

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

**BIORREMEDIACIÓN DE HIDROCARBUROS: EVALUACIÓN DE
TECNOLOGÍAS Y REQUERIMIENTOS PARA SU APLICACIÓN**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN PETRÓLEOS**

WILDER ANDRÉ MÉNDEZ ROMÁN

wilder.mendez@epn.edu.ec

DIRECTOR: Ph D. JOSÉ LUIS RIVERA

jose.riverap@epn.edu.ec

Quito,2021

DECLARACIÓN

Yo Wilder André Méndez Román declaro, bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Wilder Méndez

WILDER ANDRÉ MÉNDEZ ROMÁN

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Wilder André Méndez Román, bajo mi supervisión.

Ph. D. José Luis Rivera

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios Padre por colmarme de Bendiciones y Sabiduría durante toda mi vida. Este importante logro es el resultado de responsabilidad, amor al estudio e infinita fe que él me concedió.

Quiero agradecer a mi tutor José Luis Rivera, quien con sus conocimientos me brindó orientación, consejos y apoyo durante la realización de este trabajo de investigación.

También, agradezco a mis querido padres, que jamás descuidaron mi educación y con valentía, tesón, dedicación y amor me respaldaron y confiaron siempre en mis capacidades, no solo como estudiante, sino como ser humano capaz de afrontar la vida con principios y valores, que se acrecentaron y fortalecieron.

Una gratitud especial para mis abuelos, tías y demás familiares por sus consejos y envolver mi vida de cariño y cuidado. Gracias familia por estar siempre junto a mí. Este logro es para ustedes.

DEDICATORIA

“Solo con Dios guiando el camino encontrarás la fuerza, el coraje y valor para seguir adelante y honrarle con tu éxito. “

A ti Madre querida por tu optimismo y cariño, sin quien yo nada sería; y a mi Padre sostén y guía de mis proyectos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIA.....	V
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
RESUMEN.....	10
ABSTRACT.....	11
INTRODUCCIÓN	12
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.2. ALCANCE	13
1.3. OBJETIVOS.....	13
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	13
1.3.2. OBJETIVO ESPECÍFICOS	14
1.4. JUSTIFICACIÓN	14
MARCO TEÓRICO	15
2.1. CONTAMINACIÓN AMBIENTAL.....	15
2.1.1. Contaminación.....	15
2.1.2. Tipos de Contaminación	16
2.2. CONTAMINACIÓN POR LA INDUSTRIA PETROLERA	17
2.2.1. Hidrocarburo	17
2.2.2. Composición del hidrocarburo	17
2.2.3. Clasificación de Hidrocarburos	18
2.2.4. Daños ambientales por la actividad hidrocarburífera.....	19

2.3. Marco Legal de protección ambiental	19
2.3.1. Medio Ambiente.....	20
2.3.2. Importancia de la protección ambiental	20
2.3.3. Conferencias sobre la protección ambiental	20
2.4. Responsabilidad ambiental	21
2.4.1. Responsabilidad ambiental en el Ecuador	21
2.5. Gestión ambiental	22
2.5.1. Gestión Ambiental y su papel en el Ecuador	22
2.6. Tecnologías de remediación	24
2.6.1. Clasificación de tecnologías de remediación	24
2.7. Biorremediación	26
2.7.1. Clasificación de tecnologías de Biorremediación	26
METODOLOGÍA	29
3.1. Tipo de Estudio.....	29
3.2. Obtención de información	29
3.3. Discusión y Análisis de casos de biorremediación.....	34
3.4. Análisis de parámetros de los respectivos casos	34
3.4.1. Determinación de parámetros principales en la biorremediación ..	34
3.5. Análisis de lineamientos de la biorremediación.....	35
3.6. Análisis de ventajas y desventajas de la biorremediación.....	35
DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	36
4.1. Análisis de Casos de Biorremediación	36
4.1.1. Discusión sobre la biorremediación eficaz	41
4.2. Parámetros de la biorremediación	42
4.2.1. Elección de parámetros	47
4.3. Justificación de Parámetros.....	48

4.3.1. Análisis de organismos.....	49
4.3.2. Análisis de nutrientes	50
4.3.3. Análisis de tipo de contaminante	51
4.3.4. Temperatura	52
4.3.5. pH.....	53
4.3.6. Humedad	54
4.3.7. Solubilidad.....	55
4.3.8. Análisis de características del suelo.....	55
4.4. Selección de los parámetros de biorremediación.....	57
4.5. Lineamientos para desarrollar una biorremediación eficaz	58
4.6. Ventajas de la biorremediación	60
4.7. Desventajas de la biorremediación	62
CONCLUSIONES	64
5.1. Conclusiones.....	64
6. Bibliografía	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química del hidrocarburo Fuente: Speight (2016)	18
Tabla 2. Títulos del COA Fuente: Martínez (2019)	23
Tabla 3. Documentos de Biorremediación usados en el trabajo	30
Tabla 4. Cuadro comparativo de casos de aplicación de biorremediación	36
Tabla 5. Parámetros de eficiencia en casos de aplicación de biorremediación	42
Tabla 6. Factores Identificados de los casos	45
Tabla 7. Parámetros elegidos y descartados	48
Tabla 8. Nutrientes esenciales.....	51
Tabla 9. Parámetros de eficiencia para aplicación de biorremediación	58
Tabla 10. Lineamientos para biorremediación	59
Tabla 11. Ventajas de la Biorremediación	61
Tabla 12. Desventajas de la Biorremediación.....	63

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Esquema de la disposición en el espacio de los agregados constituyentes de un suelo (Viñas, 2005).....	57
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Porcentaje de éxito de casos de biorremediación	40
Figura 2. Porcentaje de Parámetros en función de casos de biorremediación.....	47

RESUMEN

El presente trabajo es la evaluación de diferentes técnicas y métodos de biorremediación para determinar cuáles son los parámetros, características y requerimientos que hacen que la tecnología sea aplicada exitosamente. Para lo cual se realizó una recopilación bibliográfica de documentos científicos que se basan en la optimización de procesos de biorremediación en suelos con presencia de hidrocarburos. Se parte del análisis de 13 casos de aplicación de biorremediación de hidrocarburos, para determinar sus características principales y establecer las ventajas y desventajas de la tecnología. Por otra parte, se realizó una evaluación de los casos para identificar los parámetros que tienen influencia directa en el desarrollo de la biorremediación. Obteniendo como resultados que los organismos, nutrientes, características del contaminantes, temperatura, pH, solubilidad y características del suelo son factores que alcanzando su optimización pueden aumentar la eficiencia de este tipo de remediación ambiental. De tal manera, se concluye que la biorremediación es una alternativa para tratar zonas contaminadas por hidrocarburos y puede aumentar sus tasas de éxito conociendo sus requerimientos.

Palabras clave: Biorremediación, contaminación, gestión ambiental, parámetros principales de biorremediación, problemas ambientales.

ABSTRACT

The present work is the evaluation of different bioremediation techniques and methods to determine which are the parameters, characteristics and requirements that make the technology to be applied successfully. For this purpose, a bibliographic compilation of scientific documents based on the optimization of bioremediation processes in soils with presence of hydrocarbons was carried out. The starting point was the analysis of 13 cases of hydrocarbon bioremediation application, to determine their main characteristics and establish the advantages and disadvantages of the technology. On the other hand, an evaluation of the cases was carried out to identify the parameters that have a direct influence on the development of bioremediation. The results showed that organisms, nutrients, contaminant characteristics, temperature, pH, solubility and soil characteristics are factors that, if optimized, can increase the efficiency of this type of environmental remediation. Thus, it is concluded that bioremediation is an alternative to treat areas contaminated by hydrocarbons and can increase its success rates by knowing its requirements.

Key words: Bioremediation, contamination, environmental problems, environmental management, main bioremediation parameters.

INTRODUCCIÓN

La contaminación generada por las diferentes actividades hidrocarburíferas en el ansia de explotar recursos y obtener beneficios, ha deteriorado el ambiente con riesgos para la salud y problemas al ecosistema (Álvaro et al., 2017). La principal forma de contaminación por crudo es debido a derrames que son el resultado de accidentes durante la explotación, transporte o comercialización de hidrocarburo (Jiménez, 2020). Con ayuda del desarrollo técnico y tecnológico se permite aprovechar de manera eficiente los recursos naturales. De la misma manera, los avances para remediar zonas vulneradas con contaminación son notables y presentan avances continuos. Las normativas legales de los estados y participación de organizaciones mundiales con fin del cuidado ambiental han tomado mayor acción para promover prácticas proactivas con el medio ambiente involucrando a los sectores hidrocarburíferos. Por lo tanto, se origina la necesidad de prevenir o remediar los problemas ambientales, y con ayuda de la tecnología se tiene una solución viable.

La biorremediación consiste en usar microorganismo para generar degradación natural del crudo presente en el suelo (Alexander, 1999). La esencia de la biorremediación es solucionar la contaminación, pero en la práctica puede ser un proceso complicado. Ya que, las condiciones de una zona de tratar nunca van a ser idénticas, estas tienden a cambiar con respecto a otras. Además, la carencia de conocimiento hace la tarea de aplicar y desarrollar más compleja algunos de estos métodos.

La investigación se enfocó en identificar, analizar y describir los parámetros o factores que intervienen en que el proceso de aplicación de la biorremediación sea eficaz, a través del análisis de casos específicos sobre contaminación de hidrocarburos que presentan diferentes características.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los derrames de petróleo son la principal forma de contaminación que presenta el medio ambiente, dañando ecosistemas y afectando la salud. Actualmente para asegurar la calidad medio ambiental se han mejorado las normativas legales para establecer límites sobre los efectos de la industria hidrocarburífera que el ecosistema puede soportar, así mismo como de reparaciones ambientales que están obligadas en caso de accidentes o daños involuntarios. Para eliminar la cantidad de hidrocarburo que existe en una zona, se presenta la biorremediación que usa la estimulación de organismos para fomentar la degradación natural del crudo. La tecnología presenta dificultades por la extensión de información que se debe comprender, con el fin de plantear un proceso óptimo para alcanzar los mejores resultados, de tal manera, dominar conocimientos sobre la biorremediación se vuelve una necesidad. Es así, que se realiza una evaluación de diferentes tecnologías de biorremediación y sus requerimientos para establecer cuáles son los parámetros principales que afectan a la biorremediación para obtener un mejor proceso.

1.2. ALCANCE

Las aplicaciones de biorremediación se enfocan en problemas generados por contaminación de la industria hidrocarburífera, es decir zonas contaminadas con crudo, enfocándose en aplicaciones novedosas y que aporten conocimientos.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar factores, características y parámetros que permitan un proceso de biorremediación exitosa.

1.3.2. OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Analizar las alternativas de manejo y tratamiento de suelo contaminado con hidrocarburos.
- Diferenciar ventajas y desventajas que aplican en el uso de la biorremediación para la remediación de problemas ambientales en la industria de petróleo.
- Determinar los parámetros principales que depende la biorremediación para un buen desempeño.
- Establecer lineamientos para la aplicación de biorremediación.

1.4. JUSTIFICACIÓN

La eliminación de contaminación generada por hidrocarburos es un problema ambiental que requiere tratamiento, apareciendo como alternativa la biorremediación. Por lo tanto, manejar los parámetros y requerimientos que influyen en el proceso de biorremediación, puede mejorar el desempeño al momento de ejecutar proyectos sobre este tipo de remediación ambiental. El desarrollo del presente trabajo es importante porque se centra en analizar y evaluar aplicaciones de biorremediación, con el fin de establecer sus parámetros y requerimientos. Los resultados obtenidos son útiles para estudiantes y profesionales que requieran información sobre aspectos característicos de la biorremediación de hidrocarburos en suelos.

MARCO TEÓRICO

2.1. CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

2.1.1. Contaminación

La contaminación se la entiende como sustancias no deseadas que se encuentran en el agua, aire o suelo, las cuales ocasionan daños y deterioro a su calidad (Encinas, 2011). Una zona puede estar contaminada por diferentes agentes, los cuales pueden ser físicos, químicos, biológicos, etc.

“La contaminación del aire, agua y la del suelo se encuentran relacionadas entre sí y no se pueden separar, los contaminantes tienen la facilidad de pasar de un medio a otro.” (Encinas, 2011). Es decir, existe una interrelación entre estos factores cuando se trata sobre contaminación. Los contaminantes pueden solo afectar un medio, pero por procesos específicos, se pueden mover a otros, ya sea agua, aire o suelo.

