



Universidad **César Vallejo**

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Factores que Influyen en la Biorremediación de Suelos
Contaminados por Petróleo; Tendencias y Brechas. Revisión
Sistemática, 2022**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
Ingeniero Ambiental

AUTOR:

Oviedo Aucca, Frankie (ORCID: [0000-0002-7432-0360](https://orcid.org/0000-0002-7432-0360))

ASESORA:

Mg. Cabello Torres, Rita Jaqueline (ORCID: [0000-0002-9965-9678](https://orcid.org/0000-0002-9965-9678))

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Calidad y Gestión de los Recursos Naturales

LIMA – PERÚ

2022

Dedicatoria

A Dios mi redentor, quién me guía siempre por el buen sendero, el que me darne fuerza para seguir delante y no decaer antes las adversidades de la vida que se presentan.

A mi hermosa madre, padre y hermano mi más grande afecto, muchas gracias por el incondicional soporte en el logro de mis éxitos personales.

El autor.

Agradecimiento

Agradezco a mis familiares, amigos, a esta casa superior de estudios por brindarme la generosidad de alcanzar el ansiado título profesional de Ingeniero Ambiental, a mi asesora, por asesorarme y dedicar su tiempo en la elaboración de mi tesis, y a Sherly Calizaya Solís que en momentos de ansiedad o desesperación estuvo ahí para robarme una sonrisa y hacerme olvidar los malos momentos e impulsarme a seguir adelante.

El autor.

Índice de contenidos

| | |
|---|------|
| Dedicatoria..... | ii |
| Agradecimiento | iii |
| Índice de contenidos | iv |
| Índice de tablas | v |
| Índice de gráficos y figuras..... | vi |
| Índice de Abreviaturas | vii |
| Resumen | viii |
| Abstract..... | ix |
| I. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| II. MARCO TEÓRICO | 5 |
| III. METODOLOGÍA | 24 |
| 3.1. Tipo y diseño de investigación | 24 |
| 3.2. Categorías, sub categorías y matriz de categorización apriorística | 24 |
| 3.3. Escenario de estudio..... | 26 |
| 3.4. Participantes | 26 |
| 3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos | 26 |
| 3.6. Procedimientos | 27 |
| 3.7. Rigor científico | 28 |
| 3.8. Método de análisis | 29 |
| 3.9. Aspectos éticos | 29 |
| IV. RESULTADO Y DISCUSIÓN..... | 30 |
| V. CONCLUSIONES..... | 45 |
| VI. RECOMENDACIONES..... | 46 |
| REFERENCIAS | 47 |
| ANEXOS..... | 55 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Base de Datos..... | 25 |
| Tabla 2: Técnicas de biorremediación de suelos contaminados..... | 29 |
| Tabla 3: Factores que influyen en la fitorremediación..... | 34 |
| Tabla 4: Beneficios de las técnicas de biorremediación para suelos contaminados por hidrocarburos..... | 40 |
| Tabla 5: Beneficios de biorremediación de suelos..... | 43 |

Índice de gráficos y figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1: Mecanismos de Biorremediación microbiana para reducir contaminantes. | 5 |
| Figura 2: Ruta metabólica de biodegradación aeróbica de hidrocarburos alifáticos. | 10 |
| Figura 3: Ruta metabólica de biodegradación aeróbica de hidrocarburos aromáticos. | 11 |
| Figura 4: Ruta metabólica de biodegradación anaeróbica de hidrocarburos por bacterias (A) acetogénicas, (B) metanogénicas y (C) sulfato-reductoras. | 12 |
| Figura 5: Ruta metabólica de biodegradación anaeróbica de hidrocarburos a través de la (A) adición de fumarato y (B) carboxilación C3..... | 13 |
| Figura 6: Capa superior de la región del suelo | 15 |
| Figura 7: Disponibilidad de nutrientes para la carga bacteriana. | 16 |
| Figura 8: Diagrama de flujo de selección de artículos. | 27 |
| Figura 9: Influencia de la temperatura en degradación de hidrocarburos | 37 |
| Figura 10: Influencia del pH en degradación de hidrocarburos..... | 38 |

Índice de Abreviaturas

CO₂: Dióxido de carbono.

NO₃-. Nitratos.

SO₄-. Sulfatos.

Mn₄: Manganeso.

PQQ: Pirroloquinolina quinona.

ADH: Quinoproteínas.

Cu: Cobre.

Pb: Plomo.

Zn: Zinc.

TPH: Hidrocarburos totales de petróleo.

MF: Fenton modificado.

HAP: Hidrocarburos poliaromáticos.

Resumen

El estudio tuvo como objetivo general Evaluar los factores que influyen en la Biorremediación de suelos contaminados por petróleo; tendencias y brechas, 2022. El tipo de investigación fue aplicada y el diseño fue narrativo tópico y la metodología se basó en la técnica de recolección de información utilizado análisis documental en las interpretaciones de artículos y revistas indexadas no menor de 5 años que abarco entre el año 2018 y 2022, se tuvo en cuenta los objetivos, categorías y subcategorías enfocados a en los factores que influyeron en las técnicas de Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos, además de sus tendencias y Brechas, contrarrestando el grado de contaminación y volviendo a su estado natural del suelo. Se concluyó que se conocieron que las técnicas de Biorremediación en la degradación de los hidrocarburos en suelos contaminados fueron la Fitorremediación, la Bioestimulación, Bioaumentación, Biorremediación intrínseca, Compostaje que ayudaron a la recuperación del estado natural del suelo. La recomendación fue que a las autoridades cuando se produzca un derrame de petróleo optar por las técnicas de Biorremediación para degradación o eliminación de los hidrocarburos que se encuentren presentes en los suelos contaminados ya que son técnicas económicas y ecoamigable con el medio ambiente

Palabras clave: Factores, Técnicas, Biorremediación, hidrocarburos, Tendencias y Brechas

Abstract

The general objective of the research was to evaluate the factors that influence the bioremediation of soils contaminated by oil; trends and gaps, 2022. The type of research was applied and the design was topical narrative and the methodology was based on the information collection technique used documentary analysis in the interpretations of articles and journals indexed for no less than 5 years that range between In the years 2018 and 2022, the objectives, categories and subcategories focused on the factors that influenced the bioremediation techniques of soils contaminated by hydrocarbons were taken into account, in addition to their trends and gaps, counteracting the degree of contamination and returning to its original state. soil nature. It was concluded that the Bioremediation techniques in the degradation of hydrocarbons in contaminated soils were Phytoremediation, Biostimulation, Bioaugmentation, Intrinsic Bioremediation, Composting that helped the recovery of the natural state of the soil. The recommendation was that the authorities, when an oil spill occurs, opt for Bioremediation techniques for degradation or elimination of hydrocarbons that are present in contaminated soils, since they are economical and eco-friendly techniques with the environment.

Keywords: Factors, Techniques, Bioremediation, hydrocarbons, Trends and Gaps

I. INTRODUCCIÓN

La demanda y el uso de productos de hidrocarburos derivados del petróleo han provocado la contaminación ambiental al aire, agua y suelo. Desafortunadamente, la liberación de contaminantes de hidrocarburos al suelo, naturales o antropogénicos, afecta los componentes bióticos y abióticos del ecosistema. (Valenzuela et al., 2021, p.24). Para remediar la contaminación con varios contaminantes de hidrocarburos, muchos investigadores han demostrado que los métodos físicos, químicos y biológicos se usan comúnmente para tratar sitios contaminados (Varjani et al., 2020, p.12).

Además, la Biorremediación es un enfoque biológico, rentable, simple, eficiente, no invasivo, aplicable in situ, ecológicamente amigable, sostenible y aplicable (Kebede et al., 2021).

La técnica de Biorremediación comprende la Fitorremediación (rizodegradación, fitoextracción, fitovolatilización, fitodegradación, rizofiltración y rizoestabilización), micorremediación, remediación microbiana y ficorremediación (Hoang et al., 2021).

Los estudios especifican que la Biorremediación microbiana (el uso de microorganismos: bacterias, hongos y microalgas) es la más eficiente para transformar los contaminantes en una forma menos tóxica y menos móvil o para mineralizar los contaminantes de hidrocarburos en H₂O, CO₂ y biomasa microbiana. Entre varios microorganismos, las bacterias son los más activos y los principales degradadores de hidrocarburos (Ajona y Vasanrhi., 2021).

Los microorganismos que pueden sobrevivir y proliferar en los contaminantes de hidrocarburos como nutrientes han evolucionado debido a la introducción de contaminantes de hidrocarburos en el medio ambiente (Feng et al., 2021). Se podrían obtener mayores capacidades metabólicas a través de mutaciones y transferencias de genes horizontales/verticales, adquiriendo así genes cuyos productos están involucrados en la descomposición de los hidrocarburos. Aunque tales microbios tienen el potencial de degradar los contaminantes de

hidrocarburos, ciertos factores limitantes (bióticos y abióticos) inciden en la biodegradación eficiente de los contaminantes (Perini et al 2020).

Los componentes que intervienen en el tratamiento microbiano de los hidrocarburos del suelo incluyen propiedades microbiológicas (consorcios microbianos, potencial metabólico, densidad de población, capacidad para producir biosurfactantes y competencia), las propiedades fisicoquímicas de los contaminantes (estructura química, concentración, toxicidad y biodisponibilidad) y factores ambientales (tipo de suelo, temperatura, pH, oxígeno, salinidad, nutrientes y disponibilidad de agua) (Li et al., 2020). Esos factores alteran las actividades microbianas, las actividades enzimáticas degradantes y la degradación de hidrocarburos en general. Esta es una indicación de que la Biorremediación bacteriana podría ser efectiva y mejorada si estos factores se manipulan, optimizan y regulan (Sales et al., 2020).

Asimismo, en cuanto a las categorías de la investigación referente a las técnicas de biorremediación, se propuso aquellas más usadas como la Fitorremediación, Bioestimulación, Bioaumentación, Biorremediación intrínseca, Compostaje en base al mejoramiento de los suelos contaminados por hidrocarburos. Además de la categoría factores, físico, químicos y microbiológico que influyeron en la biorremediación se consideraron las disponibilidades de bacterias, formación de biopelículas, potencial redox de las bacterias, efecto del biosurfactante, región del suelo, disponibilidad de nutrientes, temperatura, pH, salinidad. En cuanto a los beneficios de las técnicas de biorremediación se tuvo como costos bajos, ahorro de tiempo, facilidad de tratamiento, proceso simple en cuanto a la descontaminación del suelo con presencia de hidrocarburos.

Seguidamente referente al vacío de conocimiento la investigación resalta los procedimientos empleados en la remediación de suelos alterados y la poca investigación en el mundo científico con artículos de alta relevancia de acuerdo a la tesis titulada en cuanto a los factos y técnicas que influyeron en la biorremediación.

El estudio tuvo como objetivo la finalidad de evaluar las variables AD y GB que determinaron el éxito o limitaciones de un proceso de biorremediación en suelos

afectados por el derrame de petróleo sus derivados y las tendencias en las técnicas de la biorremediación.

Por ello, la investigación se enfocó en el crecimiento económico, maximizando la prevención y minimizando el impacto de los hidrocarburos en los ecosistemas, preservando así su función y asegurando que las futuras generaciones satisfagan sus necesidades. Todo esto surgió para un buen desarrollo sostenible, establecido a través de la participación humana en el perfeccionamiento de la calidad del suelo y los factores ambientales.

Esta revisión se centró en los logros y las perspectivas futuras de la biotecnología en el tratamiento de la contaminación biológica generada industrialmente en todo el mundo, y analiza varias tecnologías; por lo tanto, los estudios de casos relevantes serían útiles para analizar el uso de la biotecnología para la descontaminación ambiental y el desarrollo sostenible, sus ventajas y desventajas, el pronóstico para el futuro.

La Justificación social, se dio a conocer a lo importante que es el componente suelo para el desarrollo de actividades, agrícolas, industriales, etc. Que por un mal manejo de las sustancias tóxicas como los hidrocarburos de las industrias de refinación contaminan por medio de derrames al suelo, perjudicando la biodiversidad de especies que habitan y cumplen múltiples funciones en la calidad del suelo. **Justificación económica**, la mala calidad afecta el desarrollo de actividades económicas, pérdidas de producción, pérdida de biodiversidad de especies que se encuentran en las áreas afectadas, para ello con la Biorremediación se disminuye o controla los agentes tóxicos que se encuentran presentes producto de los derrames de hidrocarburos. **Justificación metodológica** Se sustenta en información recopilada de bases de datos como Scopus, ScireDirect y EBSCO. Por tratarse de un estudio cualitativo, para ello se realizó una búsqueda de información bibliográfica existente sobre las publicaciones de artículos indexados por diversos autores, lo cual fue necesario para enriquecer el conocimiento del impacto de diferentes componentes en la tecnología de Biorremediación en suelos contaminados. **Justificación ambiental**, consistió en la evaluación de las técnicas de Biorremediación

aplicadas a través de microorganismo, plantas naturales entre otros que se encontraron en la superficie terrestre, para remover o eliminar hidrocarburos de petróleo presentes en el suelo perjudicando la biodiversidad existente y la fertilidad del suelo. Por lo tanto, la Biorremediación fue muy eficaz en reducir la toxicidad de los contaminantes productos de los derrames de petróleo.

Por consiguiente, se formula el **problema general**:

PG: ¿Qué factores influyen en la Biorremediación de suelos contaminados por petróleo; tendencias y brechas, 2022?

Seguido de los **problemas específicos**:

PE1: ¿Cuáles son las técnicas de Biorremediación para degradar hidrocarburos en suelos contaminados?,

PE2: ¿Cuáles son los factores que influyen en la Biorremediación para suelos contaminados por hidrocarburos? Y

PE3: ¿Cuál será el beneficio de las técnicas de Biorremediación en suelos contaminados por hidrocarburos?

Seguidamente se formula el **objetivo general**:

OG1: Evaluar los factores que influyen en la Biorremediación de suelos contaminados por petróleo; tendencias y brechas, 2022.

Los objetivos específicos:

OE1: Determinar las técnicas de Biorremediación para degradar hidrocarburos en suelos contaminados.

OE2: Determinar los factores que influyen en la Biorremediación para suelos contaminados por hidrocarburos.

OE3: Conocer los beneficios de las técnicas de Biorremediación en suelos contaminados por hidrocarburos.

II. MARCO TEÓRICO

La **Biorremediación** se refiere a la remoción, destrucción, inmovilización, mineralización o transformación de contaminantes del suelo con el uso de plantas, protozoos, hongos y microalgas y particularmente bacterias y sus productos en presencia de condiciones óptimas, condiciones de métodos de Biorremediación con bajos costos operativos para la remoción o reducción de contaminantes orgánicos e inorgánicos (hidrocarburos, compuestos orgánicos halogenados, solventes orgánicos halogenados, pesticidas y herbicidas no clorados, compuestos nitrogenados y metales pesados (plomo, mercurio, cromo, radionucleidos, etc.) al menos hasta el punto de que no puedan causar un efecto grave en las funciones ecológicas (Kebede et al., 2021).

