tratamiento y

una disposición adecuada de estos desechos con el mínimo impacto posible al medio ambiente y a las personas.

Descripción de los procedimientos desde el transporte, recolección y disposición final de los fluidos aceitosos (borras)

Geopark Colombia es la operadora que se encuentra ejecutando actividades de exploración y perforación en el bloque Llanos 34 ubicado en Villanueva-Casanare.

Figura 1. Ubicación de GeoPark Colombia.



Fuente: Google Maps.

Transporte de borras

Actualmente en la operación Geopark ubicada en llanos 34, se realiza por medio de vehículos carrotanques de 180 barriles, con el fin de brindarle participaciones activas a las microempresas de transporte de los municipios aledaños a este campo, como lo es

Villanueva, Aguazul, Tauramena y Yopal. En la parte económica y social en el departamento del Casanare se mantiene estable el índice de empleo debido a esta actividad.

Las solicitudes de vehículos varían diariamente debido a las operaciones internas que se realicen en campo, se tiene un promedio de 3 vehículos para hacer tratamiento de aproximadamente 540 barriles diarios. En ocasiones cuando se presenta contingencias en campo se tiene herramienta de almacenamiento como los son los cash tank y frack tank. Para tener confiabilidad y viabilidad en el transporte, los conductores deben tener distintas competencias. A continuación, las relaciono:

- Licencia de conducción C3
- Curso vigente de manejo defensivo
- Curso de sustancias peligrosas
- Cursos de primeros auxilios.

Recolección de fluidos aceitosos (borras)

Para realizar el cargue de estos residuos se deben realizar análisis fisicoquímicos para concluir que tipo de residuos se va a enviar a las plantas externas para su tratamiento. A continuación, relaciono los parámetros que debe tener un fluido aceitoso para ser borra:

Tabla 1. Características fisicoquímica de la borra.

PH	%LODO	CRUDO Y DERIVADOS (PORCENTAJE)
<6,8	<1%	% CRUDO: 70 % AGUA: 10 % SEDIMENTOS: 20

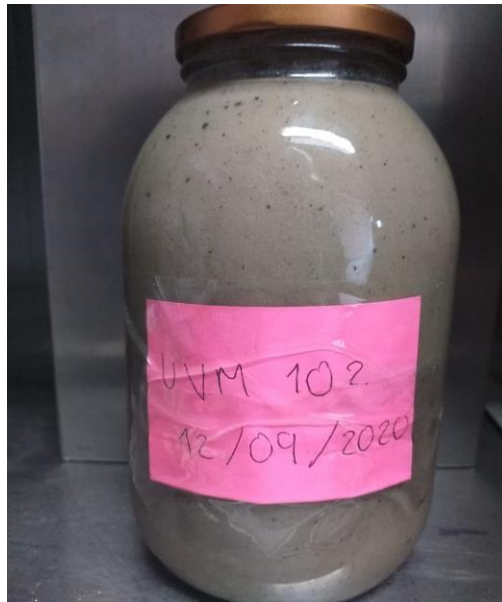
Fuente: Propia.

Tratamiento y disposición final

Se hace caracterización físico química, como se evidencia en la tabla 1. Las muestras se realizan en la planta de tratamiento de Tececor ubicada en San Jose de Buduy en Aguazul- Casanare.

Esta investigación se realiza con las borras provenientes de un crudo liviano, fueron generadas en las operaciones de Geopark de Llanos 34, se hizo recolección en un carrotanque con capacidad de 180 barriles para entrega a la planta de tratamiento anteriormente nombrada.

Figura 3. Muestra de borras.



Fuente: Propia.

El descargue se realiza en piscina de almacenamiento donde se inicia el tratamiento, aplicando bentonita y cal con el fin de realizar la separación de los sedimentos, teniendo en cuenta la composición de tierra, crudo y agua, para iniciar el proceso de decantación y separación de sedimentos el tiempo aproximado es de 15 días.

Se procede a hacer traslado a los tanques de almacenamiento API, donde se separa los fluidos y los sedimentos. Los fluidos recuperados inician un proceso de deshidratación con el fin de clarificar las sustancias como lo es el crudo.