Según Ruiz (1999), los contaminantes se clasifican en dos tipos los cuales son:

- Naturales
- Artificiales

Los contaminantes naturales se originan por eventos naturales como erupciones volcánicas, incendios forestales, erosión del suelo, etc. Mientras que, los contaminantes artificiales tienen su origen por las actividades industriales que realiza el ser humano, como quema de combustibles, extracción de combustibles fósiles, explotación de recursos naturales, etc. Poseen la característica que después de ser liberados al medio ambiente pueden sufrir de reacciones químicas, lo que conlleva a elevar los niveles de contaminación a mayor medida. Lo alarmante que direcciona a la contaminación a ser un problema grave, es que no solo puede afectar la calidad de los entornos naturales sino también la salud de las personas, ya que, el medio ambiente cuenta con una relación propia con los organismos que se benefician de ella (Ballester, 2005).

2.1.2. Tipos de Contaminación

Entre los diferentes tipos de contaminación se destacan la del suelo, aire y agua, ya que estos poseen un soporte único para la vida (Simbaña, 2016). La contaminación se puede clasificar en:

- Contaminación atmosférica
- Contaminación del suelo
- Contaminación del aire

2.1.2.1. Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica se define como, “la presencia en el aire de materias o formas de energía que impliquen riesgo, daño o molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza” (Ley General del medio ambiente, 1972). Se produce por procesos naturales como erupciones volcánicas o incendios forestales y por artificiales (Aránguez et al., 1999).

2.1.2.2. Contaminación del suelo

El suelo es un recurso natural, en donde se asientan todas las actividades terrestres; es la conformación y agrupación de varios tipos de materias y minerales en donde se desarrollan organismos vegetales y animales (Encinas, 2011). Este recurso puede ser vulnerado por las actividades industriales como derrames de sustancias nocivas, filtración de agua por sustancias nocivas, etc.

2.1.2.3. Contaminación del agua

El agua es un líquido incoloro, inodoro e insípido en estado puro, el cual se encuentra presente en forma líquida en condiciones de temperatura estándar (Fernández, 2012; Lima, 2011; Ordoñez, 2012). Los contaminantes más comunes en la industria son los agentes químicos, metales pesados, derrames de hidrocarburos, etc. (Encinas, 2011).

2.2. CONTAMINACIÓN POR LA INDUSTRIA PETROLERA

Con el desarrollo tecnológico constante, la humanidad ha adquirido la capacidad de poder extraer los recursos no renovables a gran escala, es decir industrializando los procesos. Los hidrocarburos en la actualidad se han convertido en un recurso indispensable, por lo que han llegado a ser una de las materias primas altamente demandadas a nivel mundial.

Pero de la misma manera que la actividad petrolera industrializada ha logrado mejorar su capacidad productiva a gran medida, también ha generado un impacto ambiental de las mismas proporciones o mayores. Los impactos de la contaminación por la extracción de crudo se pueden evidenciar en el deterioro de los ecosistemas y especies animales; puede afectar también a la salud del ser humano. Los principales factores de contaminación por hidrocarburo pueden ser varios que van desde derrames por accidentes, mal manejo de instalaciones, deterioro de instalaciones, etc.

Por lo tanto, comprender lo que es el hidrocarburo, sus componentes, el impacto ambiental al extraer el recurso y los efectos adversos al medio ambiente y al ser humano se vuelve la primera acción para poder analizar y tomar medidas que contrarresten los efectos negativos de dicho recurso.

2.2.1. Hidrocarburo

Los hidrocarburos se definen como la mezcla de compuestos, que en su mayor porcentaje de composición se encuentran unidos átomos de carbono e hidrógeno (Viñas, 2005). Son el resultado de la descomposición de materia orgánica, sometidos a altas temperaturas, presiones y un periodo largo de tiempo equivalente a millones de años (Viñas, 2005; Speight, 2016; Speight, 2006).

2.2.2. Composición del hidrocarburo

Los hidrocarburos están constituidos, no solo por hidrógeno y carbono, sino que presentan otros tipos de elementos. Según Speihgt (2016), por lo general un petróleo común podría contener la siguiente mezcla de compuestos.

Tabla 1. Composición química del hidrocarburo Fuente: Speight (2016)

Compuesto	Porcentaje
Carbono	83- 87 %
Hidrógeno	10- 14 %
Azufre	0.05- 6 %
Nitrógeno	0.1- 2 %
Oxígeno	0.05- 1.5 %
Metales Pesados	Menores a 1000 ppm

Elaborado por: Méndez, 2021

2.2.3. Clasificación de Hidrocarburos

Según Speight (2016), el crudo se puede clasificar por su:

- Composición Química
- Gravedad API
- Contenido de Azufre

2.2.3.1. Por su composición química

Se refiere a la mezcla de compuestos que existen en el crudo. Los hidrocarburos según esta clasificación son (Speight, 2016):

- Parafinas. – Poseen cadenas lineales o ramificadas.
- Asfáltica o nafténica. –Presentan ciclos en su estructura.
- Aromáticos. - Presentan anillos de benceno.

2.2.3.2. Por su gravedad específica

En esta clasificación el hidrocarburo se lo referencia por la densidad que posee, se clasifica en (Speight, 2016):

- Liviano. - Posee una gravedad API mayor a 31.1 °API
- Mediano. - Posee una gravedad API entre 22.3 y 31.1 °API
- Pesado. - Posee una gravedad API entre 10 y 22.3 °API
- Extra Pesado. - Posee una gravedad API menores a 10 °API

2.2.3.3. Por su contenido de Azufre

En esta clasificación se diferencia por el contenido de azufre que presenta en composición química el hidrocarburo, el cual puede ser (Speight, 2016):

- Dulce. - El hidrocarburo posee menos de 0.5% de contenido de azufre.
- Medio. - El hidrocarburo presenta entre 0.5 y 1.5% de contenido de azufre.
- Agrio. - El hidrocarburo posee más de 1.5 contenido de azufre.

2.2.4. Daños ambientales por la actividad hidrocarburífera

Los efectos provocados por la contaminación de hidrocarburos se pueden observar a corto o largo tiempo, es decir que el daño ambiental puede aparecer inmediatamente o al pasar los años; según Velásquez (2017) un daño a corto plazo es “de características graves, pues generalmente involucra la mortandad masiva de especies”. Poder remediar el daño ambiental se vuelve una tarea difícil (Simbaña, 2016). Los hidrocarburos presentan efectos negativos al ecosistema y a la salud de las personas, como:

- Toxicidad. - Genera alteraciones en las estructuras celulares de los organismos vivos, lo que provoca enfermedades cancerígenas entre otras.
- Alteraciones medio ambientales. - Producen alteraciones en el medio ambiente por la introducción de contaminantes que naturalmente no se pueden manejar. Pérdida de especies nativas, ciclos naturales afectados, etc.
- Alteración de suelo y agua. – Cambios en el pH, salinidad, etc.

2.3. Marco Legal de protección ambiental

Para abordar el marco de la protección ambiental se debe tener en claro la importancia de proteger el medio ambiente y en consecuencia la responsabilidad y la gestión ambiental. Además de comprender el papel de los gobiernos para garantizar los derechos del medio ambiente, que se reflejan en disposiciones jurídicas, establecidas en códigos, leyes y en la propia constitución.

2.3.1. Medio Ambiente

El concepto de medio ambiente en las últimas décadas ha cambiado conforme a las actividades humanas. Por lo tanto, se puede observar que el ambiente ha sido un tema que siempre se encuentra en constante debate. Una de las definiciones que describe correctamente al medio ambiente, es la de Jollivet y Pave (1992), que indica que “es el conjunto de medio naturales o artificiales de la ecosfera donde el hombre se ha instalado; los medio que él explota y ordena y el conjunto de medios no antropizados necesarios para su supervivencia”.

2.3.2. Importancia de la protección ambiental

La importancia de proteger y preservar al medio ambiente nace porque el ser humano ha tenido un impacto enorme en el medio ambiente, cambiando, alterándolo y reconstruyéndolo. Por lo tanto, si el entorno que rodea al hombre se encuentra alterado con agentes contaminantes este también puede involucrar daños directos o indirectos a la naturaleza y a las personas (Garzón, 2017). Es decir, la importancia de proteger el medio ambiente es la explotación de los recursos naturales minimizando el impacto por dichas actividades.

2.3.3. Conferencias sobre la protección ambiental

En las últimas décadas, el ser humano ha comenzado a tener conciencia del entorno en que se desarrolla. Entre las conferencias se destacan las que se realizó en Estocolmo y la de Río de Janeiro por parte de la Organización de las Naciones Unidas, porque es aquí en donde, se logró generar un interés y participación de muchas naciones, así como del público en general. Además de establecer principios que abordaban a la naturaleza como un factor importante para el desarrollo.

2.3.3.1. Conferencia sobre el medio Humano, Estocolmo

Esta conferencia tuvo lugar en junio de 1972, en donde se invitaron a países en vía de desarrollo, como desarrollados, realizada por la ONU en Estocolmo. Se trató el medio ambiente como sujeto que puede beneficiarse de derechos como el ser humano. Se comprometió a realizar reformas legislativas, con el fin de garantizar la salud del medio ambiente (Cabrera, 2001).

2.3.3.2. Conferencia sobre Medio Ambiente y Desarrollo

La conferencia que tuvo lugar en Río de Janeiro en el año de 1992, en donde se reafirmó la importancia del medio ambiente, sumando el desarrollo sostenible. Según, Cabrera (2001) afirma que “la Declaración de Río, establece que los seres humanos constituyen el centro de las preocupaciones ambientales”. Dando lugar, que el problema es el hombre, pero también puede ser la solución, siempre y cuando tome conciencia, reflejándose en actos y medidas.

2.4. Responsabilidad ambiental

La responsabilidad ambiental es la respuesta de actores al impacto de las actividades que explotan los recursos y modifican al medio ambiente. Según la Comisión Europea (2000) define “que la responsabilidad ambiental tiene como objeto obligar al causante de daños al medio ambiente (el contaminador) a pagar la reparación de tales daños”.

2.4.1. Responsabilidad ambiental en el Ecuador

La marea ambiental que surge de las conferencias sobre protección ambiental de Estocolmo y Río de Janeiro, también han sido parte fundamental para que el Ecuador tome medidas para garantizar los derechos de sus recursos naturales. A lo largo de la historia del Ecuador, las Constituciones que toman un papel en el cuidado ambiental son las de 1979, 1998 y 2008. La responsabilidad del ambiente es notable por parte del Ecuador en la evolución de su Constitución.

2.4.1.1. Constitución de 1979

La protección del ambiente en el Ecuador toma relevancia en la constitución de 1979, donde se añade derechos que resguardan a la naturaleza, generando una parcial protección sobre el medio ambiente (Matute, 2016; Mila & Yáñez, 2020).

2.4.1.2. Constitución de 1998

Según Mila & Yáñez (2020) sobre la Constitución de 1998, “se amplió el catálogo de artículos al ambiente y sus recursos, dentro de los cuales se destacan la sección específica para el ambiente en el Título III” (pg. 8). Otros artículos importantes van desde el 86 al 91, que en resumen manifiestan que el Estado protegerá el derecho de la población a vivir en un medio ambiente sano y ecológicamente equilibrado (Paredes, 2014).

2.4.1.3. Constitución de 2008

En la constitución 2008 es donde se puede mencionar que el ambiente en el Ecuador toma parte como sujeto de derechos, añadiendo conceptos sobre el buen vivir; se establece relaciones de un ambiente sano y el desarrollo ecológicamente sustentable con las poblaciones humanas (Mila & Yáñez. 2020; Paredes, 2014; Murray, 2020).

2.5. Gestión ambiental

La gestión ambiental toma un papel de importancia para mitigar el impacto ambiental. Taylor (1994), determina que la gestión “es el arte de saber lo que se quiere hacer y a continuación, hacerlo de la mejor manera y por el camino más eficiente.” Aplicando esta definición al cuidado ambiental, se puede llegar a que la gestión ambiental es lograr un manejo adecuado y una calidad ambiental que brinde las mejores condiciones para el ser humano. Para cumplir una buena gestión ambiental se necesita de controles por parte de organizaciones especializadas.

2.5.1. Gestión Ambiental y su papel en el Ecuador

En el Ecuador la normativa que regula y gestiona la calidad ambiental es el Código orgánico ambiental y la institución que se encarga de la implementación y regular el cumplimiento del COA es el Ministerio de Ambiente (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2021).

El Código orgánico ambiental (COA), al ser la normativa que se encarga de la gestión ambiental en el Ecuador, aborda diferentes puntos tratados en forma de libros. En la tabla 2 se presenta una descripción general de los temas que se tratan en cada libro.