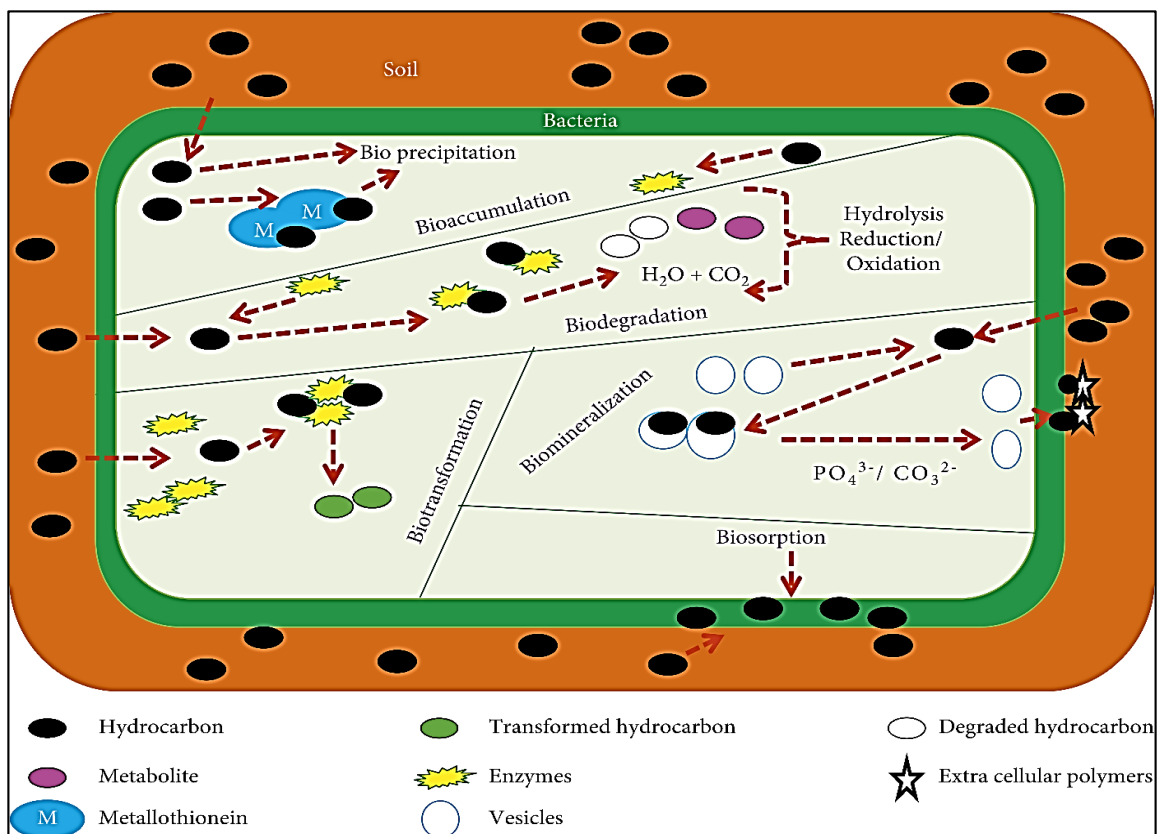


Figura 1: Mecanismos de Biorremediación microbiana para reducir contaminantes.

Fuente: Kebede, (2021).

En la figura 1 se demostró los mecanismos de Biorremediación, donde la Bioprecipitación fue que liberó a los MP presentes el suelo para ser fitorremediador de la planta, bioacumuló el contaminante neto, con el paso del tiempo de metales en los tejidos de las plantas, seguidamente de la biodegradación de los metales en los tejidos de la planta, asimismo la Biotransformación del contaminante en menos riesgoso al ambiente, biomineralización, biosorción.

La **Fitorremediación** es el uso de plantas y microbios relacionados al suelo se utilizan para disminuir la toxicidad y la concentración de contaminantes del suelo en el proceso de Fitorremediación. Los metales pesados, los contaminantes orgánicos como los polinucleares, los bifenilos, los pesticidas, los hidrocarburos y los radionúclidos se pueden eliminar mediante el uso de esta técnica. Es un enfoque tan nuevo en el que se utilizan plantas o una solución de sustitución verde para mitigar el efecto de los MP en el suelo. (Perini et al., 2020)

Rizofiltración es el uso de plantas que pueden absorber contaminantes del agua y otras aguas residuales. Son plantas que tengan un alto potencial de crecimiento en tierra y que sean capaces de absorber, depositar y concentrar contaminantes en áreas al aire libre (Vásquez, 2018).

La fitoestabilización se da mediante la inmovilización de MP en el suelo, la absorción de las raíces de las plantas, la formación de complejos secretores y sedimentarios, la reducción de la biosfera y la estabilización del suelo, la disminución de la contaminación y la neutralización de los procesos de secuestro de este metal contaminante (Huiza, 2019).

La fitoinmovilización se basa en la utilización de plantas capaces de paralizar la contaminación del suelo (Vásquez, 2018).

La fitodegradación se inicia mediante la utilización de plantas y microorganismos para descomponer los CO. En otros casos, las plantas utilizadas se utilizan para acelerar su germinación y, en ocasiones, los contaminantes se biotransforman (Vásquez, 2018).

La fitoextracción es conocido como acumulación vegetativa, hidratación vegetal o absorción vegetativa, donde las plantas pueden acumular metales pesados, por

lo que la extracción vegetal concentra los contaminantes del suelo en mayor proporción que la propia tierra (Huiza, 2019).

La Fitovolatilización se da mediante la evaporación de las plantas, implica la adsorción de compuestos del suelo, mediante las raíces de las plantas, en una forma volátil y luego fuera del cuerpo a través de la transpiración (Huiza, 2019).

La **Bioestimulación** es la adición de factores limitantes del crecimiento, como sustratos, vitaminas, oxígeno, y la modificación de las condiciones ambientales (temperatura, humedad, pH, potencial redox, aceptores de electrones terminales, etc.) en los ambientes contaminados con hidrocarburos (Romero et al., 2019). Esto es importante para mejorar la capacidad metabólica de las bacterias autóctonas degradadoras de hidrocarburos. Cuando los contaminantes de hidrocarburos están muy disponibles, proporcionan un alto contenido de carbono y energía, pero nitrógeno o fósforo para el crecimiento bacteriano. Por lo tanto, existe la necesidad de agregar nutrientes en sitios contaminados con hidrocarburos para aumentar los nutrientes requeridos y estimular el crecimiento de bacterias autóctonas (Kebede et al., 2021).

La **Bioaumentación** es la introducción de células microbianas potenciales o consorcios aislados de otros sitios contaminados o microbios genéticamente modificados para apoyar la remediación. Esta estrategia generalmente se aplica cuando la atenuación natural es ineficaz debido a la baja población degradante de hidrocarburos autóctonos, actividades de descontaminación lentas y situaciones de alto estrés para iniciar el proceso de Biorremediación (Whyte et al., 2021). Para una biodegradación exitosa de hidrocarburos, los inóculos deben ser capaces de metabolizar una amplia gama de contaminantes, no sufrir mutaciones, resistir varios factores bióticos y abióticos, y competir efectivamente con otros microorganismos (depredadores y degradadores de hidrocarburos autóctonos) y pueden alcanzar fácilmente los contaminantes en profundidad a través de los poros del sedimento (Varjani et al., 2019).

La **Biorremediación intrínseca** es el uso de poblaciones microbianas autóctonas para eliminar o desintoxicar contaminantes de hidrocarburos peligrosos en formas menos o no tóxicas. El tiempo esencial requerido para la atenuación natural depende de la contaminación, las condiciones del sitio y la aplicabilidad de bacterias potencialmente degradantes. Esto implica que el uso de la atenuación natural es rentable y eficiente si no hay necesidad de un proceso de remediación complejo (Wu et al., 2021). Por lo tanto, las investigaciones demostraron que esta estrategia es efectiva para degradar el 25% de los contaminantes de hidrocarburos en el suelo. Durante este proceso, los microbios autóctonos utilizan contaminantes de hidrocarburos como las únicas fuentes de carbono y energía en función de sus vías metabólicas naturales (Zhang, 2021).

El **compostaje** es un método mediante el cual se saquean las sustancias orgánicas del suelo contaminado, como el estiércol y los desechos de cultivos. La adición de material orgánico que facilita la producción de una rica población microbiana y eleva la temperatura de la pila. En un tiempo relativamente corto, la estimulación del crecimiento microbiano por los nutrientes agregados da como resultado una biodegradación exitosa (Kebede et al., 2021).

La **Disponibilidad de bacterias** son las bacterias degradadoras de hidrocarburos que se encuentran abundante y ubicuamente en suelos contaminados con hidrocarburos. Esto se debe a que esas bacterias pueden adaptarse fácilmente a los sitios contaminados con hidrocarburos y utilizar el contaminante como fuente de carbono y energía para su metabolismo y crecimiento. La tasa de biodegradación de hidrocarburos está directamente relacionada con la disponibilidad de organismos potencialmente degradantes de hidrocarburos existentes de forma natural en el medio ambiente contaminado (Kebede et al., 2021).

Los **Microorganismos eficientes**, Son un grupo muy grande de organismos que realizan muchas funciones en el suelo y mantienen en orden el ciclo normal de muchas sustancias. Estos organismos crecen naturalmente en el suelo (bacterias, hongos, actinomicetos) y realizan muchas funciones: en particular, descomponen

y/o transforman diversos materiales para formar nutrientes para las plantas. Los principales microorganismos son bacterias fijadoras de nitrógeno: bacterias fijadoras de nitrógeno en la oscuridad, bacterias del ácido láctico: *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei*, *Streptococcus lactis*. Bacterias fotosintéticas: *Rhodospseudomonas platrus*, *Rhodobacter Speroides*. Tipos de levaduras: *Saccharomyces cerevisiae*, *Candida Pracis*. Actinomicetos: *Streptomyces albus*, *S. griseus*. Fermentación fúngica: *Aspergillus oryzae* (Aquino y Franco, 2020)

Las Cepas puras es un grupo de microorganismos que pertenecen a la misma especie y se originan a partir de una célula o espécimen en particular. Además, estas cepas pueden multiplicarse y clonarse en función del interés de su conservación. (Figueroa y Ramos, 2020)

Los **consorcios** es la construcción de consorcios microbianos es una alternativa real para la remoción de mezclas complejas de sustancias y contaminantes. Los microorganismos utilizados en este proceso pueden obtenerse por aislamiento de fuentes naturales o de colecciones de cultivo.

La **Bacterias encapsuladas**, son algunas bacterias que están encerradas en cápsulas protectoras. Esta cápsula ayuda a que las bacterias eviten ser ingeridas por los glóbulos blancos o glóbulos blancos encargados de combatir infecciones. Las bacterias se llaman sobres. (Figueroa y Ramos, 2020)

La **Formación de biopelículas** son las células bacterianas forman una colección en forma de bandadas, esteras o biopelículas. El peso de las biopelículas (hasta un 90%) está compuesto por matriz extracelular y células microbianas. Cuando las comunidades microbianas se encuentran en una situación adversa, reaccionan ante cualquier cambio en el ambiente (estímulos) produciendo polímeros extracelulares que las envuelven y facilitan su unión al sustrato. Esto es importante para cambiar la respuesta con respecto a su crecimiento, intercambio de genes catabólicos, transcripción de genes y/o transferencia horizontal de genes, y un mecanismo de adaptación para condiciones fisicoquímicamente duras y para regular el estado redox de su entorno. Sin embargo, el biofilm puede estar formado por una o grupos de especies microbianas, y su potencial en la biodegradación de hidrocarburos se prueba utilizando algunas especies de especies bacterianas

como *A. borkumensis*, *Pseudomonas sp.*, *Marinobacter hydrochoclasticus* y *Bacillus sp* (Kebede et al., 2021).

El **potencial redox de la bacteria** es cuando las bacterias requieren energía para las funciones biológicas, el mantenimiento celular y la reproducción. Fisiológicamente, esta energía se produce dentro de las células bacterianas a través de una reacción redox. (Ajona y Vasanthi., 2021).

Los mecanismos son utilizados por las bacterias para biodegradar los contaminantes del petróleo pueden ser tanto aeróbicos como anaeróbicos. Durante la biodegradación aeróbica, las bacterias oxidan el aceite, convirtiendo el aceite en dióxido de carbono (CO₂), agua (H₂O). Por otro lado, en la biodegradación anaeróbica, las bacterias reducen los contaminantes y requieren aceptores de electrones como: nitrato (NO₃-), hierro (III) (Fe₃), manganeso (Mn₄), sulfato (SO₄ -) o dióxido de carbono (CO₂).

Hay varios tipos de ADH, algunas son dependientes de la coenzima NAD⁺ o NADP⁺ como aceptor de electrones, mientras que otras usan citocromo o ubiquinona. Las que no son rutas metabólicas dependientes de estas coenzimas, denominadas como ADH NAD(P)⁺ independientes, usan pirroloquinolina quinona (PQQ) como grupo prostético, y comúnmente se nombran como quinoproteínas ADH (Dawson et al. 2020, p.5)

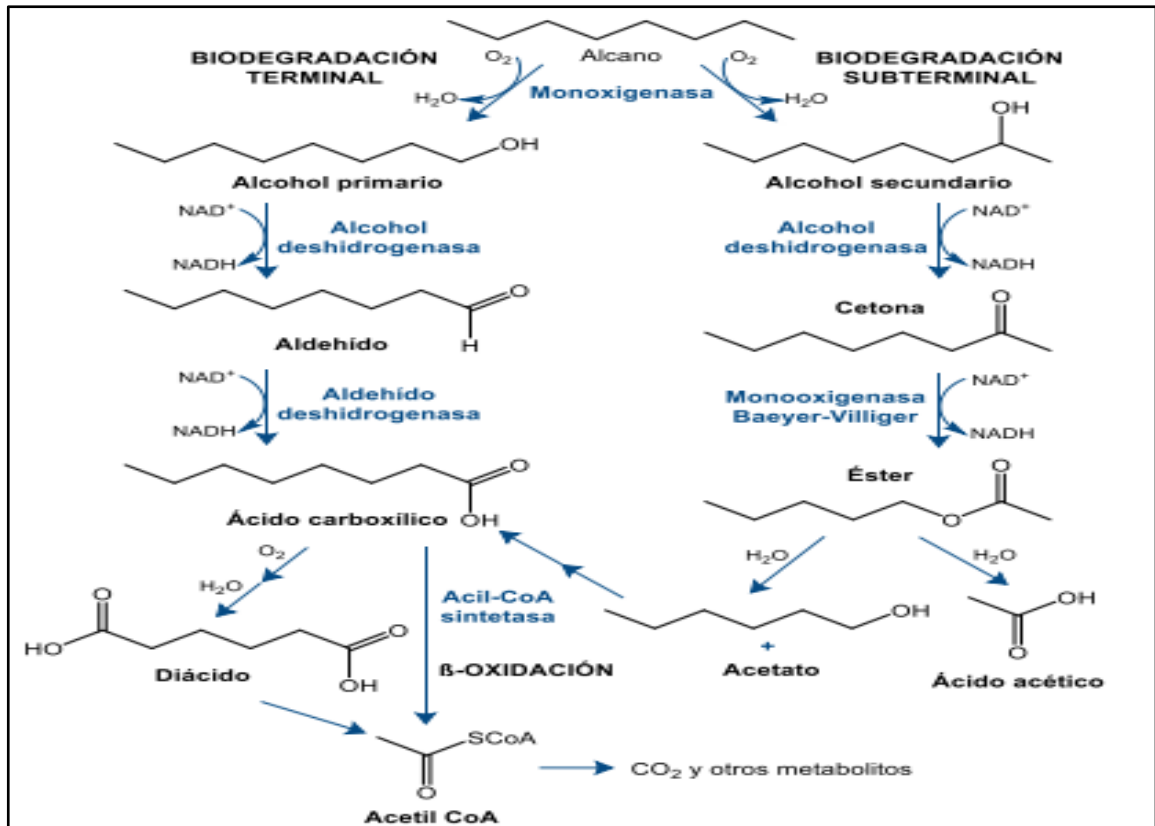


Figura 2: Ruta metabólica de biodegradación aeróbica de hidrocarburos alifáticos.