Figura 5. Muestra de separación de la composición.



Fuente: Propia.

Figura 7. Tanques de almacenamiento.



Fuente: Propia.

Inicialmente se va a realizar un análisis microbiológico de materia orgánica, donde se esparce los sedimentos que se descartaron durante el proceso, iniciando un cultivo de bacterias aerobias, para ser mezcladas con la materia orgánica. Este proceso se realiza mediante pilas de biorremediación.

Figura 9. Proceso de cultivo de bacterias aerobia.



Fuente: Propia.

El análisis microbiológico de las muestras de materia orgánica, se realiza durante un periodo de 72 horas, después de haber sido inoculadas las muestras, tiempo durante el cual se observa y analiza el crecimiento y morfología de colonias bacterianas y de hongos, con el fin de agilizar los procesos de biorremediación.

El muestre se realiza por medio del método de cuarteo donde se dividen los residuos en cuatro partes para llevar la trazabilidad y el control al momento del tratamiento.

Al esparcir la mezcla de materia orgánica, las borras y las bacterias aerobias se debe estar removiendo periódicamente ya que las bacterias necesitan de oxígeno para iniciar la

degradación. Esta remoción se recomienda hacerla cada 5 días aproximadamente con el fin de homogenizar todas las sustancias y facilitar los procesos aerobios de las bacterias. Cuando se inicia la degradación se utilizar mezclas de macronutrientes de manera que sea 40% materia orgánica y 60% de fosfatos. El tiempo de tratamiento de las borras en tiempo de verano es de 3 meses y en tiempo de invierno es de 6 meses.

Análisis de la investigación biorremediación de suelos contaminados por residuos industriales

El impacto ambiental de la contaminación de suelos contaminados por residuos industriales 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.

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.

Ventajas de la biorremediación

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

Desventajas de la biorremediación

- 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.

- 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.

Deducciones de este análisis

Tanto los tratamientos ex-situ como in-situ de las borras 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 terrestre, pero se evita tener contingencias ambientales. El tratamiento in situ es el más recomendado para fluidos menos densos con parámetro de pH menos a 7 según la escala. 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.

Modelo para Biorremediación de fluidos contaminados: 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.

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.

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.

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”.

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.

Podemos predecir que aumenta la actividad enzimática, lo cual lleva a que el proceso de Biorremediación comience a arrojar resultados óptimos.

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.

Socialización con la comunidad

Después de realizar el proceso de transporte, recolección y disposición final de los fluidos aceitosos, se hizo la divulgación a la comunidad de todas las etapas que se tienen en cuenta para dar el tratamiento adecuado. En la socialización de la investigación se encontraron alternativas favorables para la comunidad, que a continuación nombrare:

- Participación a microempresas de la comunidad.
- Fuentes de empleo a personal calificado y no calificado de las comunidades aledañas.
- Apoyo social en conocimientos ambientales.

Figura 11. Divulgación de la investigación.



Fuente: Propia.

El compostaje como estrategia de biorremediación

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 compostaje 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.

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.

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.

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 óptimas 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).
- 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.

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 mesófilos 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 reinviden el mantillo y descomponen la celulosa.
- Termofílico: Cuando se alcanza una temperatura de 40°C, los microorganismos termofílicos actúan transformando el nitrógeno en amoníaco 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.

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.

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.

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.

Conclusiones

El desarrollo sostenible necesita una orientación que le dé un enfoque de gestión, que implique innovación y desarrollo de nuevas tecnologías para el tratamiento y la disposición final para los residuos generados en la industria de hidrocarburos.

Vemos que la biorremediación es una alternativa atractiva y prometedora a las tradiciones técnicas para la remediación de los compuestos que contaminan fluidos 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 son una buena alternativa para darla a conocer los tratamientos y las técnicas a las empresas encargadas de remediar la contaminación, siendo un enfoque los diferentes residuos y los parámetros que entregan.