Tabla 2. Títulos del COA Fuente: Martínez (2019)

Libros del Código Orgánico Ambiental	Descripción
Libro I: Régimen Institucional	Se basan en ordenar el régimen institucional, con el fin de integrar y articular organismos y entidades del estado con normas e instrumentos de gestión (COA, 2017).
Libro II: El Patrimonio Natural	Se base en regular el patrimonio natural enfocándose en su conservación y su uso sostenible, entre los que se encuentran las áreas protegidas, flora, fauna, recursos genéticos, etc. (COA, 2017).
Libro III: La calidad ambiental	Como lo menciona el artículo 158 del COA, el libro calidad ambiental, regula los instrumentos, procedimientos, mecanismos, actividades, responsabilidades y obligaciones públicas y privadas en materia de calidad ambiental (COA, 2017).
Libro IV: El cambio Climático	El libro en cuestión establece normativas legales para los temas sobre cambio climático, con el fin de establecer puntos para el manejo, control, planificación, etc. (COA, 2017).

Libro V: La zona marino costera	Presenta la normativa que regula las zonas marítimas del Ecuador, para lograr la conservación restauración, protección y aprovechamiento de los recursos y biodiversidad marina (COA, 2017).
Libro VI: Los incentivos ambientales	Presenta normativa para el uso, aplicación y desarrollo para impulsar incentivos ambientales, con el fin de conservar, usar, promover el manejo sostenible y restauración de los ecosistemas (COA, 2017). En fin, los incentivos son estímulos para cambiar el panorama que se tiene al ambiente (Martínez, 2019)
Libro VII: La reparación integral de daños ambientales	Presenta las normativas que determina la reparación de los daños ambientales (COA, 2017).

Elaborado por: Méndez, 2021

2.6. Tecnologías de remediación

Las tecnologías de remediación se entienden como operaciones o métodos que se realizan para alterar la composición de una sustancia peligrosa o contaminantes (Deuren et al., 1997).

2.6.1. Clasificación de tecnologías de remediación

Las tecnologías de remediación se las puede separar en 3 ramas, según Volke & Velasco (2002):

- Estrategia de Remediación
- Lugar del proceso de Remediación
- Tipo de tratamiento

2.6.1.1. Por Estrategia de remediación

Son estrategias simples que se aplican para remediar daños, se caracterizan porque se pueden usar en conjunto o solas. Se dividen en (Volke & Velasco, 2002):

- Destrucción o modificación de los contaminantes. - Altera la estructura de los contaminantes.
- Extracción o separación. - Los agentes contaminantes se los separa del área inicial para ser tratados.
- Aislamiento o inmovilización del contaminante. - Los contaminantes son tratados por métodos físicos o químicos.

2.6.1.2. Por el Lugar del proceso de remediación

Esta clasificación depende del lugar en donde se trate los agentes contaminantes, siendo (Volke & Velasco, 2002):

- In situ. - Los métodos se realizan en la zona inicial de contaminación, no requiere ninguna traslación.
- Ex situ. - Se requiere de excavación, dragado o cualquier otro proceso para remover y trasladar.

2.6.1.3. Por el Tipo de tratamiento

Se basa en la forma en que se va a realizar el tipo de tratamiento para la zona contaminada, se subdivide en:

- Tratamientos biológicos. - Usa a organismos, para transformar o remover agentes contaminantes.
- Tratamientos fisicoquímicos. - Usa propiedades físicas o químicas de los contaminantes o del medio para tratar zonas contaminadas.

2.7. Biorremediación

Para solucionar los efectos negativos producidos por la contaminación de hidrocarburos, existen muchas tecnologías de remediación de suelos, entre las cuales se encuentra aquellas que emplean el uso de organismos, con el fin de degradar agentes extraños en el medio (Martínez et al., 2011; Di Paola, 2010). La tecnología de remediación que usa organismos se la conoce como biorremediación, Volke & Velasco (2002) afirman que “el término de biorremediación se utiliza para describir una variedad de sistemas que utilizan organismos vivos (plantas, hongos, bacterias, etc.) para degradar, transformar o remover compuestos orgánicos tóxicos a productos metabólicos inocuos a menos tóxicos”.

En este punto, se entiende que la biorremediación es una de las diferentes tecnologías de remediación en desarrollo, la cual se caracteriza por usar organismos vivos para la eliminación de agentes contaminantes, es decir se encuentra en la rama de clasificación por tipo de tratamiento y esto a su vez como tratamiento biológico.

Esta tecnología presenta sus propias características las cuales son:

- Los tipos de organismos usados para tratar zonas contaminadas va a depender de los agentes contaminantes que se pretenda degradar. Es decir, que los organismos varían en función de los contaminantes.
- Los organismos que usados pueden ser propios de la zona o introducidos.
- El tratamiento puede darse in situ o ex situ.
- Las condiciones de aplicación pueden darse en condiciones aeróbicas o anaeróbicas.

2.7.1. Clasificación de tecnologías de Biorremediación

De tal manera, este tipo de tecnología se diferencia por ser de vanguardia, es decir que la biorremediación se encuentra en constante evolución por los avances e intervenciones por parte de diferentes áreas investigativas. De tal manera, la biorremediación se puede dividir en diferentes tecnologías que usan variados métodos con el fin de remediar zonas de contaminación. Las principales tecnologías biológicas de remediación son (FCH, 2018):

- Bioventeo
- Bioestimulación
- Bioaumentación
- Biotransformación de metales
- Compostaje
- Fitorremediación
- Landfarming
- Lodos Biológicos o Biorreactores

2.7.1.1. Bioventeo

Es una tecnología desarrollada para remover hidrocarburos volátiles como los BTEX, su objetivo es estimular la biodegradación natural en condiciones aeróbicas. Se usa inyección de oxígeno directo a la zona a tratar, con el fin de aumentar los niveles orgánicos y promover de la biodegradación de los contaminantes, luego se usa bombas de vacío para la extracción de los gases (Jiménez, 2020; Li et al., 2021).

2.7.1.2. Bioestimulación

Consiste en la estimulación para incrementar la actividad microbiana nativa, suministrando nutrientes directos a la zona contaminada. Se debe mantener niveles enzimáticos eficientes, porque un exceso o carencia de estos puede ocasionar problemas en este tipo de biorremediación; se usan para tratar suelos contaminados con gasolinas, COV y pastosidades (Volke & Velasco, 2002).

2.7.1.3. Bioaumentación

Tecnología que selecciona microorganismos para aplicarlos en un sitio específico, estimulando el crecimiento de sus poblaciones. Su uso es adecuado cuando un sitio no cuenta con niveles altos de microflora; puede tratar concentraciones altas de metales (Volke & Velasco, 2002).

2.7.1.4. Biotransformación de metales

Es una tecnología que usa organismos con el fin de transformar las moléculas inorgánicas presentes en el suelo; dichos organismos se caracterizan porque usan como fuente de energía ciertos metales y se los denomina chemolitoautótrofos. Se usan mecanismos de oxidación, reducción y metilación para emplear este tipo de biorremediación (Soto, Gutiérrez, Rey, & González, 2010).

2.7.1.5. Compostaje

Tecnología aeróbica que se aplica a suelos contaminados, para convertir residuos orgánicos en materia orgánica estable, implementando organismos para que realicen el proceso de biodegradación. Los contaminantes se mezclan con material orgánico como paja, aserrín, etc. Formando una composta en donde los microorganismos se encargan de degradar. (Velasco & Volke, 2003; Mosquera,2016).

2.7.1.6. Fitorremediación

Tecnología que emplea el uso de plantas, con el fin de que estas absorban en sus tejidos contaminantes de la zona a tratar, siendo eficientes en suelos, lodos y sedimentos. Se debe tomar en cuenta que solo un grupo limitado de plantas es capaz de esta labor. Pueden tratar contaminantes como hidrocarburos, metales pesados, etc. (Rodríguez, 2013; Velásquez, 2017).

2.7.1.7. Landfarming

Esta tecnología consiste en estimular la actividad de microflora en el suelo para obtener una oxidación biológica de los hidrocarburos encontrados en la zona contaminada. La microflora puede ser levaduras, hongos o bacterias que son introducidos en forma de fertilizantes o riego, el cual es periódicamente removido para su ventilación (Rodríguez I. , 2013).

2.7.1.8. Lodos Biológicos o Biorreactores

Tecnología para tratar suelos poco permeables, para aplicar se debe tener un biorreactor, el cual es un sistema con un actividad microbiológica activa, entre los más comunes son los lodos, la degradación se da en fase acuosa, por ende el tratamiento se da en lagunas artificiales y con una mezcla contante (Volke & Velasco, 2002).

METODOLOGÍA

3.1. Tipo de Estudio

El trabajo es de tipo descriptivo-documental, que se basa en la obtención de información bibliográfica de tecnologías de biorremediación, con el fin de realizar un análisis comparativo y determinar características, parámetros y requerimientos que permiten obtener mejores resultados al aplicar la biorremediación.

3.2. Obtención de información

La información que se usa en el trabajo es la recopilación de documentos científicos que son obtenidos por medios virtuales, los cuales fueron seleccionados a partir de los siguientes criterios para garantizar la calidad de los análisis posteriores:

- Tecnologías de biorremediación experimentales o aplicadas a campo
- Poseer la categoría de ser documentos científicos o tipo tesis.
- Tener fechas de publicación entre el periodo de 2015 al 2021.
- Temas enfocados en remediar contaminación de suelos.

En base a los criterios anteriores se seleccionaron 13 tecnologías de biorremediación que fueron usados en el trabajo. Cabe mencionar que a las tecnologías de biorremediación se procede a identificar con el nombre de casos y un respectivo número, con el fin de mejorar el manejo de información. En la tabla 3 se presenta los documentos.

Tabla 3. Documentos de Biorremediación usados en el trabajo

Nombre	Caso	Autor	Año
<p>PRODUCCIÓN OPTIMIZADA DE UN AGENTE DE BIORREMEDIACIÓN PARA SU APLICACIÓN EN LA RECUPERACIÓN ECOLÓGICA DE UN VERTIDO DE PETRÓLEO (Agbaji et al., 2020).</p>	<p>1</p>	<p>Agbaji, J., Nwaichi, E., & Abu, G.</p>	<p>2020</p>
<p>BIODEGRADACIÓN AEROBIA DE FRACCIONES DE HIDROCARBUROS PROVENIENTES DE LA ACTIVIDAD PETROLERA EN UN SUELO DE LA REGION PATAGONIA NORTE, ARGENTINA (Álvaro et al., 2017).</p>	<p>2</p>	<p>Cecilia Álvaro Lucas Arocena Miguel Martínez Norma Nudelman</p>	<p>2017</p>
<p>ESTRATEGIAS PARA MEJORAR LA BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS AFECTADOS POR HIDROCARBUROS (Effendi et al., 2017).</p>	<p>3</p>	<p>Agus Effendi Roopa Kamth Sara McMilen Natasha Sihoata Eve Zuo Kammy Sra Deyuan Kong Tru Wisono</p>	<p>2017</p>

		Jamal Svakir	
POTENCIAL DE BIORREMEDIACIÓN DE STREPTOMYCES SP. MOE6 PARA METALES TÓXICOS Y PETRÓLEO (Elnahas et al., 2020).	4	Marwa O. Elnahas Liyuan Hou Judy D. Wall Erica L.-W. Majunder	2020
BIORREMEDIACIÓN DE PETRÓLEO CRUDO POR AISLADOS FÚNGICOS DE LA RIZOSFERA EN PRESENCIA DE NANOPARTÍCULAS DE PLATA (Zaban et al., 2020).	5	Mayasar I. Al-Zaban Mohamed A. Mahmoud Maha A. AlHarbi Aisha M. Bahatheq	2020
EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA BIOESTIMULACIÓN SOBRE LA BIORREMEDIACIÓN DE HIDROCARBUROS EN SUELOS CONTAMINADOS CON ALQUITRÁN EN SOACHA, CUNDIMARCA-COLOMBIA (Vallejo et al., 2016)	6	Victoria Vallejo John Sandoval Sandra Garagoa Johannes Bastos	2016
OPTIMIZACIÓN DE UN PROCESO DE BIOESTIMULACIÓN EN UN SUELO DE RÍO	7	Luciana Cambarieri Graciela N. Pucci Adrián J. Acuña	2021