Fuente: Dawson, 2020.

En la parte final del proceso, los ácidos grasos generados por la oxidación de aldehídos se metabolizan adicionalmente por β -oxidación, que genera Acil-CoA, el cual ingresa al ciclo de Krebs. Sin embargo, cuando la fuente de carbono es excesiva en relación con el nitrógeno, muchas bacterias usan parte del carbono para generar materiales de almacenamiento como triacilgliceroles, poli (hidroxibutirato) o poli (3-hidroxicanoatos), que se acumulan como cuerpos lipídicos o gránulos (Anokhina et al. 2020).

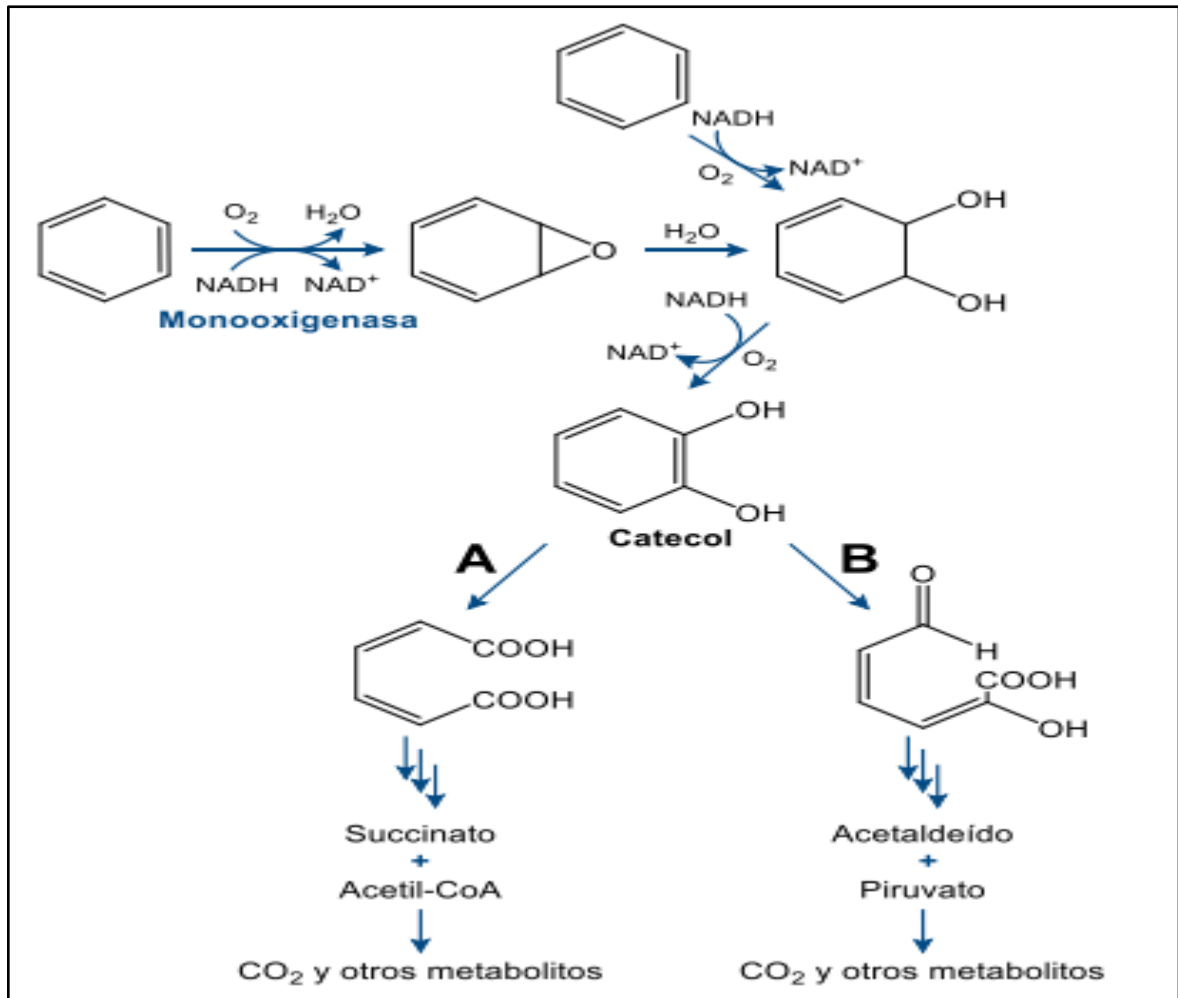


Figura 3: Ruta metabólica de biodegradación aeróbica de hidrocarburos aromáticos
 Fuente: Anokhina, (2020).

En los procesos metabólicos de bacterias anaerobias, se reconocen las bacterias homoacetogénicas como organismos fermentadores o acetogénicos que usan el acetato como aceptor de electrones específico para convertir los hidrocarburos en $CH_4 + CO_2$.

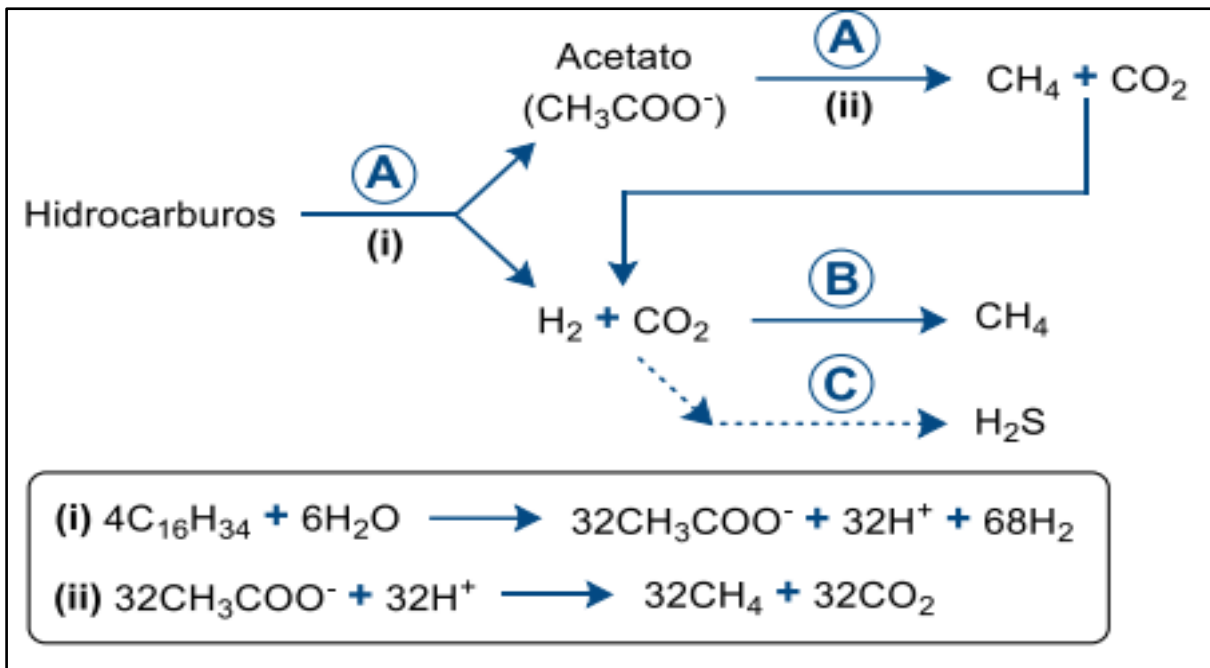


Figura 4: Ruta metabólica de biodegradación anaeróbica de hidrocarburos por bacterias (A) acetogénicas, (B) metanogénicas y (C) sulfato-reductoras. Fuente: Dhagat, (2020).

Los hidrocarburos aromáticos como el tolueno, cresol y xileno son degradados a partir de la activación basada en la adición de radicales de fumarato al grupo metilo (figura 4-5A). En el caso del etilbenceno, este radical se agrega a la cadena lateral. Este mecanismo ha sido ampliamente estudiado en bacterias sulfato reductoras y en bacterias desnitrificantes; sin embargo, también puede realizarse a través de la carboxilación del hidrocarburo en la posición C3 (figura 4-5B), el cual, también es desarrollado por bacterias sulfato reductoras (Tavares et al. 2020).

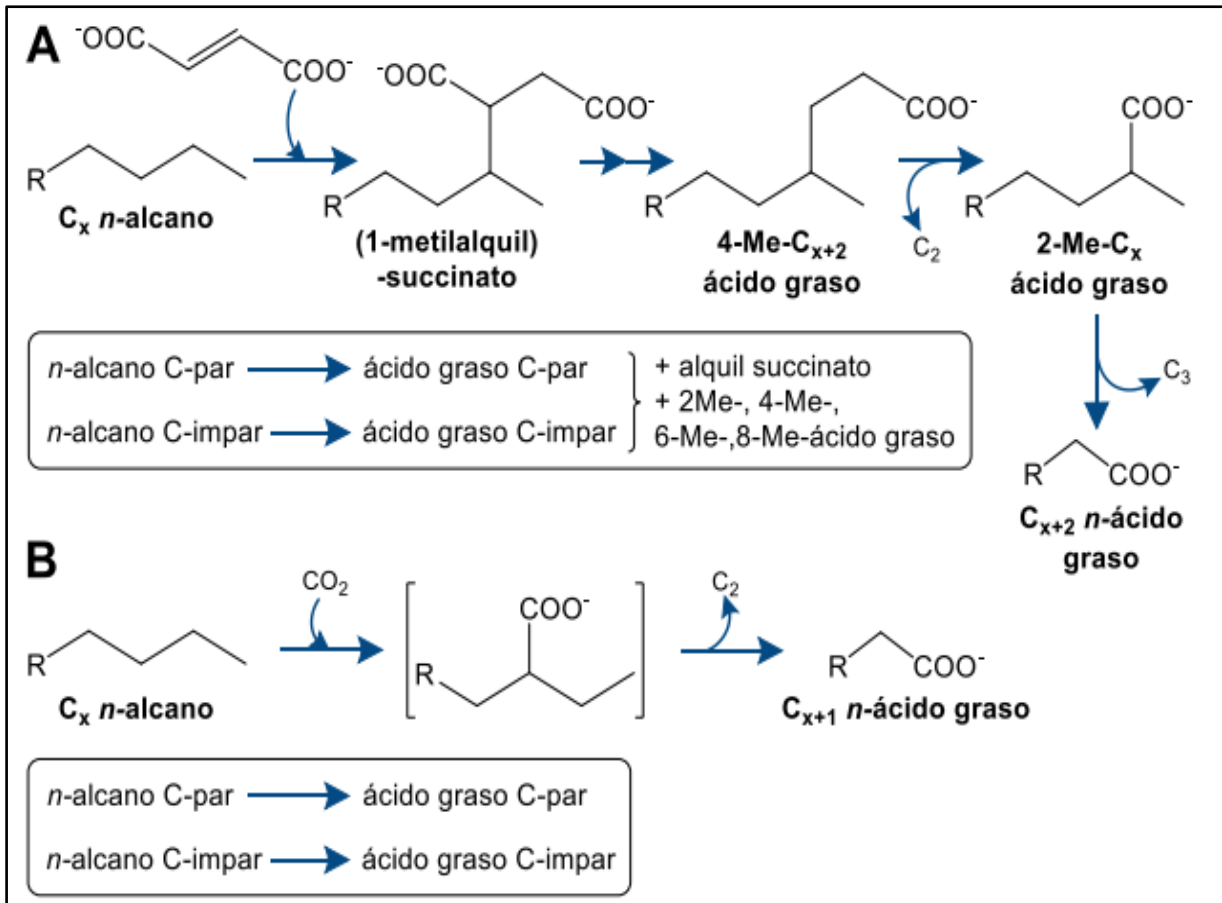


Figura 5: Ruta metabólica de biodegradación anaeróbica de hidrocarburos a través de la (A) adición de fumarato y (B) carboxilación C3. Fuente: Tavares, (2020).

El **efecto del biosurfactante** es cuando los contaminantes de hidrocarburos se liberan en el suelo, se vuelven difíciles de biodegradar. Esto se debe a su firme adsorción a las matrices del suelo y a la menor o nula biodisponibilidad para la biodegradación microbiana. Para superar este problema, se han ejercitado los usos de agentes tensioactivos inorgánicos y orgánicos. Los tensioactivos sintetizados químicamente se han utilizado para optimar la disolución de los hidrocarburos mediante el proceso denominado emulsificación (Ajona y Vasanthi., 2021). Para ello se utiliza el tratamiento de contaminantes hidrocarbonados empleando tensos activos iónicos (aniónicos y catiónicos), no iónicos, biológicos y mixtos. Sin embargo, los tensioactivos (inorgánicos) sintetizados químicamente no se recomiendan para su uso posterior, ya que también son propensos a la contaminación secundaria y en su mayoría son

peligrosos para el medio ambiente con un efecto mínimo o nulo sobre la eficiencia de biodegradación de hidrocarburos (Kebede et al., 2021).

Las **enzimas** son catalizadores biológicos que facilitan la conversión de sustratos en productos, proporcionando condiciones favorables que disminuyen la energía de activación de la reacción. Para hacer biorremediación enzimática se deben hacer inicialmente pruebas de degradación de xenobióticos preferentemente con bacterias (Kebede et al., 2021).

Las Bacterias Gram-Negativas reconocidas por la descomposición de hidrocarburos aromáticos del petróleo, los cuales requieren condiciones aeróbicas (Borda y Lahura, 2018).

Los **Biosurfactantes (BS)** son un grupo de moléculas de origen microbiano que se caracterizan como anfifílicas, lo que significa que sus moléculas tienen dos partes bien diferenciadas, una hidrófoba y otra hidrófila. Forman una clase estructuralmente diversa de moléculas tensioactivas que generalmente son menos tóxicas y biodegradables que los tensioactivos sintéticos. Las aplicaciones más estudiadas de BS se encuentran en la industria del petróleo y el gas y la biorremediación de sitios o desechos contaminados con hidrocarburos (De la Rosa et al, 2018).

La **región del suelo** es la adición regular de materia orgánica (de plantas y animales) y suficiente oxígeno, las capas superiores del suelo (capa superior, zona permeable y suelo no saturado) son principalmente ricas en bacterias. Por el contrario, en los sedimentos (regiones de saturación del suelo), las poblaciones bacterianas disminuyeron debido a la disminución de la adición de materia orgánica y el suministro de oxígeno al aumentar la profundidad del suelo (Zhao et al., 2021). Por lo tanto, el suelo afecta el número y la población de bacterias en suelos contaminados con hidrocarburos (Kebede et al., 2021).