Se puede implementar el compostaje en los diferentes municipios aledaños a Llanos 34. Técnicas y tratamientos como remediación, con el fin de tener bases al momento que ocurra alguna contingencia y/o evento de contaminación por hidrocarburos ya que en estos sectores de la industria petrolera están expuestos a daños ambientales por las actividades de perforación y producción.

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

Es 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), Corporinoquia y en la Evaluación de Impactos Ambientales (EIA) sean incluidos la biorremediación como una técnica amigable al ambiente.

Capacitar a las empresas contratista de Geopark 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 borras en la zona que comprende el boque Llanos 34, ya que en estos municipios hay actividades exploración y explotación de los hidrocarburos.

Lo residuos generados por industrias petroleras en especial los fluidos aceitosos como lo son las borras; 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 de los fluidos. (Humedad, pH, temperatura). Para definir el tratamiento apropiado es necesario un estudio previo de los parámetros y el nivel de contaminación.

Divulgar el uso de la tecnología de biorremediación como una alternativa para el tratamiento de fluidos contaminados por hidrocarburos en la zona que comprende el boque Llanos 34, son las alternativas para que la comunidad se encuentre enterada de los tratamientos que se realizan.

Explorar este tipo de biorremediación en fluidos 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.

Bibliografía

- Alexander, M. (1999). *Biodegradation and Bioremediation*. Ed Academy Press. 2da edición. <https://www.elsevier.com/books/biodegradation-and-bioremediation/alexander/978-0-08-091637-8>
- Casellas, M., Fernandez, P., Bayona, J., & Solanas, A. (1995). *Bioensayo Químico dirigido al análisis de componentes tóxicos en partículas urbano*.
- Fernandez, P., Grifoll, M., Solanas, A., & Albaiges, J. (1992). *Ensayo dirigido al análisis químico de componentes tóxicos en sedimentos costeros*. Revista Environmental Science Technology.
- HoweGrant, M. (1996). *Petróleo*. Enciclopedia de la tecnología química. 4th Ed. Wiley Inerscience publication. New York.
- Müller. (1987). *Hidrocarburos en el medio ambiente de agua dulce. Revisión de la literatura*. Editorial Fur Hydrobiologie.
- Petro, P., & Mercado, G. (2014). *Biorremediación de suelos contaminados por derrame de hidrocarburos derivados del petróleo en Colombia*. Facultad de Ingenierías y Arquitectura. Universidad San Buenaventura sede Cartagena, Colombia.
http://bibliotecadigital.usb.edu.co/bitstream/10819/2354/1/Biorremediacion%20de%20suelos%20contaminados%20por%20derrames_Piedad%20Petro%20Cardona_USBCTG_2014.pdf
- Prince, R. (1993). *Biorremediación en los ecosistemas marinos*. Revista Microbil.
- Rossini, F. (1960). *Hidrocarburos de petróleo*. Revista Chemical Education, 37(554–561).

Speight, J. (1991). *La química y tecnología del petróleo*. Ed. Marcel Dekker. New York.

Suarez, R. (2013). *Guía de métodos de biorremediación para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos (Tesis especialización)*. Universidad Libre de Bogotá, Colombia.

[https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/10607/TRABAJO_FINAL cd.pdf?sequence=1](https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/10607/TRABAJO_FINAL_cd.pdf?sequence=1)

Vargas, P., Cuellar, R., & Dussan, J. (2004). *Biorremediación de residuos petroleros*. Facultad de Ciencias. Universidad de los Andes, Colombia.

<http://hipotesis.uniandes.edu.co/hipotesis/images/stories/ed04pdf/Biorremediacion.pdf>

Vasallo, J., & Herrera, D. (2005). *Seminario de hidrocarburos*. Escuela Superior de Salud y Ambiente. Universidad Nacional del Comahue, Argentina.

Volke, T., & Velasco, A. (2020). *Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes*.

Instituto Nacional de Ecología, México.

https://www.researchgate.net/publication/31851896_Tecnologias_de_remediacion_para_suelos_contaminados_T_Volke_Sepulveda_JA_Velasco_Trejo