<p>GALLEGOS, ARGENTINA, PARA SU UTILIZACIÓN EN BIORREMEDIACIÓN DE HIDROCARBUROS (Cambarieri, Pucci, & Acuña, 2021)</p>			
<p>BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON ACIETE AUTOMOTRIZ USADOS MEDIANTE SISTEMA DE BIOPILAS (Anza Cruz et al., 2016)</p>	8	<p>Héctor Anza Paula Orantes Raúl González Alejandro Ruíz Eduardo Espinoza Rebeca Martínez Carlos García Pedro Vera</p>	2016
<p>BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS DE LA PARROQUIA TARACOA EN FRANCISCO DE ORELLANA, MEDIANTE EL HONGO PLEUROTUS OSTRECTUS (Simbaña, 2016)</p>	9	Carlos Simbaña	2016
<p>EVALUACIÓN DE LA BIORREMEDIACIÓN EN SUELOS CONTAMIANDOS CON HIDROCARBUROS UTILIZANDO</p>	10	Marco Pérez	2018

PSEUDOMONAS FKUORESCENS (Pérez Pozo, 2018)			
USO DE BACILLUS COAGULANS PARA LA BIORREMEDIACIÓN DE SEDIMENTO CONTAMINADO POR HIDROCARBURO EN EL EJIDO EL SACRIFICIO TUXPAN, VERACRUZ (Hernández de la Cruz, 2019)	11	Yolanda Hernández de la Cruz	2019
BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON PETRÓLEO CRUDO USANDO FERTILIZANTES IRGÁNICOS E INORGÁNICOS (Ofoegbu et al., 2015)	12	Rowland U Ofoegbu Yusuf O L Momoh Ify L Nwaogazie	2015
BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON PETRÓLEO CRUDO MEDIANTE EL USO DE RESIDUOS ANIMALES (Obiakalaje et al., 2015)	13	Obiakalaje U.M. Makinde O.A. Amakoromo E.R.	2015

Elaborado por: Méndez, 2021

3.3. Discusión y Análisis de casos de biorremediación

Con la información que se obtiene de los 13 casos de biorremediación se realizó un análisis del desempeño en la eliminación de contaminantes, con el fin de verificar si las tecnologías presentan buenos resultados para degradar hidrocarburos en zonas contaminadas y generar un punto de discusión al respecto, porque, entender el desempeño de cada tecnología es necesario para enfocarse en que la biorremediación puede convertirse en una alternativa para remediar zonas contaminadas con hidrocarburo.

3.4. Análisis de parámetros de los respectivos casos

Al entender que la biorremediación es una tecnología de vanguardia, se procedió a realizar el análisis de sus parámetros que intervienen en su desarrollo a los respectivos casos. Este análisis se dividió en dos puntos que consta de identificación y justificación.

Para el primer análisis se identificó los factores que toman relevancia al momento en que se desarrollan los casos. Mientras que para el segundo punto se descartó aquellos factores que no alteran la eficacia de la biorremediación al intervenirlos; a los factores restantes se realizó un análisis para demostrar su papel en el desarrollo de un proyecto de biorremediación.

3.4.1. Determinación de parámetros principales en la biorremediación

En base a los análisis y evaluaciones que se realizaron en el punto anterior, se procedió a establecer los parámetros que se encuentran involucrados y pueden generar mejores resultados en la aplicación de la biorremediación.

3.5. Análisis de lineamientos de la biorremediación

En base al estudio y análisis que se realizó en el trabajo para poder seleccionar qué parámetros afectan e intervienen un proyecto de biorremediación, se propuso los requerimientos que estos parámetros deben cumplir para garantizar la eficacia de la biorremediación

3.6. Análisis de ventajas y desventajas de la biorremediación

Adicionalmente se realizó este análisis para determinar si la aplicación de la biorremediación presenta beneficios del resto de tecnologías de remediación de contaminantes.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Análisis de Casos de Biorremediación

De los casos seleccionados se procedió a realizar un análisis a fondo a cada uno, para determinar y comparar sus características principales. En base al análisis de casos de biorremediación se realizó la tabla 4 que demuestra información del objetivo y tipo de biorremediación. Esto se realiza para entender la variedad de tecnologías que se pueden usar para remediar zonas contaminadas.

Tabla 4. Cuadro comparativo de casos de aplicación de biorremediación

Casos de aplicación de Biorremediación	Objetivo	Tipo de Biorremediación	Desarrollo
Caso 1	Encontrar proporciones adecuadas entre el agente biorremediador y desechos para aumentar los procesos degradadores.	Bioestimulación Bioaumentación Compostaje	Laboratorio
Caso 2	Utilizar un lodo previamente tratado para fomentar el crecimiento de la población microbiológica y aumentar la degradación de hidrocarburo.	Bioestimulación Bioaumentación Lodos Biológicos	Laboratorio

Caso 3	Aplicar oxidantes como agente fomentador de procesos degradativos de hidrocarburo y determinar si son beneficiosos para tratamientos de remediación.	Bioestimulación	Laboratorio
Caso 4	Consiste en usar una bacteria que posee buenos resultados degradando hidrocarburos y metales pesados, con el fin de aplicarlos a una zona contaminada. El proceso será extraer, purificar y liofilizar la bacteria para obtener una solución y usarla.	Biotransformación de metales Landfarming	Laboratorio
Caso 5	Determinar un método para seleccionar organismos tipos hongos y usarlos para biorremediación, con la adición de	Landfarming Bioestimulación	Laboratorio

	una nanopartícula para fomentar la velocidad de degradación de hidrocarburos.		
Caso 6	Desarrollar un estudio para biorremediación de uso de fertilizante inorgánico compuesto y urea más K ₂ HPO ₄ .	Bioestimulación	Laboratorio
Caso 7	Desarrollar una biorremediación en donde se optimice la relación Carbono, Nitrógeno, Fósforo, humedad y concentración.	Bioestimulación	Laboratorio
Caso 8	Desarrollar un sistema de biopilas que se apto para la eliminación de hidrocarburos.	Bioaumentación	Laboratorio
Caso 9	Diseñar un proceso de biorremediación por medio del uso del hongo <i>Pleurotus ostreatus</i> , aplicando biopilas.	Landfarming Bioaumentación	Laboratorio
Caso 10	Diseñar un método para tratar zonas contaminadas por	Bioaumentación	Laboratorio Campo

	hidrocarburos mediante el uso de la bacteria Pseudomonas fluorescens.		
Caso 11	Diseñar un método de biorremediación mediante el uso de la bacteria Bacillus coagulans mediante bioaumentación	Bioaumentación	Laboratorio
Caso 12	Diseñar un método de biorremediación en base a la estimulación de organismos con la ayuda de fertilizantes orgánicos e inorgánicos.	Bioestimulación	Laboratorio
Caso 13	Diseñar un proceso de biorremediación mediante el uso de adición de fertilizante proveniente de desechos animales.	Bioestimulación Landfarming	Laboratorio

Elaborado por: Méndez, 2021

Se realizó la Figura 1, tomando como información los 13 casos y comparando sus desempeños al momento de eliminar hidrocarburos. En la Figura 1, se observa que se presenta un valor del 77% de Buenos resultados, lo que indica que la mayoría de los casos de biorremediación han sido desarrollados exitosamente y presentan altas eficiencias al momento de eliminar los respectivos contaminantes. Mientras que los resultados prometedores corresponden a un valor de 15%, lo que determina que una mínima parte de los casos de biorremediación presenta resultados aceptables que podrían requerir más experimentación, no se pueden considerar que poseen la capacidad de degradar hidrocarburo a altos niveles. Por último, se observa un 8% de resultados no relevantes, que son los casos que a pesar de aplicar con éxito un proceso de biorremediación la degradación de contaminantes no genera una estimulación en el proceso. En fin, estos valores indican que las tecnologías de biorremediación presentan buenos resultados la mayor parte del tiempo, por lo tanto, la aplicación de la biorremediación es una alternativa para tratar zonas contaminadas, debido a sus altos porcentajes de éxito.

Porcentaje de éxito de casos de biorremediación

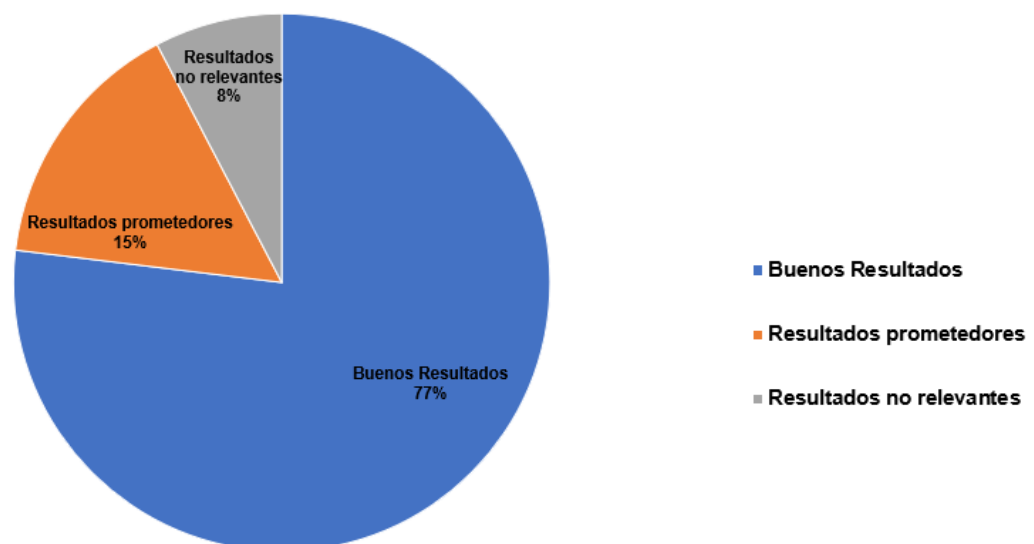


Figura 1. *Porcentaje de éxito de casos de biorremediación*

Elaborado por: Méndez, 2021

4.1.1. Discusión sobre la biorremediación eficaz

En la sección anterior, se presentaron tecnologías de biorremediación denominadas como casos, las cuales demostraron diferentes formas, métodos, aplicaciones y resultados para remediar zonas contaminadas con hidrocarburos. Se demostró que un alto porcentaje de estas tecnologías tienen la capacidad para degradar hidrocarburos. Se entiende que la biorremediación eficaz es cuando se logra eliminar la mayor cantidad de hidrocarburo; esto se observa con ayuda de la Figura 1.

Entre el desempeño de los distintos casos de biorremediaciones presentadas, es claro que no todas generan buenos beneficios para eliminar contaminantes, cuando no se analiza o no se conoce cómo desarrollar este tipo de tecnología o en si la tecnología es incapaz de degradar hidrocarburo. Por otra parte, en los casos que presentan buenos resultados se debe tomar más relevancia, porque es aquí, en donde se originan las características que pueden permitir que la biorremediación sea un proceso eficaz.

Por lo tanto, se entiende que para lograr buenos resultados se debe conocer qué factores influyen en la biorremediación. Este paso es difícil, porque la biorremediación a primera vista da una perspectiva de un proceso simple y repetitivo, en donde aplicar un procedimiento generalizado garantiza el éxito, pero la realidad es totalmente diferente. Para que la biorremediación sea un proceso estandarizado se debería determinar todos los parámetros que siempre van a influenciar. Es aquí donde se origina el verdadero problema, porque ciertos parámetros o por no decir la mayoría no van a estar presentes a un ambiente a tratar. Lo que lleva, a que la biorremediación sea un proceso altamente complicado, por la cantidad de información a evaluar y las diferencias que se encuentra en zonas contaminadas, es decir que los proyectos de biorremediación nunca van a ser iguales. No obstante, esto no determina, que el proceso de biorremediación no pueda contar con simplificaciones para su desarrollo. Al plantearse la idea de obtener los factores comunes en el proceso de biorremediación, se podría aumentar la probabilidad de eficacia.

4.2. Parámetros de la biorremediación

A los casos se realizó un análisis estructural para determinar los factores que intervienen en su desarrollo. Se debe entender que dicha información será correspondiente a variables, que una vez modificadas puedan lograr una respuesta en el desempeño de la biorremediación. Estas variables no serán usadas para la realización de experimentación, son información con el fin de establecer ciertos puntos para optimizar al proceso de biorremediación.

Se desarrollo la tabla 5, que presenta a los factores que se han identificado en los casos antes expuestos.