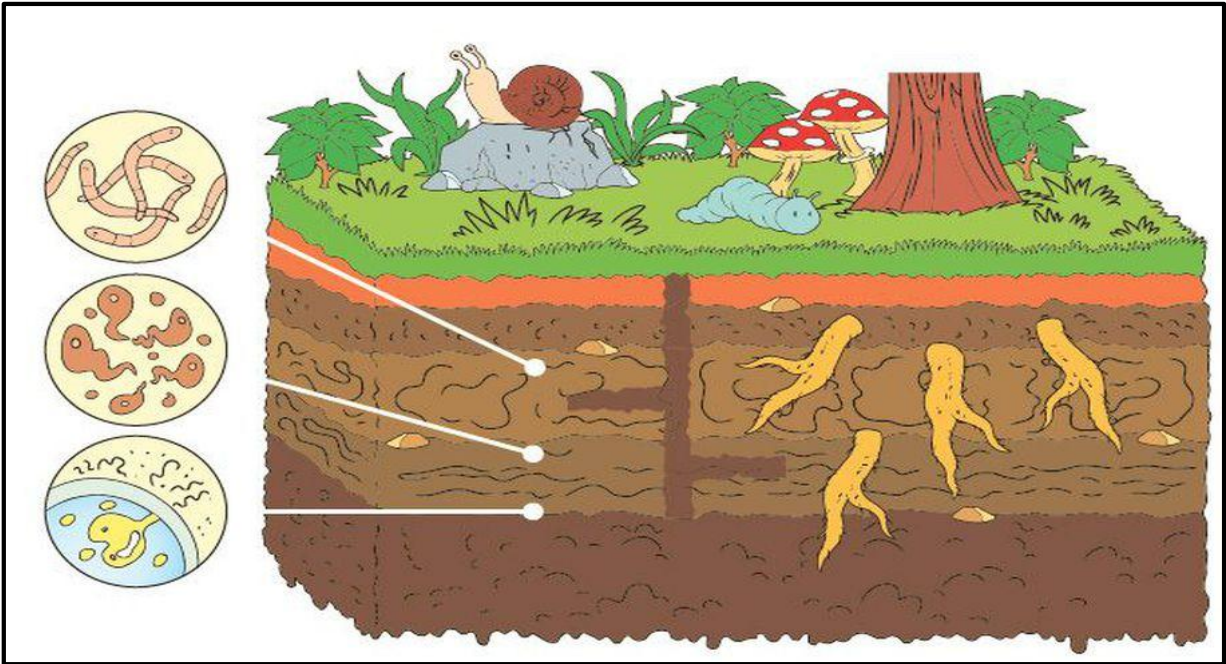


Figura 6: Capa superior de la región del suelo. Fuente: Ortega, (2018).

La **disponibilidad de nutrientes** es la necesidad de las bacterias que requieren nutrientes para su metabolismo y crecimiento y, por lo tanto, la comunidad microbiana depende de la accesibilidad de los nutrientes en el entorno del suelo natural contaminado con hidrocarburos. Las bacterias degradadoras de hidrocarburos están reguladas por nutrientes inorgánicos como factores limitantes. Esto implica que la presencia o adición de macronutrientes (N, P y K) en el suelo contaminado aumenta la Bioestimulación y determina la distribución y degradación de los hidrocarburos contaminantes (Kebede et al., 2021).

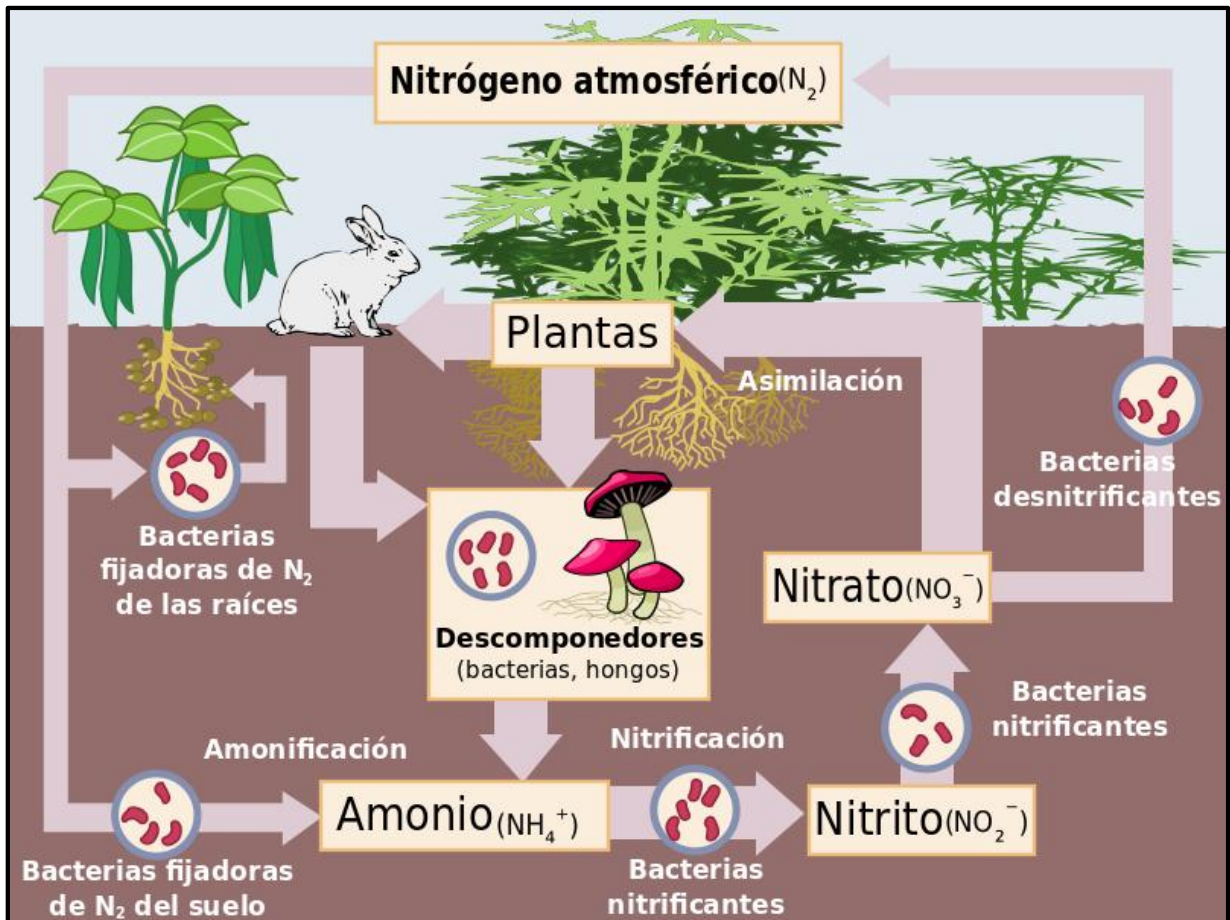


Figura 7: Disponibilidad de nutrientes para la carga bacteriana. Fuente: Dusíku, (2018).

La **temperatura** tiene un efecto significativo sobre la tasa de crecimiento bacteriano, la actividad enzimática, la química de los contaminantes, la fisiología y la diversidad de la comunidad bacteriana responsable de los procesos de degradación. Por lo tanto, la temperatura se considera un factor importante en la remediación biológica y la eficiencia de eliminación de los contaminantes de hidrocarburos está directamente relacionada con la temperatura (Zhang et al., 2020).

El **pH** es neutro, ácido o alcalino que afecta el crecimiento bacteriano y las estrategias de Biorremediación. La mayoría de las bacterias que degradan los hidrocarburos favorecen el pH neutro ligeramente alcalino. La producción y acumulación de productos de desecho bacterianos puede cambiar el pH (Zhao et al., 2021).

La **salinidad** es la deposición y acumulación de sal natural o antropológicamente afecta la actividad hidrocarbonoclástica microbiana y aumenta el estrés de los organismos (halófilos o halotolerantes) en su hábitat. La alta concentración de sal puede aumentar la presión osmótica y obstaculizar las actividades metabólicas microbianas, la solubilidad y los sistemas de transporte de iones esenciales y provocar una falta de oxígeno para los microbios. Esto puede deberse a la introducción de una gran cantidad de fertilizantes solubles (nitratos o sales de amonio) y al vertido de solución salina en el suelo (Kebede et al., 2021).

Los **costos bajos** se dan al momento de utilizar microorganismos que se encuentran en el ambiente y no se requiere algún gasto de adquirirlos para que cumplan las funciones de Biorremediar los suelos contaminados por hidrocarburos de petróleo (Ajona y Vasanthi., 2021).

El **ahorro de tiempo** ocurre en muchas generaciones diferentes entre los microorganismos, algunos crecen rápidamente, con un tiempo de generación de alrededor de 30 minutos, y algunos tienen un tiempo de generación de varias horas o incluso días para degradar los microorganismos contaminantes (Ajona y Vasanthi., 2021).

La **Facilidad de tratamiento** es por la adición de nutrientes al lodo estimula los microorganismos nativos en el suelo contaminado. Estos hidrocarburos degradados, al usarlos como fuentes de carbono y donantes de electrones, facilitan los próximos procesos de tratamiento utilizando oxígeno como aceptores de electrones en el proceso aeróbico (Valenzuela et al., 2021).

El **proceso es simple** ya que no requieren de uso de energía o de un monitoreo constante como seguimientos, por lo que estos organismos realizan su función solos sin depender de otros elementos (Kebede et al., 2021).

Sravya y Sangeetha. (2022), evaluaron dar una revisión crucial sobre diferentes técnicas de remediación in situ, los microorganismos más viables que son adecuados para un tipo particular de contaminante en diferentes niveles. Metodología: La biorremediación generalmente se adopta de dos maneras: in situ y ex situ. De estos,

la remediación ex situ exige la excavación, el transporte, la remediación y el relleno de material contaminado que hace que el método no sea adecuado en caso de grandes tierras contaminadas. En el caso de la remediación in situ, el mantenimiento del nivel óptimo de humedad, oxígeno, soporte de nutrientes para el crecimiento microbiano a lo largo de la finalización del proceso crea un problema. Lograron concretar que la biorremediación es un proceso que utiliza especies microbianas como bacterias, hongos, algas, etc. En conclusión, se ha propuesto un modelo que mejora la potencialidad de la técnica existente.

Zhang et al., 2020, evaluaron y revisaron las aplicaciones de biorremediación de suelos contaminados combinados con metales pesados y pesticidas. Los factores abióticos y bióticos (por ejemplo, el pH, la temperatura, la biodisponibilidad de los contaminantes, las interacciones entre los contaminantes, la competitividad biológica y el estado biológico) pueden afectar la biorremediación de metales pesados y pesticidas. También se revisan los métodos de evaluación de la efectividad de la remediación de suelos. Con base en lo anterior, esta revisión propone las futuras investigaciones requeridas para este campo. Concluyeron que, la Biorremediación tiene las ventajas de alta eficiencia (especialmente para áreas grandes y de baja contaminación), bajo costo, fácil disponibilidad, inofensiva para el ecosistema y alta aceptación pública, que se ha desarrollado ampliamente en la remediación de la contaminación combinada de metales pesados y pesticidas.

Agnello et al., 2018, evaluaron a través de un experimento en macetas cuatro estrategias de biorremediación: a) atenuación natural, b) fitorremediación con alfalfa (*Medicago sativa L.*), c) bioaumentación con *Pseudomonas aeruginosa* y d) fitorremediación asistida por bioaumentación, para el tratamiento de un co-contaminado suelo que presenta niveles moderados de metales pesados (Cu, Pb y Zn a 87, 100 y 110 mg kg⁻¹ DW, respectivamente) e hidrocarburos de petróleo (3800 mg kg⁻¹ DW). Lograron demostrar que la biomasa vegetal y los parámetros fisiológicos seleccionados, las plantas de alfalfa pudieron tolerar y crecer en el suelo co-contaminado, especialmente cuando el suelo se inoculó con *P. aeruginosa*, que promovió el crecimiento de la planta (56% y 105% de aumento para brotes y raíces, respectivamente) y pareció aliviar el estrés de las plantas. En conclusión, los

resultados de este estudio demostraron que el uso combinado de plantas y bacterias fue la opción más ventajosa para el tratamiento del suelo co-contaminado presente, en comparación con la atenuación natural, la bioaumentación o la fitorremediación aplicada solas.

Hazaimah et al., (2019), evaluaron los efectos de la densidad de plantas en la degradación de compuestos de hidrocarburos poliaromáticos (HAP) en suelos contaminados con petróleo crudo. Usaron como método, *Axonopus compressus* como biorremediador dado su amplio y exitoso uso en fitorremediación. *A. compressus* se sembró a la densidad de tres (maceta-3), cinco (maceta-5) o siete (maceta-7) plantas en macetas que contenían suelo contaminado con petróleo crudo a una concentración de 20 g kg⁻¹. La degradación de los compuestos PAH en el suelo se evaluó mediante la técnica de fluorescencia ultravioleta. Lograron obtener como resultado mostrar que la degradación de PAH mejoró a medida que aumentó la densidad de plantas. Específicamente, después de 2 meses, los contenidos de PAH disminuyeron un 69 %, 75,8 % y 82,3 % en la olla 3, la olla 5 y la olla 7, respectivamente, en relación con los de la olla C. Por lo tanto, en manera de conclusión de este estudio, demostró que las altas densidades de plantas promueven la fitorremediación de suelos contaminados con compuestos de hidrocarburos.

Li et al., 2022, evaluaron los mecanismos detrás de la rápida propagación de las bacterias autóctonas que degradan el petróleo (IPDB) y la degradación eficiente de los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en el suelo después de la preoxidación de Fenton con hierro bioestimulado. En los experimentos se utilizó hierro bioestimulado y hierro no bioestimulado, en los que se combinó la preoxidación de Fenton con la biorremediación de suelos contaminados con petróleo (TPH = 13221 mg/kg). Aunque la cantidad de TPH preoxidado de Fenton (3331–3775 mg/kg) fue similar con hierros bioestimulados y no bioestimulados, la biodegradación de TPH después de la preoxidación de Fenton con hierro bioestimulado (5840 mg/kg) fue mucho mayor que la con hierro no bioestimulado (3034-4034 mg/kg).

Popoola y Yusuff., 2021, evaluaron el efecto del pH del suelo, la relación nitrógeno-fósforo, la concentración de petróleo crudo y la concentración de bacterias aisladas (del suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo) en la optimización de la

biorremediación del suelo contaminado con petróleo crudo utilizando un diseño compuesto central. Como metodología, caracterizaron mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopia infrarroja transformada de Fourier (FT-IR), rayos X de dispersión de energía (EDX), analizador de carbono-hidrógeno-nitrógeno (CHN). Y cromatografía de gases-espectroscopia de masas (GC-MS) al suelo natural, el suelo contaminado con petróleo crudo y el suelo biorremediado. Como respuesta lograron determinar la caracterización y reveló la contaminación del suelo natural por hidrocarburos y su biodegradación por acción de grupos funcionales activos presentes en aislados bacterianos. En conclusión, los aislados de bacterias podrían aplicarse como un eliminador eficaz de la biodegradación de hidrocarburos en suelos contaminados con petróleo crudo.

