



Universidad César Vallejo

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Revisión sistemática: Biopila como técnica de tratamiento para  
suelos contaminados por crudo de petróleo y derivados**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

Ingeniero Ambiental

**AUTORES:**

Viera Ancajima, Fernando David ([orcid.org/0000-0001-7685-3454](https://orcid.org/0000-0001-7685-3454))

Yesquen Aldana, Dayhana Belen ([orcid.org/0000-0002-5528-7390](https://orcid.org/0000-0002-5528-7390))

**ASESOR:**

Mg. Ugarte Alván, Carlos Alfredo ([orcid.org/0000-0001-6017-1192](https://orcid.org/0000-0001-6017-1192))

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Calidad y Gestión de los Recursos Naturales

**LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:**

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

**LIMA - PERÚ**

2022

## **Dedicatoria**

Esta investigación la dedicamos a nuestra familia, por el apoyo incondicional e impulsarnos a cada día ser mejores tanto de manera personal como profesional, así mismo a cada uno de nuestros amigos y amigas que nos motivaron con sus palabras de aliento.

## **Agradecimientos**

Agradecemos a Dios por sostenernos en todo momento y ayudarnos a salir adelante y a la universidad César Vallejo por habernos acogido y dado la oportunidad de ser parte de ella para seguir creciendo profesionalmente.

## Índice de contenidos

|  |      |
|--|------|
| Carátula.....  | i    |
| Dedicatoria.....   | ii   |
| Agradecimientos .....  | iii  |
| Índice de contenidos.....                                      | iv   |
| Índice de tablas .....   | v    |
| Índice de gráficos y figuras.....                              | vi   |
| RESUMEN .....  | vii  |
| ABSTRACT.....  | viii |
| I. INTRODUCCIÓN.....   | 1    |
| II. MARCO TEÓRICO.....   | 4    |
| III. METODOLOGÍA .....   | 20   |
| 3.1 Tipo y diseño de investigación .....                       | 20   |
| 3.2 Categorías, Subcategorías y matriz de categorización ..... | 20   |
| 3.3 Escenario de estudio .....                                 | 22   |
| 3.4 Participantes.....   | 22   |
| 3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....       | 22   |
| 3.6 Procedimiento .....  | 22   |
| 3.7 Rigor científico .....                                     | 23   |
| 3.8 Método de análisis de datos .....                          | 24   |
| 3.9 Aspectos éticos.....                                       | 25   |
| IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....                                | 26   |
| V. CONCLUSIONES.....   | 38   |
| VI. RECOMENDACIONES .....                                      | 39   |
| REFERENCIAS.....   | 40   |
| ANEXOS .....   | 49   |

## Índice de tablas

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Tabla 1: Resumen de Antecedentes .....</b>               | <b>4</b>  |
| <b>Tabla 2: Componentes del petróleo.....</b>               | <b>13</b> |
| <b>Tabla 3: Fraccionamiento del crudo .....</b>             | <b>15</b> |
| <b>Tabla 4: Matriz de Categorización Apriorística.....</b>  | <b>21</b> |
| <b>Tabla 5: Efectividad de la técnica de Biopilas .....</b> | <b>26</b> |
| <b>Tabla 6: Microorganismos usados en las biopilas.....</b> | <b>35</b> |

## Índice de gráficos y figuras

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Figura 1: Producción de combustibles .....</b>  | <b>14</b> |
| <b>Figura 2: Clasificación de técnicas de biorremediación.....</b>                               | <b>16</b> |
| <b>Figura 3: Funcionamiento de las biopilas .....</b>  | <b>17</b> |
| <b>Figura 4: Tratamientos de biorremediación que pueden ser incorporados a las biopilas.....</b> | <b>18</b> |
| <b>Figura 5: Bacterias degradadoras de hidrocarburos .....</b>                                   | <b>19</b> |
| <b>Figura 6: Procedimiento .....</b>   | <b>23</b> |
| <b>Figura 7: Análisis de datos.....</b>  | <b>24</b> |
| <b>Figura 8: Mecanismos de biorremediación en la biopila .....</b>                               | <b>34</b> |

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como finalidad determinar la efectividad de la técnica de biorremediación por biopila para el tratamiento en suelos contaminados por crudo de petróleo y derivados; este fue realizado mediante una revisión sistemática, de tipo cualitativo; mediante el uso de análisis documental. Se recopilaron artículos científicos de diferentes autores a nivel mundial procedentes de bases de datos como: Scimedirect, Springerlink, y Scielo. Estos artículos fueron sometidos a un proceso previo de selección, para que cumplieran los criterios requeridos para la investigación, logrando seleccionar 30 artículos científicos. El análisis de los artículos puede afirmar que la efectividad de la técnica de biorremediación por biopila superó el 80% en un mayor porcentaje de investigaciones y en un 50% en un porcentaje menor. Los mecanismos que pueden mejorar la efectividad del sistema son la bioaumentación y bioestimulación, obteniendo mejores resultados el uso combinado de ambos mecanismos. Los microorganismos que ayudan a mejorar la efectividad del sistema son muy diversos entre los investigadores, pero destaca el uso de *Pseudomonas* como uno de los microorganismos en común entre los investigadores.