Tabla 5. *Parámetros de eficiencia en casos de aplicación de biorremediación*

Casos de aplicación de Biorremediación	Factores
Caso 1	Temperatura Organismos Nitrógeno Fósforo Fertilizantes Materia Orgánica
Caso 2	Organismos Contaminante Temperatura Nitrógeno Fósforo pH Características del suelo Solubilidad
Caso 3	Organismos Temperatura Oxidantes Tensioactivos Humedad

	Nitrógeno Fósforo
Caso 4	Organismos Temperatura pH Contaminante Características del suelo Metales Pesados Nitrógeno Fósforo Solubilidad
Caso 5	Organismos Temperatura Solubilidad Contaminante pH Nanopartículas
Caso 6	Temperatura Humedad pH Contaminante Organismos Nitrógeno Fósforo
Caso 7	Contaminante Nitrógeno Fósforo Humedad Concentración Organismos
Caso 8	Temperatura Organismos Humedad

	<p>Fósforo Nitrógeno Solubilidad Contaminante Potasio pH Características del suelo Análisis de ADN de organismos</p>
Caso 9	<p>Temperatura pH Humedad Luminosidad Contaminante Materia Orgánica Características del suelo Metales Pesados</p>
Caso 10	<p>Organismos Temperatura pH Conductividad eléctrica Humedad Contaminante Materia Orgánica Fósforo Potasio Cadmio Magnesio Cobre Zinc</p>
Caso 11	<p>Organismos pH Nitrógeno Fósforo</p>

	Humedad Características del suelo
Caso 12	Contaminante Nitrógeno Fósforo pH Materia Orgánica
Caso 13	Aireación pH Nitrógeno Fósforo Materia Orgánica

Elaborado por: Méndez, 2021

Como se observa en la tabla 5, los factores de relevancia se repiten en algunos casos, esto es debido a que para desarrollar cualquier intervención de remediación se van a trabajar con ciertos parámetros que son indispensables. Se realizó la tabla 6, con el fin de resumir los factores identificados.

Tabla 6. Factores Identificados de los casos

Factores
Aeración
Análisis de ADN de organismos
Cadmio
Características del suelo
Cobre
Concentración
Conductividad eléctrica
Contaminante
Fósforo
Humedad
Luminosidad

Magnesio
Materia Orgánica
Metales Pesados
Nanopartículas
Nitrógeno
Organismos
Oxidantes
pH
Potasio
Solubilidad
Temperatura
Tensioactivos
Zinc

Elaborado por: Méndez, 2021

Se elaboró la Figura 2, que consiste en obtener los porcentajes que representan los parámetros identificados en función de los casos de biorremediación, lo cual se lo realiza para reconocer cuales parámetros son comunes al momento de desarrollar una tecnología de biorremediación.

En la Figura 2 se observa que el fósforo presenta un valor del 85%; el nitrógeno, organismos y pH presentan valores de 77%; el contaminante y la temperatura presentan un valor de 69%; la humedad 54%; materia orgánica y características del suelo presentan 38%; la solubilidad presenta 31%; por último los factores que presentan un valor de 8% son aireación, análisis de ADN de organismos, cadmio, cobre, concentración, conductividad eléctrica, luminosidad, magnesio, nanopartículas, oxidantes, tensioactivos, zinc y fertilizantes.

Se deduce que los parámetros con mayor frecuencia de intervención son aquellos que presentan mayor porcentaje; también se señala que esto es un indicador para diferenciar aquellas variables que tienen un mayor impacto al momento de desarrollar cualquier tipo de tecnología de biorremediación. Por otra parte, se determina que los parámetros que presentan valores del 8%, son resultado directo de la tecnología específica implementada en los respectivos casos.

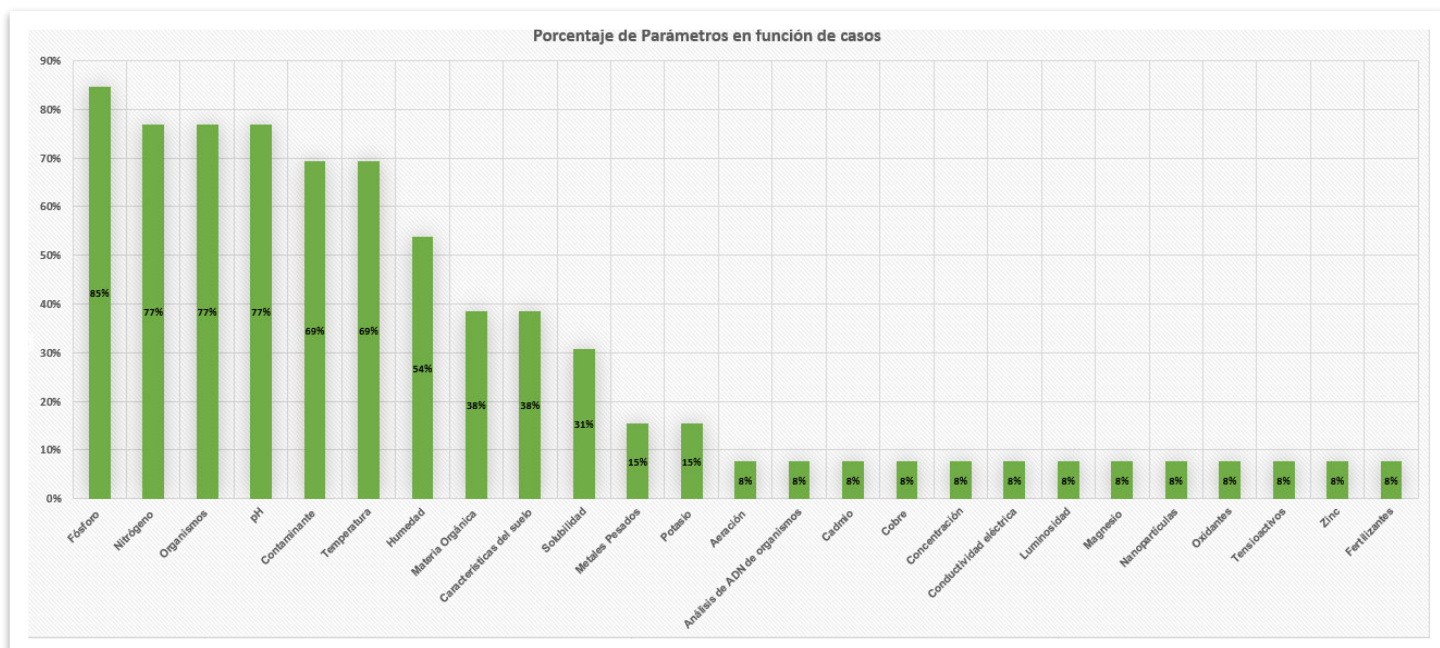


Figura 2. Porcentaje de Parámetros en función de casos de biorremediación

Elaborado por: Méndez, 2021

4.2.1. Elección de parámetros

Los parámetros elegidos serán aquellos que tengan un impacto en la biorremediación, es decir que si estas son alteradas permitirían obtener buenos resultados o malos dependiendo de la optimización que se les realice; otro aspecto que se considera es que los factores en general siempre se van a encontrar al momento de realizar un proyecto de biorremediación y son independientes de la tecnología. De tal manera, se realizó un análisis en función del entendimiento de los casos de biorremediación y se determinó aquellos parámetros que cumplen con los requisitos y son presentados en la tabla 8. El nitrógeno y fosforó serán identificados como nutrientes para facilitar el manejo de información.

Por medio del estudio a los casos presentados, las variables descartadas no afectaron al grado de biorremediación.

Tabla 7. Parámetros elegidos y descartados

Elegidos	Descartados
Características del suelo	Aeración
Contaminante	Análisis de ADN de organismos
Humedad	Cadmio
Materia Orgánica	Cobre
Organismos	Concentración
pH	Conductividad eléctrica
Solubilidad	Luminosidad
Temperatura	Magnesio
Nutrientes	Metales Pesados
	Nanopartículas
	Oxidantes
	Potasio
	Tensioactivos
	Zinc

Elaborado por: Méndez, 2021

4.3. Justificación de Parámetros

Al tener identificado los parámetros que determinan una biorremediación eficaz se prosigue a determinar el cómo y el por qué toman una gran importancia, partiendo de un análisis a cada uno de estos, es decir se realizó una justificación del impacto que tienen en la biorremediación. Al identificar que una biorremediación es eficiente con su objetivo, y que sus factores determinantes se han manejado correctamente, uno de los entregables será que los agentes contaminantes se han degradado o transformados en otros que no perjudiquen al medio ambiente (Herrero, 2016).

4.3.1. Análisis de organismos

Las diferentes tecnologías que usan biorremediación para tratar contaminación por hidrocarburos se enfocan en identificar, analizar y seleccionar los organismos apropiados que poseen la característica de degradadores de hidrocarburos. La ventaja de intervenir con este parámetro consiste en que se puede trabajar con organismos nativos o introducirlos para solventar problemas de contaminación específicos; lo cual se puede evidenciar en los casos 4, 5, 9 y 11 en donde se usan como base para el desarrollo de la biorremediación la intervención y modificación de organismos para mejorar los procesos degradativos.

Algunos tratamientos para contaminación de suelos con crudo, se usan organismos nativos sin previa identificación y consisten en aumentar las poblaciones microbiológicas y esperar una degradación significativa de hidrocarburos, pero qué pasaría, si se conoce los organismos a los cuales se debe enfocar los recursos para aumentar las tasas de éxito (Agbaji, Nwaichi, & Abu, 2020). Usando organismos en específico aumenta las posibilidades de un tratamiento ambiental, porque permite tratar problemas no en forma general más bien de manera concreta y esto lleva a introducir organismos artificiales (Elnahas et al. 2020; Medina et al., 2014; Zommere et al., 2017).

La selección de organismos se vuelve importante y necesaria para distinguir aquellos que tengan la capacidad para ser aplicados en la biorremediación. Por lo tanto, el análisis de organismos debe ser un paso fundamental para comenzar con estrategias de biorremediación, y se determina que este es un parámetro que al manejarlo puede alterar en gran medida a la biorremediación.

4.3.2. Análisis de nutrientes

Los nutrientes son una parte principal para el aumento de las poblaciones de organismos que son usados en la biorremediación. Los organismos para poder modificar y degradar los hidrocarburos necesita fuentes energía, por lo que toman aquellos que se encuentren propiamente en el suelo (Rivera et al. 2018).

La importancia de la adición de nutrientes se puede observar claramente en el caso 1, en donde se demuestra que las condiciones normales del suelo carecen de suficientes nutrientes, por lo que, diseña un estudio en conjunto para la creación y aplicación de un desecho no dañino con el fin introducir los nutrientes faltantes. De la misma manera el caso 2, se usa una forma para para proveer nutrientes a un suelo escaso de ellos que son los biosólidos y así se puede nombrar diferentes métodos como aplicaciones de abono, desechos orgánicos, residuos agrícolas, lodos, etc. (Viñas, 2005; Narváez et al.,2008; Martínez et al., 2011). En resumen, el 80% de los casos presentados en el trabajo, involucran a los nutrientes para fomentar el proceso degradativo de contaminantes por parte de organismos, por lo tanto, se verifica que los nutrientes son un parámetro que puede intervenir en la eficacia de la biorremediación.

Se debe tener en claro que no todos los nutrientes presentan tal beneficio para el desarrolla de la biorremediación, esto se corrobore con los casos, en donde se distinguen dos nutrientes básicos, los cuales son el nitrógeno y fósforo. Estos nutrientes normalmente pueden ser encontrados en cantidades que no son suficientes para garantizar un mejor rendimiento metabólico de colonias microbiologías y en caso de organismos vegetales para aumentar la tasa de crecimiento (Encinas, 2011). Otros nutrientes también intervienen como el calcio, magnesio y hierro, pero estos a diferencia se encuentran en proporciones suficientes en el medio (Menn et al., 2000; Viñas, 2005).

En la tabla 8 se presenta información de los beneficios de los nutrientes. Pero la adición de nutrientes en proporciones inadecuadas puede inhibir el proceso de degradación de hidrocarburos (Margesin y Schinner, 1997; Viñas, 2005). Realizar estudios previos para obtener una optimización de nutrientes se considera necesario para no ralentizar el proceso de biorremediación.

Tabla 8. Nutrientes esenciales

	Bacterias	Organismos vegetales
Nitrógeno	Fomenta los procesos de degradación de las bacterias, al usar como fuente de energía al nitrógeno este se transforma en fuentes de amonio y nitrato (Agbaji et al., 2020; García, 2011; Acuña et al., 2008).	Sirve para fomentar el crecimiento de la planta, las zonas de sus raíces, tallos y hojas, pero no es absorbido el nitrógeno como tal, sino como amonio y nitrato, se encuentra relacionada con la salud y calidad de la planta (Plasencia et al., 2019; Cerón et al., 2012)
Fósforo	Mejora la estimulación del metabolismo nutricional de las bacterias. (Agbaji et al., 2020; Patiño et al., 2014).	Es de importancia porque se usa para fomentar el crecimiento de nuevas células en la planta, lo que conlleva a un crecimiento de la planta más saludable y rápido (Fernández, 2007).