Werheni et al., 2022, evaluaron las propiedades físicas y químicas del suelo, el PCP residual, el carbono de la biomasa microbiana del suelo, la respiración del suelo y algunas actividades enzimáticas a tiempo cero y después de 30 d de incubación. Usaron como método, bioaumentación mediante la adición de dos consorcios bacterianos diferentes B1 y B2, procedimientos de bioestimulación mediante enmiendas a base de compost forestal (FC), compost de residuos sólidos urbanos (MC), lodos de depuradora (SS) y fosfato, y sus tratamientos combinados. Lograron determinar una reducción neta de PCP, 71% de la concentración inicial, después de 30 días de incubación en la muestra Sc+B1+FC, como el mejor desempeño entre todos los tratamientos, debido a la atenuación natural, la inmovilización de moléculas de PCP en el suelo del bosque a través de enmiendas orgánicas, y la acción del consorcio microbiano exógeno B1. Concluyeron que estos resultados demuestran que los tratamientos combinados de bioestimulación y bioaumentación podrían ser un proceso prometedor para la remediación de suelos contaminados con PCP.

Li, et al., 2020, evaluó los efectos de los biosurfactantes alquil poliglucósidos (APG) en la biodegradación mejorada de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo utilizando *Sphingomonas changbaiensis* y *Pseudomonas stutzeri* y exploró el mecanismo responsable de la degradación mejorada de hidrocarburos de petróleo. Usaron como método los siguientes tratamientos: (1) bioaumentación con *Sphingomonas changbaiensis*; (2) bioaumentación con *Pseudomonas stutzeri*; (3) una combinación

de *Sphingomonas changbaiensis* y APG; y (4) una combinación de *Pseudomonas stutzeri* y APG. Lograron determinar que las tasas de degradación de los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en muestras de suelo contaminado bioaumentadas con *S. changbaiensis* y *P. stutzeri* durante 30 días fueron de $39,2 \pm 1,9$ % y $47,2 \pm 1,2$ %, respectivamente. La tasa de biodegradación a 1,5 g/kg APG en muestras de suelo bioaumentadas con *S. changbaiensis* fue de $52,1 \pm 2,0$ %, mientras que la tasa a 1,5 g/kg APG en muestras de suelo bioaumentadas con *P. stutzeri* fue de $59,0 \pm 1,8$ %.

Ramadass et al., 2018, evaluó los resultados del examen microscópico de dos cepas de *Pseudomonas*, *Pseudomonas putida* TPK-1 y *Pseudomonas aeruginosa* TPK-4, para eliminar los hidrocarburos de petróleo meteorizados totales (TPH) del suelo contaminado en altas concentraciones ($39\ 000$ – $41\ 000$ mgTPH/kg⁻¹ de suelo). Ambas cepas bacterianas muestran un gran potencial para el tratamiento de hidrocarburos degradados en aceites de motor. Descubrieron que los datos de actividad de la deshidrogenasa apoyaban claramente la estrategia de Biorremediación utilizada, lo que sugiere que este ensayo enzimático podría servir como indicador del potencial de Biorremediación del suelo contaminado con petróleo. Concluyo que los 454 datos de pirosecuenciación eran consistentes con las estrategias de Biorremediación actuales utilizadas en los estudios en miniatura, lo que sugiere la posibilidad de usar pirosecuenciación en el diseño de métodos de tratamiento biofísico.

Romero et al., (2019), evaluó un modelo para simular la biorremediación ex situ de un suelo contaminado con diesel en un reactor de bio-lodo inoculado con una cepa bacteriana que degrada el diesel. Usaron como método, los procesos de transferencia de masa que implican la desorción de diesel del suelo al agua y la volatilización de diesel del agua, y la biodegradación por el inoculante bacteriano se incluyeron en el modelo utilizando la cinética sigmoidea de Weibull y la cinética logística/Monod respectivamente. Como resultado revelaron la capacidad del modelo para predecir la eficiencia de la biorremediación bajo diferentes escenarios adaptando los parámetros de entrada a cada sistema.

Sarma, (2019), evaluó un estudio que aisló 39 bacterias nativas que degradan el petróleo crudo de diferentes suelos contaminados con petróleo crudo. Usó como método, secuencias de ADNr 16S, confirmamos que las bacterias aisladas pertenecen

a los géneros *Lysinibacillus*, *Brevibacillus*, *Bacillus*, *Paenibacillus*, *Stenotrophomonas*, *Alcaligenes*, *Delftia*, *Achromobacter* y *Pseudomonas*. Se utilizaron las cuatro cepas más eficaces (designadas como AS03, N108, N002 y N78) para el cultivo por lotes y la evaluación del microcosmos. Logró revelar que, bajo microcosmos, la calidad del suelo mejoró significativamente en los tratamientos de BF1-Mix (N108-AS03) y BF2-Mix (N002-N78). En conclusión, estos hallazgos demostraron que el uso combinado de bacterias que degradan el petróleo crudo junto con suplementos de nutrientes podría revivir el suelo contaminado por petróleo crudo de manera efectiva a gran escala.

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

Tipo de investigación: Fue aplicada porque se utilizó un propósito de generar nuevos conocimientos sobre un hecho u objeto, identifiqué los problemas que se necesitan intervenir e identificar soluciones a la estrategia (Vargas, 2019, p. 145-146). El objetivo de este tipo de investigación es crear nueva tecnología a partir del conocimiento adquirido, y luego determinar si este conocimiento será útil en el futuro (Hernández, 2014, p.389).

Esta investigación es aplicada porque se basó en revisión de aplicaciones de enfoques teóricos relacionados el uso de macroorganismos para la fitorremediación de hidrocarburos de petróleo en suelos contaminados, y en los algoritmos matemáticos que se desprenden de las relaciones entre los factores que determinan la eficiencia de la remoción, esto incluye variables como las fisicoquímicas (pH, temperatura, concentración inicial de hidrocarburo en el suelo, composición del hidrocarburos entre otros variables)

Diseño de investigación: El diseño narrativo de tópico. Se enfocó en una revisión sistemática, según (Hernández, 2014, p.389). la revisión sistemática precisó la recolección de datos de diferentes artículos con entorno a la investigación y enriquecer la investigación con técnicas de Fitorremediación reduciendo los hidrocarburos en los suelos.

3.2. Categorías, sub categorías y matriz de categorización apriorística

| Matriz de categorización apriorística: Factores que Influyen en las Técnicas de Biorremediación de Suelos Contaminados por Hidrocarburos; Tendencias y Brechas. Revisión Sistemática, 2022. | | | | | |
|---|---|---|---|--|--|
| Objetivo específico | Problema específico | Categoría | subcategoría | Criterios | Referencias |
| Determinar las técnicas de Biorremediación para degradar hidrocarburos en suelos contaminados | ¿Cuáles son las técnicas de Biorremediación para degradar hidrocarburos en suelos contaminados? | Técnicas de Biorremediación | <ul style="list-style-type: none"> • Fitorremediación • Bioestimulación • Bioaumentación • Biorremediación intrínseca • Compostaje | <ul style="list-style-type: none"> • Uso de plantas • Circulación de soluciones acuosas • Uso de microorganismos vivos • Remediación natural • Abonos orgánicos | <ul style="list-style-type: none"> • Valenzuela et al. (2021) • Popoola y Yusuff (2021) • Kebede, et al. (2021) • |
| Determinar los factores que influyen en la Biorremediación para suelos contaminados por hidrocarburos | ¿Cuáles son los factores que influyen en la Biorremediación para suelos contaminados por hidrocarburos? | Factores, físico, químicos y microbiológico que influyen en la bioremediación | <ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidad de bacterias • Formación de biopelículas • Potencial redox de las bacterias • Efecto del biosurfactante • Región del suelo • Disponibilidad de nutrientes • Temperatura • pH • Salinidad | <ul style="list-style-type: none"> • Requerimiento de las bacterias a utilizar • Formación de bandas • Requerimiento de energía • Saturación de hidrocarburos • Zona vadoza • Nutrientes para el metabolismo • Temperatura de adaptación • pH neutro • Aumento de sal natural | <ul style="list-style-type: none"> • Wu et al (2021) • Li et al (2020) • Zhang et al (2021) • Ajona y Vasanthi. (2021) |
| Conocer los beneficios de las técnicas de Biorremediación en suelos contaminados por hidrocarburos | ¿Cuál será el beneficio de las técnicas de Biorremediación en suelos contaminados por hidrocarburos? | Beneficios de las técnicas de Biorremediación | <ul style="list-style-type: none"> • Costo bajo • Ahorro de tiempo • Facilidad de tratamiento • Proceso simple | <ul style="list-style-type: none"> • Ahorro de dinero • Tiempo disponible | <ul style="list-style-type: none"> • Agnello et al (2018) • Hazaimah et al. (2019) |

3.3. Escenario de estudio

Al ser este estudio una revisión sistemática de diversas literaturas científicas, se tomó como escenario de estudio a los laboratorios y lugares de campos en los que los investigadores realizaron sus análisis y toma de muestras para el estudio práctica; siendo ellos escenarios encontrados en los artículos científicos extraídos de diversas plataformas y portales web a nivel nacional e internacional.

3.4. Participantes

Los participantes que se encontraron involucrados en el desarrollo del presente estudio fueron las páginas web institucionales y científicas que nos permitieron extraer las diversas literaturas utilizadas para añadir al estudio; siendo estos participantes páginas indexadas como:

Tabla 1: Base de Datos.

| BASE DE DATOS | Dirección |
|----------------------|---|
| • SCOPUS | https://www.scopus.com/sources.uri |
| • SCIENCEDIRECT | https://www.sciencedirect.com/ |
| • EBSCO | https://www.ebsco.com |

Fuente: Elaboración Propia, (2022).

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se elaboró mediante análisis de documentos procedentes de artículos publicados en revistas indexadas de alto impacto a nivel global, estructurando en categorías y subcategorías (Técnicas de Biorremediación, Factores que influyen en la Biorremediación y Beneficios de las técnicas de Biorremediación) se logró la recopilación de datos cualitativos, mediante la observación,

elaboración de tablas comparativas, análisis conveniente de los objetivos de investigación, problema, metodología, resultados y conclusiones.

Las técnicas a emplear permitieron recolectar datos que se lograron la comprensión de los procedimientos y las actividades encaminadas a conseguir, la recopilación de información requerida para responder las preguntas de la investigación de manera confiable, objetiva y con validez (Hernández & Ávila, 2020).

3.6. Procedimientos

El procedimiento se divide en 3 fases, las cuales se realizaron haciendo una búsqueda de Información mediante palabras clave: “Bioremediation Models OR Contaminated Soils, Hydrocarbons, Petroleum, Bacteria, Fungi, Plants, Phytoremediation, Bioaccumulation, Biostimulation, Degradation”. Todos los términos descritos anteriormente se utilizarán en las diferentes plataformas de artículos científicos tales como (Scopus, Ebsco, ScienceDirect)

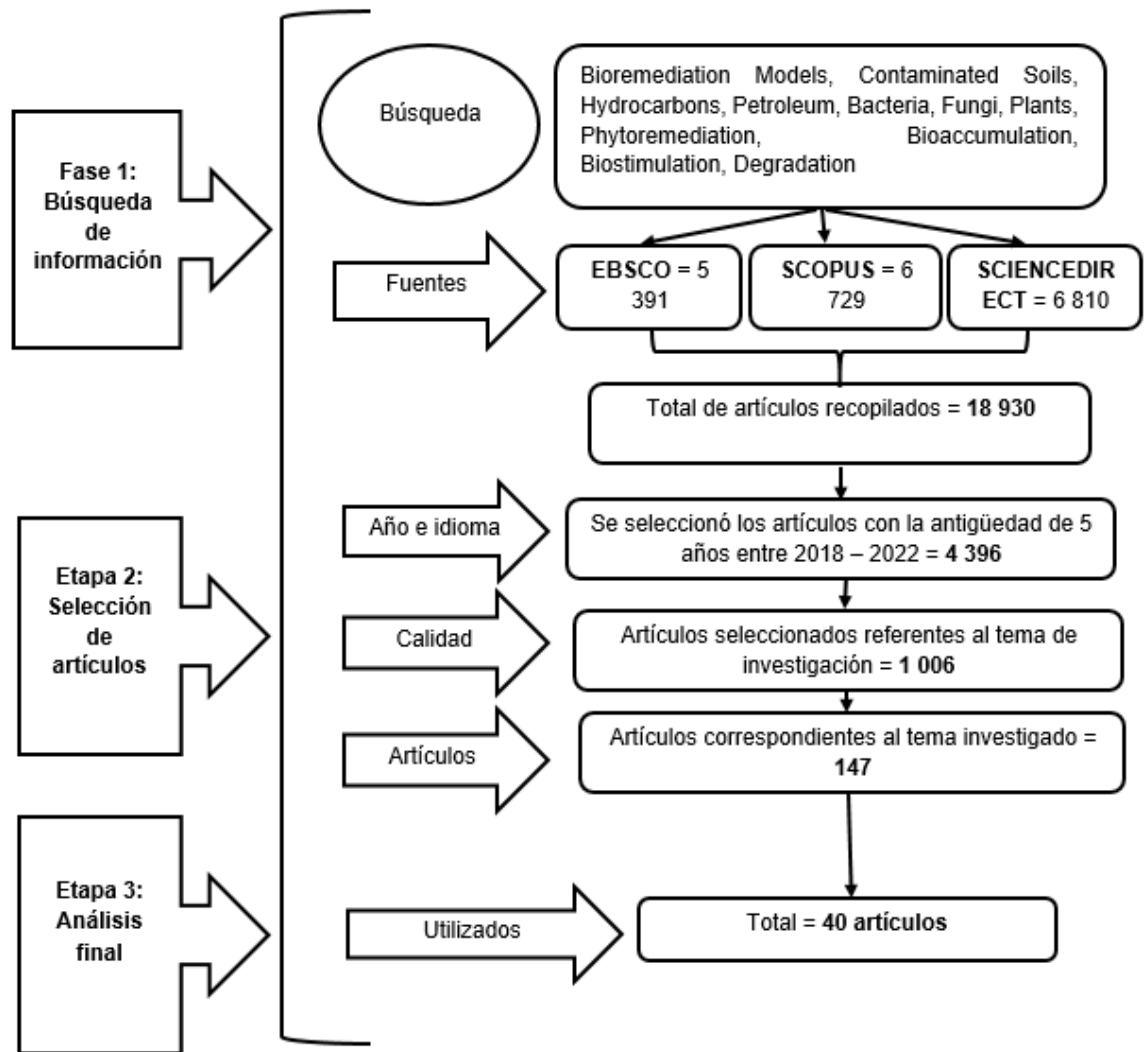


Figura 8: Diagrama de flujo de selección de artículos.

Fuente: Elaboración propia, (2022).

3.7. Rigor científico

Los artículos utilizados se basaron en descripciones hipotéticas de los autores de las revistas y los artículos que fueron indexados, lo que aseguró que las encuestas descritas fueran confiables, con precisión alta, confiable, validada y auténtica (HERNANDEZ, FERNANDEZ Y BAPTISTA, P. 453-459). En conjunto, estos artículos nos permiten comprender los métodos y las herramientas utilizadas para identificar los factores que influyen en la Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos.