**Palabras clave:** biopilas, biorremediación, contaminación, suelo, petróleo.

## **ABSTRACT**

The purpose of this research work was to determine the effectiveness of the biopile bioremediation technique for the treatment of soils contaminated by crude oil and derivatives; this was carried out through a systematic, qualitative review; through the use of documentary analysis. Scientific articles from different authors worldwide were collected from databases such as: Scencedirect, Springerlink, and Scielo. These articles were subjected to a previous selection process, so that they met the criteria required for the investigation, managing to select 30 scientific articles. The analysis of the articles can affirm that the effectiveness of the biopile bioremediation technique exceeded 80% in a higher percentage of investigations and 50% in a lower percentage. The mechanisms that can improve the effectiveness of the system are bioaugmentation and biostimulation, with the combined use of both mechanisms obtaining better results. The microorganisms that help improve the effectiveness of the system are very diverse among researchers, but the use of *Pseudomonas* stands out as one of the microorganisms in common among researchers.

**Keywords:** biopiles, bioremediation, pollution, soil, oil.

## I. INTRODUCCIÓN

Los productos derivados del crudo de petróleo siguen siendo una importante fuente de energía para la vida diaria y las actividades industriales. Los derrames en los ecosistemas son frecuentes durante la exploración, producción, refinación, transporte y almacenamiento de petróleo y sus derivados (Alvarez y Vogel 1991). Producto de esto, los componentes de los productos derivados del petróleo pueden causar genotoxicidad y enfermedades a humanos y animales (Ossai et al. 2020).

Los suelos contaminados por las fugas y derrames de petróleo y sus productos son motivo de creciente preocupación (Zheng et al. 2021). Por lo tanto, los suelos contaminados con TPH necesitan ser remediados inmediatamente para prevenir sus amenazas a los humanos y ecosistemas (Ossai et al. 2020).

Los derivados de petróleo contienen una gama de productos químicos que son extremadamente tóxicos y cancerígenos por naturaleza. Aunque los métodos físicos o químicos se emplean ampliamente para la remediación, muchos estudios han demostrado como un método sostenible a la biorremediación. La biorremediación es una tecnología utilizada para tratar contaminados mediante el uso de agentes biológicos capaces de modificar o descomponer los contaminantes diana, transformándolos en productos menos complejos (Gomez y Sartaj 2014). La biorremediación puede ocurrir de forma intrínseca o natural, es decir, sin ninguna interferencia de las tecnologías de remediación activa, pero también puede bioestimularse con la adición de nutrientes, oxígeno y surfactantes, o puede biomejorarse con la inoculación de consorcios microbianos enriquecidos (Agnello et al. 2016).

Las tecnologías de biorremediación integradas y mejoradas son más efectivas que la degradación natural de los hidrocarburos de petróleo en términos de menor período de tiempo y porcentaje de eficiencia de eliminación (Naeem y Qazi 2020).

Este proceso de biorremediación puede llevarse de dos formas (biorremediación ex situ y biorremediación in situ) esto haciendo referencia al lugar en donde se llevará a cabo la biorremediación, también de diversos factores entre los que se puede considerar, el costo, las características del sitio, el tipo de contaminante y la concentración del contaminante.

Entre las técnicas de biorremediación ex situ tenemos a las biopilas, esta técnica implica el amontonamiento sobre el suelo de suelo contaminado excavado, posteriormente se le agregan enmiendas con nutrientes y, a veces, aireación con el objetivo de mejorar la biorremediación esto genera el aumentando las actividades microbianas (Azubuike, Chikere y Okpokwasili 2016). En los últimos este método se viene usando de manera más consecutiva en las diversas investigaciones para el tratamiento de suelos contaminados, esto se debe a sus características constructivas, entre las que se encuentran sus bajos costos de construcción y operación, estas biopilas permiten que se produzca una biodegradación muy efectiva bajo la condición de que los nutrientes, la temperatura y la aireación sean controlados de manera adecuada (Whelan et al. 2015). El uso de biopilas en sitios contaminados contribuye a limitar la volatilización de contaminantes de bajo peso molecular; también se puede usar de manera efectiva para el tratamiento en ambientes contaminados con climas extremos como las regiones polares (Dias et al. 2015; Gomez y Sartaj 2014; Whelan et al. 2015).

Investigaciones previas realizadas en diferentes lugares del mundo acerca de las biopilas señalan: que el uso de bacterias endógenas altamente adaptadas a condiciones climatológicas adversas podría ser una opción viable para el tratamiento de suelos contaminados por hidrocarburos, a causa de que estas bacterias están adaptadas a altas temperaturas muy comunes en Qatar (AlKaabi et al. 2020). Otro estudio realizado en Canadá demuestra que el suministro de nutrientes es una manera efectiva de mejorar la actividad de biodegradación en las biopilas durante estaciones de temperaturas bajas e incluso si la biopila fue sometida a periodos de congelación y descongelación estacional (Kim, Lee y Chang 2018).