Elaborado por: Méndez, 2021

4.3.3. Análisis de tipo de contaminante

Los contaminantes que afectan un ambiente pueden clasificarse en orgánicos e inorgánicos, y su diferencia radica en que los contaminantes orgánicos en su estructura presentan moléculas de carbono, mientras que los contaminantes inorgánicos son opuestos, es decir, carecen de carbonos (Volke y Velascos, 2002).

En los casos de biorremediación se observa que el 69% maneja esta variable para aumentar la tasa de éxito, y logrando obtener buenos resultados. Por lo tanto, conocer el tipo de contaminante en una zona es de importancia para realizar la aplicación de biorremediación, porque el tipo de hidrocarburo, la concentración hidrocarburo y los agentes contaminantes en consecuencia del derrame de crudo permite establecer

qué tecnología es óptima para desarrollarse (Agbaji et al. 2020; Volke & Velasco, 2002).

En los casos presentados en la sección anterior, se observa que el análisis al crudo se lo realiza determinando la gravedad API y en función de esto se procede a realizar los análisis respectivos de degradación de crudo antes y después de aplicar los métodos de biorremediación respectivos, pero en sí, no se determina un método en específico para tratar un hidrocarburo con ciertas condiciones, más bien se parte de obtener muestras de crudo para posteriormente demostrar los beneficios de una tecnología de biorremediación previamente seleccionada.

Una de las excepciones que se puede encontrar es el caso 4, en donde se escoge la bacteria *Streptomyces* sp. MOE6 para tratar contaminación por hidrocarburos y presencia de metales pesados, en donde se evidencia una solución específica de contaminantes previamente evaluados. La principal razón por la que se debe realizar, un análisis de hidrocarburos es porque, el tipo de hidrocarburo, la concentración hidrocarburo y los agentes contaminantes en consecuencia del derrame de crudo permite establecer que tecnología es óptima para desarrollarse. En fin, por estas razones la variable de contaminación es un parámetro que interviene al momento de desarrollarlo de la biorremediación.

4.3.4. Temperatura

La variable de temperatura presenta un porcentaje 69%, de intervención en los casos de biorremediación, por ende, se observa que toma relevancia al momento de desarrollar cierta tecnología de biorremediación. Sin importar como se realice, la intervención de remediación va a ser sometido a temperaturas ambientales y en algunos casos puede ser modificado el factor de temperatura artificialmente (Volke & Velasco, 2002; Margesin & Schinner, 2001). Según Viñas (2005) “la temperatura es uno de los factores ambientales más importantes que afecta la actividad metabólica de los microorganismos y la tasa de biodegradación” (p. 152). Esto mismo es afirmado por Margesin et al. (2001) donde indica que “La temperatura juega un papel importante en el control de la naturaleza y el alcance del metabolismo microbiano de los hidrocarburos, que es de especial importancia para la biorremediación” (p. 650). El factor de la temperatura es usado para aumentar la volatilidad, degradación o

movilización de los contaminantes en la zona (Volke & Velasco, 2002; Margesin & Schinner, 2001).

En los casos presentados, se observa al momento de la experimentación para probar los efectos de la biorremediación, se usa en general rangos de temperatura, con valores de 20, 25 y 30 grados centígrados, porque estudios realizados indican que la tasa de biodegradación se encuentra en fase óptimas en condiciones de 20 a 30 °C (Viñas, 2005; Menn et al., 2000). Pero también se tiene buenos resultados al momento de que la temperatura aumenta, porque aumenta la velocidad de reacción y de la misma manera la volatilidad de algunos compuestos (Margesin & Schinner, 2001). Es decir, que la temperatura al aumentar presenta mejores valores de degradabilidad.

Por lo tanto, el conocer en que rangos de temperatura se va a encontrar la tecnología de biorremediación que se aplicará, es de importancia, así como la temperatura del ambiente contaminado. En fin, este análisis muestra que la temperatura es un parámetro que puede modificar en gran medida los resultados de la biorremediación.

4.3.5. pH

Por medio del análisis de los casos se evidencia que al trabajar con el parámetro pH, se obtienen aumentos en la eficacia de degradación de hidrocarburos. De tal manera, el pH es un factor de relevancia en el análisis del suelo; con esto se puede determinar el grado de acidez correspondiente a una zona (Osorio, 2012). En el caso de un proyecto de biorremediación es necesario conocer el estado de acidez del suelo, porque esto puede intervenir en la mineralización del hidrocarburo (Margesin & Schinner, 2001). Entiéndase como mineralización de hidrocarburo la transformación de materia orgánica en materia inorgánica que puede ser usada por las plantas (Guerrero et al., 2012).

Estudios realizados presentan que mejores resultados de biorremediación se obtienen cuando el pH del suelo se encuentra en valores cercanos a neutralidad para aplicación de bacterias, es decir que el suelo no presente acidez y de la misma manera no debe ser alcalino mientras que para hongos es entre 4-5; el valor de pH cuando es neutro corresponde a 7, se dice que se tiene un pH ácido cuando son valores menores a 7, y alcalinos cuando son valores mayores a 7 (Osorio, 2012; Margesin & Schinner, 2001; Dibble & Bartha, 1979; Martín et al., 2004). Lo anterior se puede resaltar según Viñas (2005) “Los rangos óptimos para la biodegradación: pH

entre 6 y 8 y temperaturas entre 20 y 30°C” (p. 152). Pero se debe tomar en cuenta el tipo de organismo presente.

En los casos presentados, se observa lo antes mencionado. La experimentación en laboratorio se trabaja con rangos de pH entre 6 a 8, lo que es debido a los resultados más relevantes que se pueden obtener; los organismos usados son bacterias con excepción de caso 5 que usa hongos.

Por lo tanto, el análisis de pH no se puede omitir antes de aplicar un proceso de remediación de ambiente, ya que este puede influenciar en la mineralización de hidrocarburos así mismo como del crecimiento de organismos, además, permite optar por la decisión de modificar este factor en caso de requerirlo. Para aumentar el pH original de un suelo se puede usar calcio y magnesio, mientras que para acidificar un suelo se puede usar sulfato de hierro (Baker,1994; Viñas, 2005).

4.3.6. Humedad

Este factor puede intervenir en la biorremediación, por el exceso o escasez de contenido de agua en el suelo; poco contenido de humedad en el suelo puede generar problemas como movimiento de bacterias, de nutrientes y contaminantes nulos, mientras que valores altos de humedad en el suelo puede disolver oxígeno en el agua (Viñas, 2005; Alexander, 1999; Menn et al. 2000). Para intervenir la humedad de un suelo se requiere un análisis de las propiedades y de tipo del suelo, ya que estos pueden reaccionar de diferentes maneras a la cantidad de agua que sea suministrado.

En los casos presentados, los rangos de humedad varían de uno a otro, por lo tanto, este factor debe ser analizado previamente de ser aplicado a una zona contaminada en entorno de laboratorio; ya que en si no se puede establecer un rango óptimo de forma general, ya que va a depender a su vez de otros factores para establecerlo, pero se corrobore que es un parámetro que no se lo usa a gran mediada por su complejidad pero al ser intervenido puede aumentar la eficiencia en la biorremediación.

4.3.7. Solubilidad

Los procesos de degradación están influidos por la solubilidad presente de los compuestos; la solubilidad se entiende como la cantidad de soluto que se puede disolver en cierta cantidad de disolvente (Rodríguez R. , 2017). De tal manera, este factor tiene un papel porque la transformación biológica requiere que exista una solución para llevar a cabo los procesos degradativos (Volke & Velascos, 2002; Alexander, 1994). Esto se puede afirmar por Viñas (2005), “las tasas de biodegradación de hidrocarburos en el medio ambiente están limitadas por su hidrofobicidad y baja solubilidad en agua” (p.21).

Entonces se entiende que, si se presenta bajas solubilidades en el medio, no se obtendrá buenos procesos de biorremediación, por lo tanto, se debe modificar este factor para la conveniencia del proceso, el análisis de solubilidad permite este tipo de acciones, además de seleccionar el mejor método para no generar daños secundarios. Para tratar la baja solubilidad se opta por agentes que tengan efectos en modificar hidrofobicidad, tensiones superficiales entre otros; los agentes más comunes son los tensioactivos (Viñas, 2005; Zhang & Miller, 1994; Peele Karlapudi, et al., 2018). En los casos de estudio donde este parámetro es intervenido se presenta buenos resultados para la degradación de hidrocarburos.

4.3.8. Análisis de características del suelo

El tipo de suelo y ciertas propiedades pueden influenciar en otros parámetros directa o indirectamente como pH, solubilidad, humedad entre otros. Las características del suelo influyen en la biorremediación para su éxito o fracaso, debido a que ciertas tecnologías de biorremediación son diseñadas para suelos con determinadas propiedades y al aplicarlas a otro determinado ambiente tendrá como resultado no generar buenos porcentajes de degradación de contaminantes. En los casos estudiados, se evidencia que al analizar este parámetro se pudo aumentar el porcentaje de degradación de contaminantes.

El tipo de suelo puede ser determinante para seleccionar un tipo específico de tecnología de biorremediación. Según Volke & Velasco (2002), ciertas características del suelo que tienen influencia en la biorremediación son:

- Tamaño de partícula
- Heterogeneidad

- Materia orgánica

4.3.8.1. Tamaño de partícula

Determinar el tamaño de grano que posee un suelo permite identificar el tipo de suelo en sí; se presenta tres tipos de suelos en base al tamaño del grano y son arcilla, limo y arena (Rozados et al., 2004; Martínez et al., 2001). Este tipo de evaluación del suelo sirve en fin para poder rechazar ciertos tipos de tecnologías de biorremediación que no tendrían resultados. Debe quedar en claro, que los suelos más fáciles de aplicar remediación son las arenas, mientras que los suelos arcillosos presentan mayor dificultad por sus propiedades particulares (Volke & Velasco 2002). Los suelos presentan estructuras porosas que se distribuyen dependiendo del tamaño del grano, en la ilustración 1 se puede observar un esquema de suelo y su distribución porosa (Viñas 2005).

4.3.8.2. Heterogeneidad

Las zonas de contaminación en ocasiones son extensas, lo que implica que el tipo de suelo no sea el mismo en toda el área, lo que origina problemas de biorremediación. Por ejemplo, un área puede tener tipo de suelo arenoso y arcilloso, lo que implicaría que se tomen medidas para poder aplicar cualquier tecnología. En la ilustración 1 se puede observar que la heterogeneidad del suelo se presenta los tres tipos de granos, con esto se quiere demostrar el tipo de distribución que un suelo puede estar formado (Viñas, 2005).

4.3.8.3. Materia Orgánica

Los suelos están contruidos por presencia orgánica nativa, lo que tienen el nombre como materia orgánica; la cual es los desechos vegetales y animales que se quedan adheridos en el espacio poroso del suelo. Esta materia en cantidades óptimas puede ser beneficioso para tecnologías de remediación aumentando actividades metabólicas de los organismos. Pero un exceso de este material puede impedir la movilidad de los compuestos orgánicos impidiendo un buen desarrollo (Volke & Velasco, 2002; Martínez et al., 2001). En la ilustración 1, se muestra que la materia orgánica tiende a agruparse en las estructuras porosas del suelo, y en ocasiones por el exceso de este, presentar una disminución de la movilidad de fluidos entre el mismo.