3.8. Método de análisis

En los análisis de los artículos científicos, se procedió a clasificar y reducir la información, por medio de las agrupaciones de orden y categorías de acuerdo con la matriz que se enfocó en los objetivos de la tesis; posteriormente se emplearán métodos de análisis cualitativo, que se obtuvieron como primera actividad que se encontraron relación con el objetivo mediante la búsqueda con las palabras claves y los filtros que se consagro un mejor resultado. Cada artículo científico fue analizado, confrontado en cuanto a sus semejanzas y discrepancias, siendo el análisis crítico la mayor condición para desarrollar una correcta interpretación, lo que permitió desarrollar una apropiada revisión sistemática.

3.9. Aspectos éticos

Se consideró los códigos de ética y norma de referencias de la Universidad Cesar Vallejo ISO 690, se respetó los derechos de autor y las fuentes de información, haciendo citas y registro de cada documento. Se empleó el software como una herramienta antiplagio (turnitin) para el hallazgo de plagio y originalidad de la tesis. Así mismo se realizó los lineamientos de investigación de la universidad, mencionado líneas arriba. Del mismo modo se respetó la información sobre los factores que influyen en las técnicas de Biorremediación en suelos contaminados por hidrocarburos de petróleo.

IV. RESULTADO Y DISCUSIÓN

OE1: Técnicas de Biorremediación

Tabla 2: Técnicas de biorremediación de suelos contaminados

| Técnicas de Biorremediación | | | | | |
|---|--|--|---|---|------------------------|
| Técnicas de Biorremediación | Condiciones ambientales | Tipo de microorganismos | Tipo de hidrocarburos | % Eficiencia | Fuente |
| Las técnicas empleadas por los microorganismos empleados fueron la Bioaumentación, Bioestimulación. | Los contenedores fueron incubados durante 56 días a temperatura ambiente ($30\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$). | El microorganismo empleado para la degradación de aceites fue <i>Pseudomona aeruginosa</i> | El tipo de contaminantes presente en el suelo fue el Aceites | La aplicación de <i>P. aeruginosa</i> mostró una disminución de $92,97 \pm 0,92\%$ en el lodo aceitoso presentes en el suelo. | Varjani et al. (2020) |
| Se usaron las técnicas de Bioaumentación, fitorremediación. | Las condiciones ambientales en el área evaluada en cuanto a la temperatura fueron de 28°C , pH 7.9, Humedad a 28% | Los microorganismos empleados fueron los <i>Rhodococcus</i> , <i>Pseudomonas</i> | Los tipos de contaminantes presentes en el suelo fueron el petróleo crudo y metales | Resultó que la eficiente de eliminación del petróleo fue un 68% del total que se encontraba presente en el suelo y en cuanto | Kuyukina et al. (2018) |

| | | | | | |
|--|---|--|--|---|-------------------------|
| | | | tóxicos pesados. | a los metales pesados un 75–96% | |
| la técnica registrada usada por los microorganismos fue la Biodegradación | Las condiciones climáticas en cuanto a la precipitación media anual fueron de 560 mm, La temperatura 4.5°C, la humedad fue de 48% | Los microorganismos utilizados para el tratamiento del contaminante fueron las <i>Pseudomonas putida</i> , <i>Rhodococcus erythropolis</i> | El contaminante presente en el suelo fue el petróleo crudo | Por medio del uso de los microorganismos como fueron las <i>Pseudomonas putida</i> , <i>Rhodococcus erythropolis</i> actuaron frente al contenido de TPH disminuyendo un 64%, 56% y 47% | Vasilyeva et al. (2019) |
| Las técnicas usadas por los microorganismos fueron la Bioventilación, Biodegradación | Las Cepas utilizadas de los microorganismos fueron acondicionadas a una temperatura de 4°C, | Los microorganismos utilizados en la biorremediación fueron los <i>Bacillus Subtilis</i> , <i>Candida</i> | el contaminante presente en el suelo fue el petróleo crudo | La tasa máxima de degradación por los <i>Bacillus Subtilis</i> , <i>Candida Bombicola</i> , <i>Pseudomonas</i> | Zhang et al. (2020) |

| | | | | | |
|---|---|--|--|---|----------------------|
| | pH del suelo fue de 6.8, Humedad de 45% | <i>Bombicola,</i> <i>Pseudomonas aeruginosa,</i> <i>Arthrobacter sp.</i> | | <i>aeruginosa,</i> <i>Arthrobacter sp</i> fue de 55,31 ± 1,32 % a 7,3% de petróleo crudo presente en el suelo. | |
| La técnica utilizada por los microorganismos para la degradación del petróleo fue la Biodegradación | Se realizaron bajo las condiciones ambientales de adaptación a una temperatura de 30°C pH de 8.2 y a una humedad de 24% | Los microorganismos utilizados fueron las <i>Stenotrophomonas maltophilia</i> | El contaminante presente en el suelo fue el Petróleo crudo | Un 1% de acondicionador de suelo podría mejorar las condiciones del suelo y ofrecer suficiente N, P y K a los microorganismos en la degradación del petróleo. | Liu et al. (2020) |
| Las técnicas empleadas por los microorganismos fueron la | La temperatura donde fue adecuada las poblaciones microbianas fue de | Los microorganismos que se utilizaron en la biorremediación | Los tipos de contaminantes presentes en los suelos | La efectividad de los microorganismos en la degradación | Porqué et al. (2021) |

| | | | | | |
|---|--|---|---|---|--------------------------|
| Biorremediación, Biodegradación | 23° C, humedad de 26% | de los contaminados fueron las <i>Pseudomonas oleovorans,</i> <i>Rhodococcus</i> | fueron los derivados del petróleo como el Kerosene y Aceite | de los derivados del petróleo fue de 29% en cuanto al Kerosene y 43% para el aceite. | |
| La técnica que se utilizó por la planta y los microorganismos fue la Rizodegradación | Las variables ambientales que fueron evaluadas en cuanto a la temperatura 37°C, pH 7.6 y la humedad de 20% | La planta utilizada fue la <i>Panicum Aquaticum</i> y los microorganismos <i>Bacillus thurigiensis,</i> <i>Bacillus pumilus,</i> <i>Rhodococcus hoagii</i> | El contaminante presente en el suelo fue Petróleo Crudo | De acuerdo a las evaluaciones el <i>Rhodococcus hoagii</i> tuvo mayor eficiencia de consumo de petróleo, alcanzando el 87% de degradación. + | Viesser et al. (2020) |

De acuerdo al desarrollo de la investigación según Varjani et al. (2020), realizó Biorremediación de los suelos contaminados con lodos aceitosos empleando una nueva cepa de *Pseudomonas aeruginosa* y fitotoxicidad de hidrocarburos de petróleo donde utilizo la bioaumentación y bioestimulación, por ello la aplicación de *P. aeruginosa* mostró una disminución de $92,97 \pm 0,92\%$ en el lodo aceitoso que se encontraron presentes en el suelo. Que al realizar una comparación con su investigación de Kuyukina et al. (2018) realizó la Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos y metales tóxicos, uso los microorganismos *Rhodococcus*, *Pseudomonas* y las técnicas empleadas por los microorganismos fue la Bioaumentación, fitorremediación logrando una eficiencia de eliminación de hidrocarburos (68%) y metales pesados (75–96%) contribuyendo al estado natural del suelo.

Asimismo, en cuanto a su investigación de Liu et al. (2020) realizó la Biorremediación del suelo contaminados con petróleo mediante la combinación de acondicionadores de suelo y microorganismos empleando la técnica de biodegradación con los microorganismos como las *Stenotrophomonas maltophilia* logrando un 1% de acondicionamiento del suelo que mejoro las condiciones del suelo ofreciendo suficiente N, P y K a los microorganismos y aceleren la biodegradación del petróleo crudo presente en el suelo. Donde en comparación con su investigación de Viesser et al. (2020), uso Bacterias rizosféricas tolerantes al petróleo con un potencial de aislamiento, caracterización y biorremediación, donde realizó la técnica de Rizodegradación con *Panicum Aquaticum*, *Bacillus thurigiensis*, *Bacillus pumilus*, *Rhodococcus hoagie*, logrando que *Rhodococcus hoagii* tuvo mayor eficiencia de consumo de petróleo, alcanzando el 87% de degradación después de solo 24 h de cultivo volviendo a su estado natural del suelo.

OE 2: Factores, físico, químicos y microbiológico que influyen en la Biorremediación.

Tabla 3: Factores que influyen en la fitorremediación.

| Factores, físico, químicos y microbiológico que influyen en la Biorremediación | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|--|-------------|--------------------------|---------------|---------------|-----------|------|--|---|--|--|---------------------|
| Nutrientes | Temperatura | pH | % nitrógeno | Potasio (Meq/100g suelo) | Textura | Fosforo (ppm) | % Humedad | % MO | Microorganismos | Tipo de contaminante | Tiempo usado en Biorremediación | Resultados | Fuente |
| Los nutrientes encontrados fue el Nitrógeno, materia orgánica | La temperatura que influyo fue a 28 °C | El pH evaluado del suelo contaminado fue de 7.9 | 0.06 | 0.30 | Franco limoso | 18 | 24% | 2.65 | <i>Arthrobacter</i> con 10 ¹⁰ unidades formadoras de colonias (UFC)/mL | el contaminante que estuvo presente en el suelo fue el Petróleo | 125 días de remediación el contenido de petróleo. | Las eficiencias de remoción de aceite fueron aproximadamente 78%, 77%, 60% y 46%. | Cai et al. (2020) |
| Se puede estimular la actividad microbiana con el suplemento de nutrientes en forma de fertilizantes como KNO ₃ , NaNO ₃ , NH ₃ NO ₃ , K ₂ HPO ₄ y | El rango de temperatura que dificulta o mejoran tuvo un promedio de 35 °C | El rango de pH que dificulta o mejoran tuvo un promedio de 6.5 | 0.08 | 0.28 | Franco lomoso | 11 | 23% | 3,40 | <i>Cycloclasticus</i> , <i>Alcanivorax borkumensis</i> , <i>Pseudomonas</i> sp | Aceites, Petróleo | Las cepas bacterianas en condiciones aeróbicas degradaron en 10 días. Y anaeróbicas demoraron 50 días. | Degradó el 20 y el 25 % de la cantidad total de petróleo en condiciones aeróbicas y en condiciones anaeróbicas en degradar entre el 15 y el 18 % del petróleo total presente | Kedeb et al. (2021) |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|--|------|------|----------------|----|-----|------|---|--|---|--|---------------------|
| MgNH ₄ PO ₄ | | | | | | | | | | | | | |
| Los factores edáficos de micronutrientes entre ellos fueron el nitrógeno, el carbono, materia orgánica. | El rango de temperatura que dificulta o mejoran tuvo un promedio de 38 °C | El rango de pH que dificulta o mejoran tuvo un promedio de 7.6 | 0.06 | 0.40 | Franco arenoso | 24 | 22% | 3.52 | <i>Proteobacteria</i> , <i>Chloroflexi</i> , <i>Firmicutes</i> , <i>Nitrospirae</i> , <i>Actinobacteria</i> , <i>Acidobacteria</i> | Hidrocarburos aromáticos poli cíclicos | Todo este proceso tuvo una duración de 90 días. | La degradación de incluían <i>Proteobacteria</i> (20,86 %–81,37 %), <i>Chloroflexi</i> (2,03 %–28,44 %), <i>Firmicutes</i> (3,06 %–31,16 %), <i>Actinobacteria</i> (2,92 %–11,91 %). %), <i>Acidobacteria</i> (0,41%–12,68%) y <i>Nitrospirae</i> (0,81%–9,21%). | Geng et al. (2020) |
| Los nutrientes que intervinieron fue KNO ₃ , NaNO ₃ , humedad a un 60%, nitrógeno y carbono | El rango de temperatura que dificulta o mejoran tuvo un promedio de 30 °C | El rango de pH que dificulta o mejoran tuvo un promedio de 6.6 | 0.07 | 0.38 | Franco arenoso | 30 | 23% | 2.45 | <i>Rhodococcus rhodochrous</i> , <i>Pseudomonas sp</i> , <i>Bacillus sp</i> | Gasolina | Periodo de 16 semanas | La biorremediación promete una mejor comprensión de la mineralización de explosivos en el entorno del suelo. | Celin et al. (2020) |
| Los factores edáficos | El rango de temperatura | El rango de pH que | 0.24 | 0.63 | Arcilloso | 24 | 28% | 2.34 | <i>Bacillus methylotrophicus</i> | Gasóleo | Para suelos bioaumentados y | El suero se utilizó con éxito para | Machado et |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|--|------|------|-----------|----|-----|------|--|--------------|---|---|-----------------------|
| de micronutrientes entre ellos fueron el potasio, calcio, materia orgánica | a que dificulta o mejoran tuvo un promedio de 32 °C | dificulta o mejoran tuvo un promedio de 7.2 | | | | | | | | | bioestimulados se observó una disminución de la tensión superficial entre los 30 y 60 días. | bioestimulación y bioaumentación en suelos contaminados con gasóleo. | al. (2020) |
| Los factores que influyeron como micronutrientes fueron el nitrógeno, el carbono. | El rango de temperatura a que dificulta o mejoran tuvo un promedio de 26 °C | El rango de pH que dificulta o mejoran tuvo un promedio de 6.8 | 0.15 | 0.45 | Arcilloso | 26 | 22% | 3.12 | <i>Pseudomonas sp,</i> <i>Bacillus sp</i> | Hidrocarburo | el tiempo usado en la biorremediación de los suelos contaminados por hidrocarburos fue de 38 días | Los macroorganismos tuvieron una efectividad de degradar a los hidrocarburos en un periodo de 38 días en cuanto las <i>Pseudomonas</i> una efectividad de 68% y para los <i>Bacillus sp</i> degradaron un 72% del hidrocarburo presente en el suelo | Tawniczak et al. 2020 |

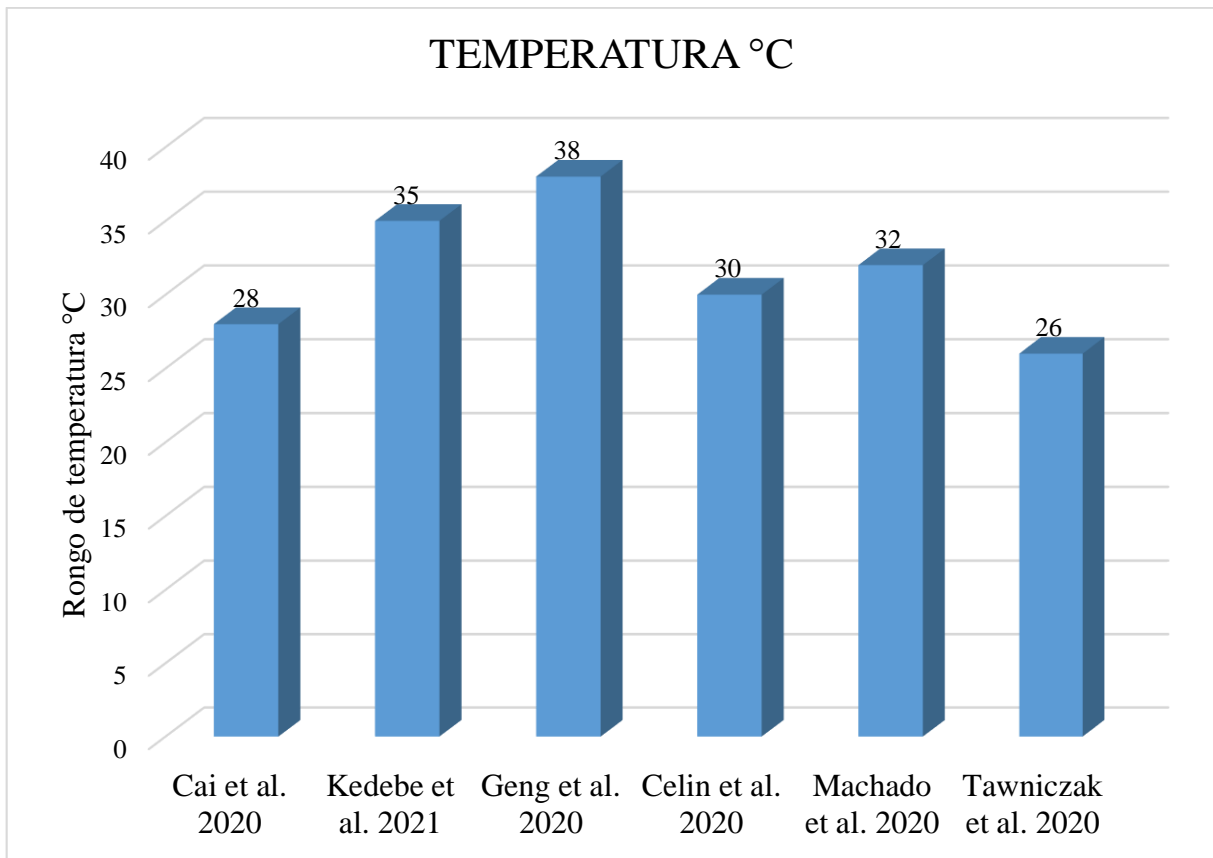


Figura 9: Influencia de la temperatura en degradación de hidrocarburos.

En la figura 9 queda demostrado el rango de la temperatura que dificulto o mejoro la actividad de los microorganismos en la degradación de hidrocarburos presentes en los suelos de acuerdo a los artículos de investigación desarrollados por diferentes autores. Obteniendo por Geng et al. 2020 una temperatura más alta de 38 °C y la más baja por Tawniczak et al. 2020 con 26 °C.

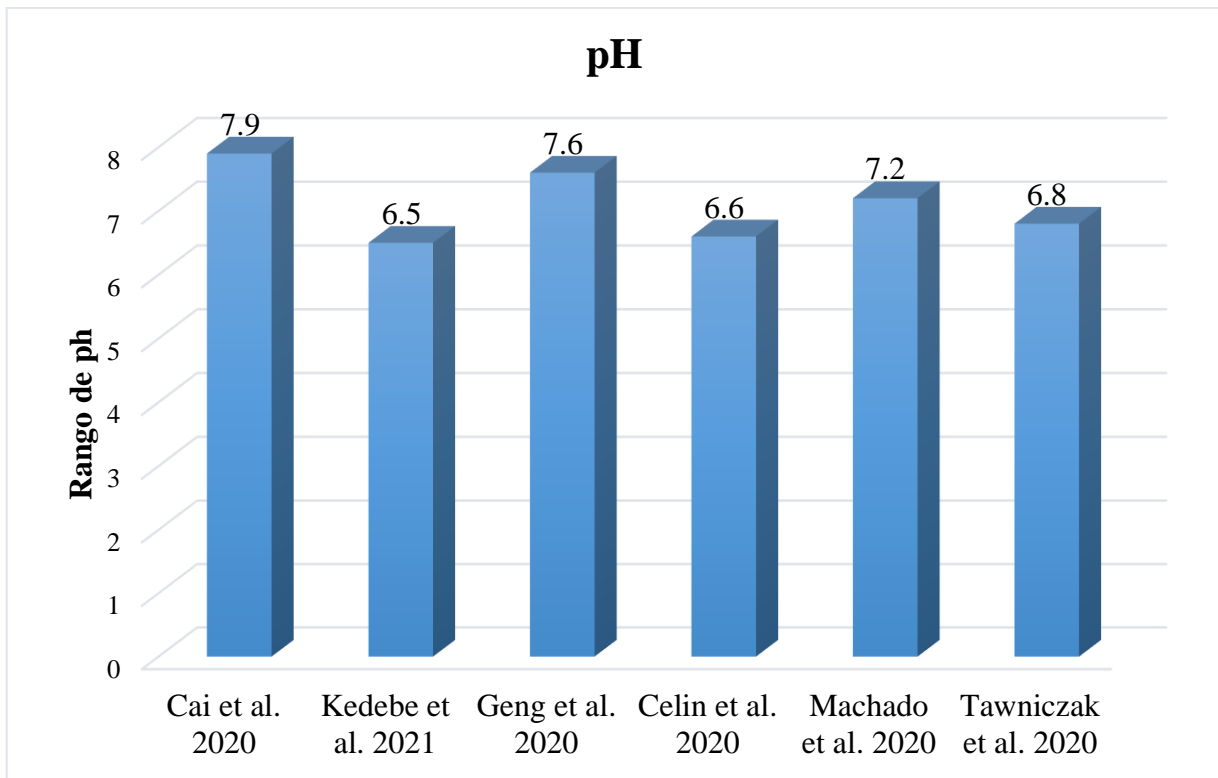


Figura 10: Influencia del pH en degradación de hidrocarburos.

En la figura 10 queda demostrado el rango del pH que dificulto o mejoro la actividad de los microorganismos en la degradación de hidrocarburos presentes en los suelos de acuerdo a los artículos de investigación desarrollados por diferentes autores en el mundo de la investigación. Obteniendo por Cai et al. 2020 una pH más alto de 7.9 totalmente alcalino y la más baja por Kedebe et al. 2021 con 6.5 ligeramente ácido.

Seguidamente de acuerdo a su investigación de Cai et al. (2020) determino la influencia de los factores físicos, químicos y biológicos durante la degradación de la presencia de petróleo en el suelo. Se tuvo como los nutrientes el nitrógeno, materia orgánica, adecuados a una temperatura de 28 °C, un pH de 7.9, con siderando a los microorganismos *Arthrobacter* con 10^{10} unidades formadoras de colonias (UFC)/mL. Que al igual con otras investigaciones de Zhang et al. (2020) Los factores abióticos y bióticos (por ejemplo, el pH de 6.9 ligeramente ácido, la temperatura de 29 °C, la biodisponibilidad de los contaminantes, las interacciones entre los contaminantes, la competitividad biológica y el estado biológico de los microorganismos) contribuyeron

en la afectación de la biorremediación de metales pesados y pesticidas presentes en los suelos evaluados.

Asimismo, en cuanto a su investigación de Kedebe et al. (2021), Se puede estimular la actividad microbiana con el suplemento de nutrientes en forma de fertilizantes como KNO_3 , NaNO_3 , NH_3NO_3 , K_2HPO_4 y MgNH_4PO_4 , además de una temperatura de $35\text{ }^\circ\text{C}$, el pH del suelo oscilaba 6.5 ligeramente ácido influyente en el crecimiento microbiano de *Cycloclasticus*, *Alcanivorax borkumensis*, *Pseudomonas* sp. Donde al comparar con otras investigaciones de Li et al. (2022) Lograron encontrar abundantes nutrientes y una alta población de IPDB residual después de la preoxidación de Fenton con hierro bioestimulado, lo que benefició el consumo estable de $\text{NH}_3\text{-N}$ y carbono orgánico disuelto (DOC) por IPDB durante la biorremediación posterior, una temperatura de adecuación de $33\text{ }^\circ\text{C}$, Además de un pH de 8.2 totalmente alcalino por la presencia de hidrocarburos de petróleo.

OE 3: Beneficios de las técnicas de Biorremediación

Tabla 4: Beneficios de las técnicas de biorremediación para suelos contaminados por hidrocarburos

| Beneficios de las técnicas de Biorremediación | | | | | | | |
|---|---------------------------------|---|-----------------------------|---------------------------------|------------------------|--|----------------------|
| Tipo de beneficios | Técnicas de Biorremediación | Temperatura | pH | Humedad | Tipos de hidrocarburos | Eficiencia | Fuente |
| Se considera eficiente, es de bajo costo, no requiere ninguna habilidad técnica para funcionar y, en su mayoría, no tiene un impacto negativo en el ecosistema. | Adsorción y fotocátalisis | Los microorganismos se adecuaron a una temperatura de 34 °C | El suelo oscilaba un 7.8 pH | El suelo tuvo un 24% de humedad | Petróleo crudo | Una combinación del microorganismo correcto y el control del parámetro de campo adecuado será un paso hacia el logro de una tasa más alta y aceptable de biodegradación. | Okoh et al (2020) |
| Potencial de beneficios | Bioaumentación, Bioestimulación | Se tuvo una temperatura de 28 °C | El pH del suelo fue de 6.5 | El suelo tuvo una | Aceites | <i>Paeruginosa</i> demostró ser un biorremediador | Varjani et al (2020) |

| | | | | | | | |
|--|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|-------------------------|
| agrícolas y sociales. | | | | humedad de 22% | | potencial y puede usarse para la remediación de suelos. | |
| Eficiente para la remediación de un suelo arenoso contaminado artificialmente con crudo liviano. | Biosurfactación, Bioestimulación | Se tuvo una temperatura de 38 °C | El pH del suelo fue de 7.8 | El suelo tuvo una humedad de 18% | Aceites y grasas, Petróleo crudo | Se concluyó que los métodos de bioestimulación son herramientas importantes en la remediación del ambiente impactado por derrames de petróleo. | Silva et al. (2021) |
| Reduce la toxicidad de los suelos contaminados por hidrocarburos. | Biodegradación | Se tuvo una temperatura de 29 °C | El pH del suelo fue de 7.2 | El suelo tuvo una humedad de 23% | Petróleo crudo | La biorremediación se puede aplicar para suelos con contaminación de petróleo <5% solamente. | Vasilyeva et al. (2020) |
| Ayuda a recuperar la | Biodegradación, Bioaumentación | Se tuvo una temperatura de 34 °C | El pH del suelo fue de 8.4 | El suelo tuvo una | Petróleo | La tasa de degradación del | Shi et al. (2020) |

| | | | | | | | |
|--|--|--|--|-------------------|--|--|--|
| comunidad microbiana existente en el suelo. | | | | humedad de 20% | | diésel por bioaumentación fue de 71,86 % en 45 días, superando en 38 % al sin bioaumentación. | |
|--|--|--|--|-------------------|--|--|--|

Tabla 5: Beneficios de biorremediación de suelos.

| Beneficios | Fuente |
|---|-------------------------|
| Se considera eficiente, es de bajo costo, no requiere ninguna habilidad técnica para funcionar y, en su mayoría, no tiene un impacto negativo en el ecosistema. | Okoh et al (2020) |
| Potencial de beneficios agrícolas y sociales. | Varjani et al (2020) |
| Eficiente para la remediación de un suelo arenoso contaminado artificialmente con crudo liviano. | Silva et al. (2021) |
| Reduce la toxicidad de los suelos contaminados por hidrocarburos. | Vasilyeva et al. (2020) |
| Ayuda a recuperar la comunidad microbiana existente en el suelo | Shi et al. (2020) |

De acuerdo al desarrollo de la investigación en cuanto los beneficios de la biorremediación en los suelos contaminados por hidrocarburos se tuvieron que en su investigación de Okoh et al (2020) considero que son eficientes, es de bajo costo, no requiere ninguna habilidad técnica para funcionar y, en su mayoría, no tiene un impacto negativo en el ecosistema. Seguidamente en cuanto a su investigación de Varjani et al (2020) determinaron los veneficios como un potencial de beneficios agrícolas y sociales descontaminado el suelo y contribuyendo a su normalidad de estado natural. Asimismo, en cuanto a su investigación de Silva et al. (2021), tuvo una eficiencia en la remediación de un suelo arenoso contaminado artificialmente con crudo liviano de petróleo. Donde en comparación con otras investigaciones de Shi et al. (2020), Ayudo a la recuperación y degradación del contaminante de petróleo con la comunidad microbiana existente en el suelo, volviendo a su estado natural en beneficio al medio ambiente.

V. CONCLUSIONES

OE1: Se conocieron que las técnicas de Biorremediación en la degradación de los hidrocarburos en suelos contaminados fueron la Fitorremediación, la Bioestimulación, Bioaumentación, Biorremediación intrínseca, Compostaje que ayudaron a reducir el grado de contaminación volviendo a su estado natural del suelo, logrando el desarrollo de cualquier actividad agrícola.

OE2: Se conoció que los factores que influyeron en la Biorremediación para suelos contaminados por hidrocarburos fueron la temperatura, pH, Nutrientes, Humedad, disponibilidad de micronutrientes que dificultaron y mejoraron la biodegradación de los hidrocarburos presentes en el suelo volviendo a su estado natural aprovechado por los agricultores.

OE3: Se conocieron los beneficios sobre las técnicas de la Biorremediación de los suelos contaminados por hidrocarburos como costos bajos en la adquisición de los microorganismos, ahorro de tiempo de monitoreos, facilidad de tratamiento durante el proceso de degradación del hidrocarburo, proceso simple y manejable y ante todo contribuyendo al cuidado del medio ambiente.

VI. RECOMENDACIONES

A las autoridades cuando se produzca un derrame de petróleo optar por las técnicas de Biorremediación para degradación o eliminación de los hidrocarburos que se encuentren presentes en los suelos contaminados ya que son técnicas económicas y ecoamigable con el medio ambiente.

A los alumnos que realizan investigaciones sobre los factores que influyen en la Biorremediación para suelos contaminados por hidrocarburos tener en cuenta más los factores que mejoran o aceleran la biorremediación, para la obtención de una eficiencia en reducir el grado de contaminación.

A los investigadores tener en cuenta más beneficios del uso de técnicas de Biorremediación en suelos contaminados por hidrocarburos, en cuanto al cuidado del medio de los componentes ambientales y la biodiversidad de especies que puedan ser afectados.