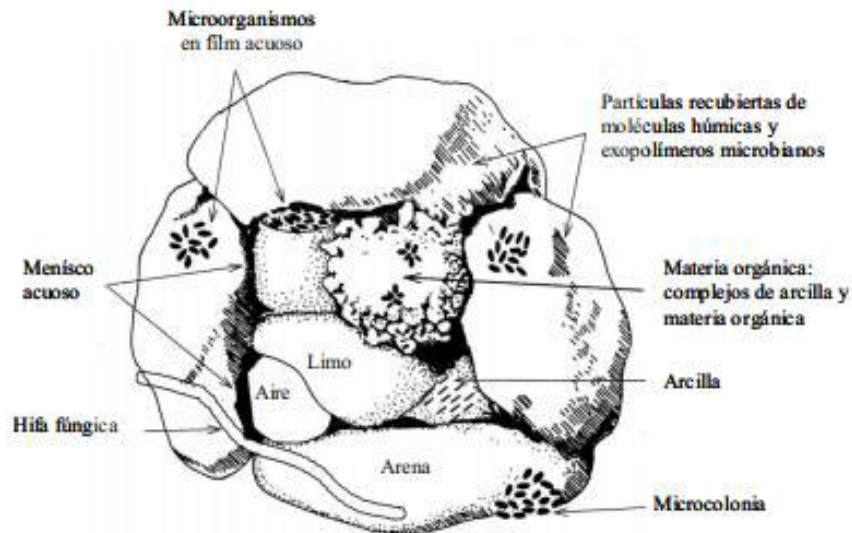


Ilustración 1. Esquema de la disposición en el espacio de los agregados constituyentes de un suelo (Viñas, 2005)

4.4. Selección de los parámetros de biorremediación

Por medio de la identificación, descarte y justificación de los parámetros de biorremediación en la anterior sección se desarrolla la tabla 9, que presenta los parámetros principales que deben ser evaluados para obtener los mejores resultados al momento de aplicar una biorremediación. Estos parámetros para resumir su papel en la biorremediación cumplen con lo siguiente:

- Ser necesarios para comenzar y desarrollar cualquier tecnología de biorremediación
- Aportar información para la toma de decisiones en el desempeño de la biorremediación
- Al modificar estos parámetros tengan una alta influencia en la eficiencia de la biorremediación.

Tabla 9. Parámetros de eficiencia para aplicación de biorremediación

Parámetros seleccionados
Organismos
Nutrientes
Contaminantes
Temperatura
pH
Solubilidad
Características del Suelo: <ul style="list-style-type: none">• Tamaño de partícula• Heterogeneidad• Materia orgánica

Elaborado por: Méndez, 2021

4.5. Lineamientos para desarrollar una biorremediación eficaz

Se presenta una propuesta de lineamientos para desarrollar la tecnología de biorremediación, en base a los parámetros que pueden influenciar en su eficiencia. Según, Adams et al., (1999) “Antes de empezar un proyecto de biorremediación es preferible realizar un estudio de factibilidad para caracterizar las propiedades específicas del sitio” (pg. 162).

El desarrollo de la biorremediación consiste en determinar la optimización de los parámetros que tienen influencia en el proyecto. Por lo tanto, tener el criterio de los requerimientos para establecer la optimización y beneficiar a la biorremediación es indispensable. En la tabla 10, se presenta un resumen de los parámetros y los requerimientos para que la biorremediación presente resultados de calidad. Se debe tener en claro que no todas las condiciones se pueden manejar en un proyecto de biorremediación, ya sea que, existan limitaciones económicas o propias del sitio. Además, al intervenir un parámetro puede ocasionar en la alteración de otro ocasionado aún más problemas. Es aquí en donde el ingenio toma parte, en realizar la toma de decisiones y adaptarse para obtener resultados de calidad.

Tabla 10. Lineamientos para biorremediación

Lineamientos	
Parámetros	Requerimientos
Organismos	<p>Los organismos pueden ser nativos o introducidos, pero deben tener la característica de ser degradadores de hidrocarburos.</p> <p>Poseer la capacidad para adaptarse a las condiciones del sitio y de la misma manera de no tener problemas si se modifican los parámetros iniciales.</p>
Nutrientes	<p>La adición de nutrientes en el sitio es indispensable para fomentar los procesos metabólicos de los organismos degradadores de crudo.</p> <p>Los nutrientes esenciales y su rango óptimo para la biorremediación son (Adams, 1999):</p> <p>Nitrógeno: >100ppm Fósforo >10 ppm Potasio > 1ppm</p>
Contaminante	<p>Determinar las propiedades del crudo que contamina el sitio es necesario.</p> <p>Mientras que el crudo tienda a pesado los esfuerzos para degradarlo serán mayores y si el crudo tiende a liviano será más fácil de intervenir.</p>
Temperatura	<p>El rango en que la temperatura beneficia a la biorremediación se encuentra entre 20 a 30 °C (Viñas, 2005; Menn et al., 2000).</p>

pH	El pH adecuado se encuentra entre un rango de 6 a 8 (Osorio, 2012; Margesin & Schinner, 2001; Dibble & Bartha, 1979).
Solubilidad	Para que la transformación biológica se origine, es necesario que se encuentre en solución (FCH, 2019). El rango de solubilidad que se requiere va a depender propiamente de la biorremediación en sí.
Tamaño de partícula	Los suelos presentan estructuras porosas que se distribuyen dependiendo del tamaño de partícula, por lo tanto, los suelos arenosos son más fáciles de aplicar biorremediación y la dificultad aumenta con suelos arcillosos.
Heterogeneidad	La continuidad del suelo puede alterar el proyecto de biorremediación, por la presencia de diferentes tipos de suelo.
Materia orgánica	La presencia de materias orgánicas en la zona permite fomentar los procesos metabólicos de los organismos que degradan hidrocarburo.

Elaborado por: Méndez, 2021

4.6. Ventajas de la biorremediación

La biorremediación es una tecnología que se aplica para remediar suelos afectados por agentes contaminantes, pero no puede ser catalogado como el único proceso para solucionar la contaminación del medio ambiente. Lo que conlleva a varias preguntas; ¿Por qué sobresale del resto de tecnologías de remediación y qué ventajas brindan al realizar un proyecto de biorremediación?

Las respuestas de las interrogantes son simples, la biorremediación se destaca porque presenta una solución para tratar la contaminación de una manera orgánica, es decir, que para su desarrollo se va a basar en los procesos degradativos por parte de organismos. La adición de sustancias químicas no se aplica, con excepción de ciertos casos, pero tomando las medidas para que no tenga el mayor efecto negativo. De la misma manera, la biorremediación presenta mejores resultados que los tratamientos físicos, porque estos últimos son invasivos alterando la zona en gran medida para eliminar la contaminación. Según Suárez (2013), la biorremediación, “Es una tecnología poca invasiva y generalmente no requiere componentes estructurales o mecánicos que signifiquen una amenaza para el medio” (pg. 22). Como se demuestra brevemente este tipo de tratamiento resulta más beneficioso aplicarlo que otros, porque reduce los daños secundarios al ambiente. Por lo tanto, las principales ventajas que genera la biorremediación se encuentran en el costo para desarrollar un proyecto de este tipo, el tipo de proceso orgánico para eliminar contaminantes y los productos que se obtienen después de aplicar la tecnología no son peligrosos (Adams et al.,1999; Volke & Velasco, 2002). En la tabla 11, se presenta un resumen de las ventajas de la biorremediación.

Tabla 11. *Ventajas de la Biorremediación*

Ventaja	Descripción
Costos	Desarrollar un proyecto de biorremediación presenta costos bajos si se compara con otros tipos de tecnologías de remediación (Suárez, 2013).
Tipo de proceso	El proceso que presenta la tecnología es natural, es decir que no requiere la adición de elementos químicos para fomentar los procesos degradativos (Rodríguez, 2013).

Tipo de equipo	El equipo se entiende como las facilidades que presenta el proyecto, por lo que, la biorremediación requiere de un equipamiento mínimo para desarrollarse (Volke & Velasco, 2002; Rodríguez, 2013).
Resultados después de aplicar la biorremediación	Los contaminantes se pueden transformar en sustancias no peligrosas para el ambiente (Adams et al., 1999).
Combinación de Tecnologías	Dependiendo de la gravedad de la contaminación, se puede aplicar un conjunto de tipos de biorremediación, que se conoce como tren de tratamiento (Volke & Velasco, 2002).

Elaborado por: Méndez, 2021

4.7. Desventajas de la biorremediación

Como todo proceso de ingeniería la biorremediación no puede alcanzar una eficiencia del cien por ciento, es decir que en ciertos casos aplicar esta tecnología puede presentar una eliminación no total del contaminante. Las principales razones para que no se pueda realizar de manera óptima la biorremediación es por una mala caracterización de los factores del sitio, o en si no entender las limitaciones del sitio y no poseer la capacidad para adaptarse y solucionar los problemas que se originen. En la tabla 12, se presenta algunas desventajas de la biorremediación en general.

Tabla 12. Desventajas de la Biorremediación

Desventaja	Descripción
Tipo de contaminante	Algunos contaminantes como el hidrocarburo debido a su viscosidad o baja solubilidad hacen que los procesos degradativos sean lentos o en ocasiones no se logren (Adams et al., 1999).
Condiciones del sitio	La mala caracterización de las propiedades físicas y químicas del sitio pueden resultar en malas interpretaciones del desarrollo de la biorremediación (Salva, 1998).
Geografía	Por otra parte, las condiciones del sitio hacen que la biorremediación al ejecutarla tenga comportamientos no esperados como pérdida de nutrientes o humedad (Suárez, 2013; Volke & Velasco, 2002).

Elaborado por: Méndez, 2021

CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones

- Por medio de esta investigación se determino que una alternativa para tratar zonas contaminadas con hidrocarburos es la biorremediación, porque presenta ventajas notables como bajos costos, amigable con el medio ambiente y altos niveles de degradación de hidrocarburo. Por otra parte, las desventajas de esta tecnología se determinan que en general son producidas por mala ejecución de la biorremediación o por mala caracterización de propiedades físicas y químicas que intervienen.
- En base a la evaluación bibliográfica correspondiente, se llegó a la conclusión que la optimización implica conocer y tener la capacidad de manejar varios tópicos, con el fin de lograr buenos resultados.
- Se establecieron los parámetros que influyen en la biorremediación y alteran la eficiencia de su éxito; como proceso la biorremediación no se lo puede catalogar como sencillo, entre los cuales se menciona organismos, nutrientes, contaminante, temperatura, pH, solubilidad y características del suelo.
- Se establecieron lineamientos en base a los parámetros que influyen en la biorremediación, los cuales son conformados con sus respectivos requerimientos a seguir para que se efectuó la mayor eficiencia, sin generar alteraciones secundarias.

6. Bibliografía

- Abu, G. (2017). *Process and Phenomenal Microbiology: how microbes were created to create jobs for mankind. An Aninaugural lecture by professor Gideon Orkwagh Abu*. University of Port Hharcourt.
- Acuña, A., Pucci, O. H., & Pucci, G. N. (2008). Caracterización de un proceso de biorremediación de hidrocarburos en deficiencia de nitrógeno en un suelo de Patagonia Argentina. *Ecosistemas 17 (2)*, 85-93.
- Adams, R., Domínguez, V., & García, L. (1999). Potencial de la biorremediación de suelo y agua impactados por petróleo en el trópico mexicano. *Terra Latinoamericana, vol. 17, núm. 2*, 159-174.
- Agbaji, J., Nwaichi, E., & Abu, G. (2020). *Optimized Production of Bioremediation Agent for Application in theEco-Recovery of Oil Spill Site*. Nigeria: SPE, SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS.
- Alexander, M. (1999). *Biodegradation and Bioremediation*. San Diego: Academic Press, Inc.
- Álvaro, C., Arocena, L. A., Martínez, M. Á., & Nudelman, N. (2017). Biodegradación aerobia de fracciones de hidrocarburos provenientes de la actividad petrolera en un suelo de la región patagonia norte, Argentina. *Rev. Int. Contam. Ambie. 33(2)*, 247-257.
- Anza Cruz, H. G., Orantes Calleja, P. D., González Herrera, R., Ruíz Marín , A., Espiniza Medinilla, E., Martínez Salinas, R. I., . . . Vera Toledo, P. (2016). Biorremediación de suelos contaminados con aceite automotriz usados mediante sistema de biopilas. *Espacio I+D, Innovación más Desarrollo Vol v, N°12 Especial*, 50-77.
- Aránguez, E., Ordóñez, J. M., Serrano, J., Aragonés, N., Fernández, R., Gandarillas, A., & Galán, I. (1999). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. *Rev. Esp Salud Pública*, 123-132.
- Baker, K. (1994). Bioremediation of surface and subsurface soils. En: *Bioremediation. McGraw-Hill*, 203-259.