REFERENCIAS

1. AGNELLO, A.C et al (2018). Biorremediación comparativa de suelos co-contaminados con metales pesados e hidrocarburos de petróleo por atenuación natural, fitorremediación, bioaumentación y fitorremediación asistida por bioaumentación [En línea] *Science of The Total Environment* Volumes 563–564, 1 September 2018, Pages 693-703 [Fecha de consulta: 12 de febrero de 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.061>
2. AQUINO Y FRANCO. Biorremediación de suelo degradado por pesticida a partir de un sustrato (Biochar inoculado con microorganismos eficientes y lixiviados) [En Línea] Universidad de Guayaquil, 2020 [Fecha de consulta: 12 de febrero de 2022] Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/50336>
3. AJONA, M y VASANTHI, P. Bioremediation of petroleum contaminated soils – A review [En línea] *Materials Today: Proceedings*, 2021 [Fecha de consulta: 7 de marzo de 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.949>
4. ANOKHINA, T et al. Alternative Naphthalene Metabolic Pathway Includes Formation of ortho-Phthalic Acid and Cinnamic Acid Derivatives in the *Rhodococcus opacus* Strain 3D [En línea] *Biochemistry* 2021 [Fecha de consulta: 27 de abril de 2022] Disponible en: (Moscow) volumen 85, pages355–368 (2020)
5. BORDA Y LAHURA. Eficiencia del *Acinetobacter* SP. y *Pseudomonas* SP. en la biorremediación de suelos contaminados con aceites dieléctricos minerales [En Línea] Universidad Nacional de Ingeniería, 2018 [Fecha de consulta: 7 de marzo de 2022] Disponible en: <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/12483>
6. CAI Pingping, et al (2020) Diagnosing bioremediation of crude oilcontaminated soil and related geochemical processes at the field scale through microbial community and functional genes [En línea] *Annals of microbiology – volume 70* [Fecha de consulta: 13 de marzo del 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s13213-020-01580-8x>
7. CELIN Mary, et al (2020). Environmental monitoring approaches used during bioremediation of soils contaminated with hazardous explosive chemicals [En línea]

- Trends in Environmental Analytical Chemistry Volume 26 [Fecha de consulta: 15 de marzo del 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.teac.2020.e00088>
8. DAWSON, Petirrojo et al. Isoprene Oxidation by the Gram-Negative Model bacterium *Variovorax* sp. WS11 [En Línea] *Microorganisms* 2020, 8(3), 349 [Fecha de consulta: 27 de abril de 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.3390/microorganisms8030349>
 9. DHAGAT, Swasti et al. Isolation of a novel thermophilic bacterium capable of producing high-yield bioemulsifier and its kinetic modelling aspects along with proposed metabolic pathway [En Línea] *Brazilian Journal of Microbiology* volumen 51, pages135–143 (2020) [Fecha de consulta: 27 de abril de 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s42770-020-00228-x>
 10. DE LA ROSA, Nuvia et al. Biosurfactantes y su papel en la biorremediación de suelos contaminados con plaguicidas [En Línea] Open Access Published: 16 October 2018 [Fecha de consulta: 7 de marzo de 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.7603/s40682-014-0004-8>
 11. FENG, Leiyu et al. Petroleum hydrocarbon-contaminated soil bioremediation assisted by isolated bacterial consortium and sophorolipid [En línea] *Environmental Pollution* Volume 273, 15 March 2021, 116476 [Fecha de consulta: 7 de Marzo de 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116476>
 12. FIGUEROSA Y RAMOS. Biorremediación del lecho del manglar de Puerto Hualtaco, utilizando bacterias nativas [En Línea] Universidad de Guayaquil, [Fecha de consulta: 7 de marzo de 2022] Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/57463>
 13. GENG Shuying, et al. Microbial diversity and co-occurrence patterns in deep soils contaminated by polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [En línea] *Ecotoxicology and Environmental Safety* – Volume 203 [Fecha de consulta: 12 de febrero del 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110931>
 14. HAZAIMEH, Mohammad et al. Effects of plant density on the bioremediation of soils contaminated with polyaromatic hydrocarbons [En Línea] *Emerging Contaminants* Volume 5, 2019, Pages 123-127 [Fecha de consulta: 12 de febrero de 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2019.03.001>

15. HOANG, Son et al. Rhizoremediation as a green technology for the remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils [En Línea] Journal of Hazardous Materials Volume 401, 5 January 2021, 123282 [Fecha de consulta: 07 de marzo de 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123282>
16. HUIZA, Karen. Remediación de suelos contaminados con metales pesados mediante especies del género Brassica [En Línea] Universidad Científica del Sur, 2019, [Fecha de consulta: 06 de febrero de 2022] Disponible: <https://hdl.handle.net/20.500.12805/891>
17. KEBEDE, Gessesse et al. Factors Influencing the Bacterial Bioremediation of Hydrocarbon Contaminants in the Soil: Mechanisms and Impacts [En Línea] Revista de Química volumen 2021 [Fecha de consulta: 12 de febrero de 2022] Disponible: <https://doi.org/10.1155/2021/9823362>
18. KUYAKINA, María et al. Hydrocarbon- and metal-polluted soil bioremediation: progress and challenge: Csiro Publishing [En línea] Publishing Microbiology Australia, Bringing Microbiologists Together [Fecha de consulta: 25 de febrero del 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.1071/MA18041>
19. LI, Lu et al (2022). Efficient removal of heavily oil-contaminated soil using a combination of fenton pre-oxidation with biostimulated iron and bioremediation [En Línea] Journal of Environmental Management Volume 308, 15 April 2022, 114590 [Fecha de consulta: 12 de febrero de 2022] Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114590>
20. LI, Qian et al (2020). Application of alkyl polyglycosides for enhanced bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil using *Sphingomonas changbaiensis* and *Pseudomonas stutzeri* [En Línea] Science of The Total Environment Volume 719, 1 June 2020, 137456 [Fecha de consulta: 13 de febrero de 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137456>
21. LI, Qianwei et al. Fungal bioremediation of soil co-contaminated with petroleum hydrocarbons and toxic metals [En Línea] Applied Microbiology and Biotechnology volume 104, pages8999–9008 (2020) [Fecha de consulta: 27 de febrero de 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10854-y>

22. LIU Huiling et al. Bioremediation of oil-contaminated soil by combination of soil conditioner and microorganism [En línea] Journal of Soils and Sediments volumen 20 [Fecha de consulta: 26 de febrero del 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02591-6>
23. MACHADO Thaís et al. (2020) Effects of homemade biosurfactant from *Bacillus methylotrophicus* on bioremediation efficiency of a clay soil contaminated with diesel oil [En línea] Ecotoxicology and Environmental Safety – volume 201 [Fecha de consulta: 23 de marzo del 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110798>
24. OKOH E, et al. (2020) Clean-up of crude oil-contaminated soils: bioremediation option [En línea] International Journal of Environmental Science and Technology [Fecha de consulta: 10 de febrero del 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02605-y>
25. PERINI, Brayan et al. Surfactant-enhanced in-situ enzymatic oxidation: A bioremediation strategy for oxidation of polycyclic aromatic hydrocarbons in contaminated soils and aquifers [En Línea] Journal of Environmental Chemical Engineering Volume 8, Issue 4, August 2020, 104013 [Fecha de consulta: 27 de febrero de 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104013>
26. POPOOLA Y YUSUFF. Optimization and characterization of crude oil contaminated soil bioremediation using bacteria isolates: Plant growth effect [En Línea] South African Journal of Chemical Engineering Volume 37, July 2021, Pages 206-213 [Fecha de consulta: 13 de febrero de 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2021.06.004>
27. PORQUÉ LG, et al. Bioremediation treatability assessment of hydrocarbon-contaminated soils from Eureka, Nunavut. [En línea] Cold Regions Science and Technology Volume 32 [Fecha de consulta: 1 de marzo del 2022] Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(00\)00025-2](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(00)00025-2)
28. RAMADASS, Kavitha et al (2018). Bioavailability of weathered hydrocarbons in engine oil-contaminated soil: Impact of bioaugmentation mediated by *Pseudomonas* spp. on bioremediation [En Línea] Science of The Total Environment Volume 636, 15

- September 2018, Pages 968-974 [Fecha de consulta: 13 de febrero de 2022]
Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.379>
29. ROMERO, María et al. Modelling the ex-situ bioremediation of diesel-contaminated soil in a slurry bioreactor using a hydrocarbon-degrading inoculant [En Línea] Journal of Environmental Management Volume 246, 15 September 2019, Pages 840-848 [Fecha de consulta: 13 de febrero de 2022] Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.034>
30. SALES, Isrrael et al. Soil Bioremediation: Overview of Technologies and Trends [En Línea] Environmental and Energetic Valorization of Renewable Resources, 2020 [Fecha de consulta: 13 de febrero de 2022] Disponibile en: <https://doi.org/10.3390/en13184664>
31. SILVA MG, et al. Comparative evaluation of different bioremediation techniques for crude oil-contaminated soil [En línea] International Journal of Environmental Science and Technology volumen 19 [Fecha de consulta: 20 de marzo del 2022] Disponibile en: <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03325-y>
32. SRAVYA Y SANGEETHA. Feasibility study on bioremediation techniques to contaminated soils [En Línea] Materials Today: Proceedings Available online 6 January 2022 [Fecha de consulta: 14 de febrero de 2022] Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.364>
33. SARMA, Roy. Potencial de biorremediación de cepas bacterianas degradantes de hidrocarburos nativos en suelos contaminados con petróleo crudo bajo estudio de microcosmos [En línea] International Biodeterioration & Biodegradation Volume 94, October 2019, Pages 79-89 [Fecha de consulta: 14 de febrero de 2022] Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.03.024>
34. SHI Ke, et al(2020) Study on the degradation performance and bacterial community of bioaugmentation in petroleum-pollution seawater [En línea] Journal of Environmental Chemical Engineering – volume 8 [Fecha de consulta: 22 de febrero del 2022] Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103900>
35. TAVARES, Tania et al. Activity of Specialized Biomolecules against Gram-Positive and Gram-Negative Bacteria [En Línea] Antibiotics 2020, 9(6), 314 [Fecha de

consulta: 07 de febrero de 2022] Disponible:
<https://doi.org/10.3390/antibiotics9060314>

36. Tawniczak, Lukasz et al. Microbial Degradation of Hydrocarbons Basic Principles for Bioremediation: A Review [En Línea] *Molecules* 2020, 25(4), 856 [Fecha de consulta: 07 de febrero de 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.3390/molecules25040856>
37. VÁSQUEZ, William. Fitorremediación con *Sesuvium portulacastrum* para disminuir la contaminación salina de suelos en San Juan La Punta Tumán, 2018 [En Línea] Universidad César Vallejo, 2018 [Fecha de consulta: 07 de febrero de 2022] Disponible: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/16534>
38. VALENZUELA, Ibonne et al. Técnicas de biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos con fines de uso en el Municipio de Tibú, Norte de Santander [En línea] *Dialnet* Vol. 51, Nº. 1-2, 2021, págs. 107-118 [Fecha de consulta: 14 de febrero de 2022] Disponible en: DOI: 10.47864/SE (51)2021p107-118_136 ISSN: 0562-5351
39. VARJANI, Sunita et al. Bioremediation of oily sludge polluted soil employing a novel strain of *Pseudomonas aeruginosa* and phytotoxicity of petroleum hydrocarbons for seed germination [En línea] *Science of The Total Environment* Volume 737, 1 October 2020, 139766 [Fecha de consulta: 14 de febrero de 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139766>
40. VARJANI, Sunita et al. Influence of abiotic factors, natural attenuation, bioaugmentation and nutrient supplementation on bioremediation of petroleum crude contaminated agricultural soil [En línea] *Journal of Environmental Management* Volume 245, 1 September 2019, Pages 358-366 [Fecha de consulta: 14 de febrero de 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.070>
41. VASILYEVA, Galina et al, Adsorptive bioremediation of soil highly contaminated with crude oil [En línea] *Science of the Total Environment* Volume 706, 1 March 2019 [Fecha de consulta: 25 de febrero del 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135739>
42. VIESSER Jessica, et al. (2020). Petroleum-Tolerant Rhizospheric Bacteria: Isolation, Characterization and Bioremediation Potential [En línea] *Scientific Reports* Volume 10 [Fecha de consulta: 01 de marzo del 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59029-9>

43. WERHANI, Rim et al (2022). Combined bioaugmentation and biostimulation techniques in bioremediation of pentachlorophenol contaminated forest soil [En Línea] *Chemosphere* Volume 290, March 2022, 133359 [Fecha de consulta: 05 de marzo de 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133359>
44. WHYTE, L. Bioremediation treatability assessment of hydrocarbon-contaminated soils from Eureka, Nunavut [En Línea] *Cold Regions Science and Technology* Volume 32, Issues 2–3, September 2021, Pages 121-132 [Fecha de consulta: 05 de marzo de 2022] Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(00\)00025-2](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(00)00025-2)
45. Wu, Chen et al (2021). Genetically engineered microbial remediation of soils co-contaminated by heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons: Advances and ecological risk assessment [En Línea] *Journal of Environmental Management* Volume 296, 15 October 2021, 113185 [Fecha de consulta: 15 de febrero de 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113185>
46. ZHANG, Meng (2021). Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons contaminated soil under the superimposed electric field condition [En Línea] *Chemosphere* Volume 273, June 2021, 128723 [Fecha de consulta: 15 de febrero de 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128723>
47. ZHANG, Hanyan et al (2020). Bioremediation of co-contaminated soil with heavy metals and pesticides: Influence factors, mechanisms and evaluation methods [En Línea] *Chemical Engineering Journal* Volume 398, 15 October 2020, 125657 [Fecha de consulta: 15 de febrero de 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125657>
48. ZHANG, Chao et al. Bioremediation of oil contaminated soil using agricultural wastes via microbial consortium [En Línea] *Scientific Reports* volume 10, Article number: 9188 (2020) [Fecha de consulta: 15 de febrero de 2022] Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-66169-5>
49. ZHAO, Lei et al. Analysis of Factors Influencing Plant–Microbe Combined Remediation of Soil Contaminated by Polycyclic Aromatic Hydrocarbons [En Línea] *Sustainability* 2021, 13(19), 10695 [Fecha de consulta: 15 de febrero de 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su131910695>

50. ZHEN, Lisha et al. Succession of microbial communities and synergetic effects during bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil enhanced by chemical oxidation [En Línea] Journal of Hazardous Materials Volume 410, 15 May 2021, 124869, [Fecha de consulta: 16 de febrero de 2022] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124869>

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia

| Problema | Objetivo | Categorías | Subcategorías | Indicadores | Escala |
|---|---|---|---|--|---|
| PG: ¿Cuál será los modelos de Biorremediación para suelos contaminados por hidrocarburos, Revisión Sistemática, 2022? | OG: Determinar los modelos de Biorremediación para suelos contaminados por hidrocarburos, Revisión Sistemática, 2022. | Técnicas de Biorremediación | <ul style="list-style-type: none"> • Fitorremediación • Bioestimulación • Bioaumentación • Biorremediación intrínseca • Compostaje | <ul style="list-style-type: none"> • Uso de plantas • Circulación de soluciones acuosas • Uso de microorganismos vivos • Remediación natural • Abonos orgánicos | Nominal |
| Problema específico | Objetivo Específicos | | | | |
| PE1: ¿Cuáles son los modelos de Biorremediación para degradar hidrocarburos en suelos contaminados? | OE1: Determinar los modelos de Biorremediación para degradar hidrocarburos en suelos contaminados | Factores que influyen en la Biorremediación | <ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidad de bacterias • Formación de biopelículas • Potencial redox de las bacterias • Efecto del biosurfactante • Región del suelo • Disponibilidad de nutrientes • Temperatura • pH • Salinidad | <ul style="list-style-type: none"> • Requerimiento de las bacterias a utilizar • Formación de bandas • Requerimiento de energía • Saturación de hidrocarburos • Zona vadoza • Nutrientes para el metabolismo • Temperatura de adaptación • pH neutro • Aumento de sal natural | Nominal |
| PE2: ¿Cuáles son los mecanismos de acción de los modelos de Biorremediación para suelos contaminados por hidrocarburos? | OE2: Determinar los mecanismos de acción de los modelos de Biorremediación para suelos contaminados por hidrocarburos | | | <ul style="list-style-type: none"> • Costo bajo • Ahorro de tiempo • Facilidad de tratamiento • Proceso simple | <ul style="list-style-type: none"> • Ahorro de dinero • Tiempo disponible |
| PE3: ¿Cuál será el beneficio de los modelos de Biorremediación en suelos contaminados por hidrocarburos? | OE3: Conocer los beneficios de los modelos de Biorremediación en suelos contaminados por hidrocarburos. | Beneficios de las técnicas de Biorremediación | | | |