- Ballester, F. (2005). Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. *Rev Esp Salud Pública* 2005; 79, 159-175.
- Cabrera, J. (2001). *El impacto de las conferencias de Río y Estocolmo sobre las políticas y la legislación ambiental en alc.* Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Cambarieri, L., Pucci, G., & Acuña, A. (2021). Optimización de un proceso de bioestimulación en un suelo de Río Gallegos, Argentina, para su utilización en biorremediación hidrocarburos. *ecosistemas Revista de Ecología y Medio Ambiente* , 1-10.
- Cerón, L. E., & Arostizábal, F. A. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y Fósforo en suelos. *Rev. Colomb. Biorecnol. Vol. XIV No. 1*, 285-295.
- Deuren, V., & Ledbetter, J. (1997). *Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide.* Technology Innovation Office, EPA.
- Di Paola, M. M. (2010). *Biorremediación: vinculaciones entre investigación, desarrollo y legislación.* Argentina: Universidad de Buenos Aires; CEUR-CONICET.
- Dibble, J., & Bartha , R. (1979). Effect of environmental parameters on the biodegradation of oil sludge. *Appl.Env. Microbiol.* 37, 729-739.
- Dirección General de Medio Ambiente. (2000). *Libro Blanco sobre responsabilidad ambiental.* Luxemburgo: Comunidades Europeas,2000.
- Effendi, A. J., McMillen, S., Kong, D., Wisono, T., & Syakir, J. (2017). *Strategies for Enhancing Biorremediation for Hydrocarbon-Impacted Soils.* Lumpur, Malaysia: Society of Petroleum Engineers.
- Elnahas, M., Hou, L., Wall, J., & Majumder, E. (2020). Bioremediation Potential of *Streptomyces* sp. MOE6 for Toxic. *MDPI*, 47-68.
- Encinas, M. D. (2011). *Medio Ambiente y Contaminación. Principios Básicos.*
- EPA, E. (2001). *A citizen´s Guide to Phytoremediation.* EPA 542-F-01-002.2p.
- Estado, B. O. (n.d.). *Ley 38/1972, de 22 de diciembre de Protección del Medio Ambiente Atmosférico.* BOE26/12/72.

- FCH, F. (2018). *Manual de Tecnologías de Remediación de Sitios Contaminados*. CORFO.
- Fernández de Córdoba, P. I., & Humbser, J. F. (2014). *Evaluación de la toxicidad del suelo durante y después de un proceso de biorremediación de hidrocarburos aromáticos policíclicos HAPs*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana Sede-Cuenca; Carrera de Ingeniería Ambiental.
- Fernández, A. (2012). El agua: un recurso esencial. *Química Viva*, vol 11, Núm 3, 147-170.
- Fernández, M. T. (2007). Fósforo: amigo o enemigo. *ICIDCA*, 51-57.
- García, S. C. (2011). Bacterias simbióticas fijadoras de nitrógeno. *Universidad de Salamanca*, 173-185.
- Garzón, J. M., Rodríguez, J. P., & Hernández, C. (2017). Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. *Universidad y Salud; Artículo de revisión*, 309-318.
- Guerrero, P., Quintero, R., Espinoza, V., Benedicto, G., & Sánchez, M. (2012). Respiración de CO₂ como indicador de la actividad microbiana en abonos orgánicos de Lupinus. *Terra Latinoamerica*, 355-362.
- Hernández de la Cruz, Y. (2019). *Uso de Bacillus coagulans para la biorremediación de sedimento contaminado por hidrocarburos en el ejido el Sacrificio Tuxpan, Veracruz*. Tuxpan: Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias.
- Herrero, M. J. (2016). *Comparativa de métodos de descontaminación de suelos afectados por hidrocarburos. Aplicación a la obra del Ave de Málaga*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Jiménez Hernández, V. (2020). *Desarrollo de una Metodología Mediante Acoplamiento de Bioaugmentación, Bioestimulación y Bioventeo para la Remediación de un Suelo Costero Contaminado con Hidrocarburos Intemperizados*. México: CIATEC.

- Jollivet M., Pave A. (1992). L, environnement: questions et perspectives pour la recherche. Lettre du Programme Interdisciplinaire de recherche en Environnement du CNRS, n°6. , 5-29.
- Li, H., Li, Y., Bao, M., & Li, S. (2021). Solid inoculants as a practice for bioaugmentation to enhance bioremediation of hydrocarbon contaminated areas. *Chemosphere* 263.
- Lima, S. G. (2011). *Ciclo Hidrológico*. Global Water Partnership.
- Margesin, R., & Schinner, F. (1997). Bioremediation of diesel-oil-contaminated alpine soils at low temperature. *Appl. Microbial Biotechnol*, 462-468.
- Margesin, R., & Schinner, F. (2001). Biodegradation and bioremediation of hydrocarbons in extreme environments. *Appl Microbial Biotechnol*, 650-663.
- Martín, C., González, A., & Blanco, M. J. (2004). Tratamientos biológicos de suelos contaminados: contaminación por hidrocarburos. Aplicaciones de hongos en tratamientos de biorrecuperación. *Rev Iberoam Micol*, 103-120.
- Martínez, A. (2019). EL NUEVO MARCO JURÍDICO EN MATERIA AMBIENTAL EN ECUADOR. ESTUDIO SOBRE EL CÓDIGO ORGÁNICO DEL AMBIENTE. *Actualidad Jurídica Ambiental*, n.89, Sección "Comentarios de legislación", 1-32.
- Martínez, A., Pérez, M., Pinto, J., Gurrola, B., & Osorio, A. (2011). Biorremediación de suelo contamiando con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes. *Rev. Int. Contam. Ambien.* 27(3) 241-252,2011, 242-252.
- Martínez, V. E., & López, F. (2001). Efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso. *Terra Latinoamericana*, vol. 19, núm. 1, 9-17.
- Matute, M. (2016). *Los derechos de la naturaleza en la Constitución Ecuatoriana*. Cuenca: Universidad del Azuay, Facultad de Derecho.
- Medina, J., García, F., & Paricaguán, B. (2014). Biodegradación de petróleo por microorganismos autóctonos en suelos contamiandos provenientes de la bahía de Amuay del Estado Falcón. *Revista INGENIERÍA UC*, vol. 21, núm 1, 62-69.

- Menn, F.-M., Easter, J., & Sayler, G. (2000). Enhancement of pentachlorophenol degradation in soil through induced anaerobiosis and bioaugmentation with anaerobic sewage sludge. *Env. Sci. Technol.* 22:1411-1414.
- Mila, F. L., & Yáñez, K. (2020). *El constitucionalismo ambiental en Ecuador*. Actualidad Jurídica Ambiental m.97, Sección " Artículos doctrinales".
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (2021). *El Código Orgánico Ambiental*. Retrieved from Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica: <https://www.ambiente.gob.ec/codigo-organico-del-ambiente-coa/>
- Mosquera, T. (2016). *Eficiencia del lombricompostaje en la biorremediación de suelos degradados por la minería a cielo abierto en el municipio de unión panamericana, departamento del chocó*. Manizales, Colombia: Universidad de Manizales, Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas.
- Murray, S. P. (2020). *El medio ambiente como sujeto de derecho: problemas en torno a la captura de su representación*. Santiago de Chile: Universidad de Chile; Facultad de Derecho.
- Naciones Unidas. (1972). *INFORME DE LA CONFERENCIA DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL MEDIO HUMANO*. Nueva York: ONU.
- Naciones Unidas. (1992). *Informe de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. Nueva York: ONU.
- Narváez, S., Gómez, M. L., & Martínez, M. M. (2008). Selección de bacterias con capacidad degradadora de hidrocarburos aisladas a partir de sedimentos del caribe colombiano. *Contribución No 1006 del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR*, 61-75.
- Obiakalaje, U., Makinde, O., & Amakaromo, E. (2015). Biorremediación de suelos contaminados con petróleo crudo mediante el uso de residuos animales. *International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation*. Vol 3, N° 3, 79-85.
- Ofoegbu, R., Momoh, Y., & Nwaogazie, I. (2015). Biorremediación de suelos contaminados con petróleo crudo usando fertilizantes orgánicos e inorgánicos. *Petroleum & Environmental Biotechnology*, 1-6.

- ONU. (1993). *Resoluciones y Decisiones del Consejo Económico y Social*.
- ONU. (2020). *Programa para el Medio Ambiente*. Retrieved from <https://www.unenvironment.org/es/sobre-onu-medio-ambiente>
- Ordoñez, J. J. (2012). *Cartilla técnica: ciclo hidrológico*. Lima-Perú: Sociedad Geográfica de Lima.
- Osorio, N. (2012). pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo integral del suelo y nutrición vegetal*, 1-4.
- Paredes, H. (2014). *Derechos de la naturaleza en el ordenamiento constitucional vigente*. Quito: Universidad Central del Ecuador, Facultad de Jurisprudencia.
- Patiño, C., & Sanclemente, O. (2014). Los microorganismos solubilizados de fósforo (MSF): Una alternativa biotecnológica para una agricultura sostenible. *Ciencias Agrícolas, Vol. 10 No.2, 2014*, 288.297.
- Peele Karlapudi, A., Venkateswarulu, T., Tammineedi, J., Kanumuri, L., Kumur Ravuru, B., Dirisala, V., & Prabhakar Kodali, V. (2018). Role of biosurfactants in bioremediation of oil pollution-a review. *Petroleum 4*, 241-249.
- Pérez Pozo, M. (2018). *Evaluación de la biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos utilizando Pseudomonas fluorescens*. Quito-Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, Ingeniería en Biotecnología de los Recursos Naturales.
- Plasencia, A., Benimeli, M. F., Corbella, R., Andina, D., Sanzano, A., Sosa, F., & Fernández, J. (2019). El nitrógeno del suelo. *Universidad Nacioanal de Tucumán*, 1-11.
- Taylor (1994). *Principios de la administración científica*. Buenos Aires. El Ateneo.
- Rivera, P., Rivera, J., Rodríguez, L., De la Garza, F. R., & Castro, B. (2018). Bioestimulación y biorremediación de recortes de perforación contaminados con hidrocarburos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, , 250-262.

- Rodríguez, I. (2013). *Reciclado en suelos de Lodos de Refinería: Nuevas Aproximaciones para la Biodegradación de Hidrocarburos Mediante el Manejo de Enmiendas Orgánicas*. Murcia: Universidad de Murcia .
- Rodríguez, R. (2017). *Fundamentos de Química General: Disoluciones, Propiedades coligativas y Gases Ideales*. Santa Elena-Ecuador: Universidad Estatal Península de Santa Elena.
- Rozados, M. J., Suárez, M., & Méndez, H. (2004). Distribución del tamaño de partículas en suelos forestales de Galicia (No España) mediante la aplicación de tecnología de difracción láser. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.*20, 209-214.
- Ruiz, L., & Casa de la Paz. (1999). *LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL Antecedentes, actividades y noticias*. Santiago: Ministerio de Educación.
- Salva, S. (1998). Situación actual y perspectivas de la Biorremediación de suelos y acuíferos en México. *BioTecnología Vol. 3*, 71-76.
- Simbaña, C. (2016). *Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de la parroquia Taracoa en Francisco de Orellana, mediante el hongo Pleurotus ostreatus*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Soto, C., Gutiérrez, S., Rey, A., & González, E. (2010). Biotransformación de metales pesados presentes en lodos ribereños de los ríos Bogotá y Tunjuelo. *unicolmayor*, 195-205.
- Speight, J. G. (2006). *The Chemistry and Technology of Petroleum Fourth Edition*. Laramie, Wyoming: CRC Press; Taylor & Francis Group.
- Speight, J. G. (2016). *Handbook of Ppetroleum Refining*. CRC Press.
- Suárez, R. M. (2013). *Guía de métodos de biorremediación para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos*. Bogotá-Colombia: Universidad Libre; Instituto de Postgrados; Ingeniería Especialización en Gerencia Ambiental.
- Vallejo, V., Sandoval, J., Garagoa, S., & Bastos, J. (2016). Evaluación del efecto de la bioestimulación sobre la biorremediación de hidrocarburos en suelos contaminados con alquitrán en Soacha, Cundinamarca - Colombia. *Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos*, 354-361.

- Velásquez, J. A. (2017). Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental, Volumen 8 Número 1*, 151-167.
- Viñas, M. (2005). *Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos: caracterización microbiológica química y ecotoxicológica*. Universidad de Barcelona .
- Volke, T., & Velasco, J. (2002). *Tecnologías de remediación para suelos contaminados* . México: Instituto Nacional de Tecnología.
- Zaban, M., Mahmoud, M., AlHarbi, M., & Bahatheq, A. (2020). *Bioremediation of Crude Oil by Rhizosphere Fungal Isolates in the Presence of Silver Nanoparticles*. Egypt: International Journal of Environmental Research and Public Health .
- Zhang, Y., & Miller, R. (1992). Enhanced octadecane dispersion and biodegradation by *Pseudomonas rhamnolipid* surfactant (Biosurfactant). *Appl. Environ. Microbiol.* *60*, 2101-2106.
- Zommere, Z., & Nikolajeva, V. (2017). Inmovilización de la asociación bacteriana en perlas de alginato para la biorremediación de terrenos contaminados por petróleo. *Environmental and Experimental Biology* , 105-111.