Esta investigación realizará un análisis acerca de la efectividad de la técnica de biorremediación por biopila para el tratamiento de suelos contaminados por crudo de petróleo y derivados. Asimismo, esta investigación pretende analizar diferentes métodos de biorremediación que pueden ser aprovechados e integrados a la técnica de biopilas con el fin de mejorar su efectividad. En este marco se planteó como problema general:

¿Cuál es la efectividad de la técnica de biorremediación por biopila para el tratamiento en suelos contaminados por crudo de petróleo y derivados?

Asimismo, nos planteamos los siguientes problemas específicos:

- ❖ ¿Qué mecanismos de biorremediación han sido integrados al sistema de biopilas para mejorar su efectividad?
- ❖ ¿Cuáles son los tipos de microorganismos que su efectividad fue mayor con la técnica de biopilas en Biorremediación de suelos contaminados por crudo de petróleo y derivados?

La presente investigación se justifica teóricamente, mediante la recolección de estudios actualizados sobre el uso de técnicas de biorremediación dando mayor énfasis a la técnica de biopilas, con el interés de mostrar una alternativa de remediación sostenible, ecológica y en beneficio de los ecosistemas, de esta manera lograremos incentivar a que se realicen investigaciones acerca de la viabilidad de esta técnica de biorremediación. De acuerdo a la descripción de la problemática presentada, se planteó como objetivo general lo siguiente:

- ❖ Analizar la efectividad de la técnica de biorremediación por Biopilas en suelos contaminados por crudo de petróleo y derivados.

Y como objetivos específicos tenemos:

- ❖ Evaluar qué mecanismos de biorremediación han sido integrados al sistema de biopilas para mejorar su efectividad.
- ❖ Indicar los tipos de microorganismos que su efectividad fue mayor con la técnica de biopilas.

## II. MARCO TEÓRICO

Para la elaboración de la revisión sistemática, se realizó la recopilación de información de dos bases de datos como: Scienedirect, SpringerLink, Scielo, y Alicia el periodo de búsqueda se fijó entre 2016-2022. En la siguiente tabla se detalla la información:

**Tabla 1: Resumen de Antecedentes**

| Nº | AUTOR              | METODOLOGÍA / DESCRIPCIÓN  | RESULTADOS   |
|----|--------------------|--|--|
| 1  | Kim et al.<br>2019 | El estudio llevo a cabo dos procesos: el proceso de biolavado y el proceso de biopila durante un periodo de tiempo de 20 días. En el proceso de biolavado se utilizó un cultivo de enriquecimiento de la comunidad bacteriana autóctona del suelo. En el proceso de biopila se incluye la oxidación catalizada por hemoglobina (HCO). Posteriormente se procedió con la medición de concentraciones residuales de TPH y la generación de CO2 para determinar la eficiencia de eliminación, y los cambios en la comunidad bacteriana.   | El proceso de biolavado se obtuvieron resultados un 75 % de eliminación TPH. Se observaron especies bacterianas que pueden producir surfactantes después de haber sido sometidas al proceso de biolavado.<br>En el proceso de biopila se observó al inicio una tasa de eliminación del 21% del TPH residual.<br>Ambos procesos: el biolavado y la biopila eliminaron un 86 % de TPH durante el periodo de tiempo de 20 días.   |
| 2  | Liu et al.<br>2021 | Se construyeron y operaron seis biopilas que fueron enriquecidas con la adición de las siguientes enmiendas diferentes: salvado rojo, fertilizante soluble en agua, agua altamente oxigenada, cultivo bacteriano degradante de hidrocarburos de petróleo, mezcla de las enmiendas anteriores. Los suelos se mezclaron con enmiendas y se labraron para obtener suplementos de aire dos veces por semana con una humedad del suelo de alrededor del 25 %. Se aplicaron análisis metagenómicos para determinar la biodiversidad microbiana y las cepas responsables de la biodegradación de hidrocarburos. | Los resultados muestran que el sistema de biopila con suplementos mixtos (mezcla de las enmiendas anteriores) obtuvo la mayor eficiencia de eliminación de TPH (79 % de eliminación), en segundo lugar, de eficiencia se encontró el grupo con adición de salvado rojo seguido (73 %de eliminación) durante un periodo de tiempo de operación de 42 días.<br>Las biopilas con salvado rojo y mezcla contenían en su interior sustratos de carbono y nutrientes, que podrían activar de manera efectiva las actividades microbianas y acelerar la biodegradación de contaminante. |

| Nº | AUTOR             | METODOLOGÍA / DESCRIPCIÓN  | RESULTADOS   |
|----|-------------------|--|--|
| 3  | Zhang et al. 2021 | Recolección de muestras de suelo contaminado con petróleo del campo petrolífero de Jilin, China. Posteriormente se realizó el diseño y la construcción del sistema de biopila. El suelo fue sometido a condiciones (C: 100, N:5, P:1 y el contenido de humedad del al 18%), durante el proceso de biorremediación el pH del suelo se mantuvo en el rango entre 7.4 a 6.8. Las condiciones mesófilas (30 C-40 C) y aireación forzada (3 h-on/1 h-off) esto influyó de gran manera el proceso de biorremediación.                | Existió una diferencia significativa en la eliminación de TPH bajo diferentes temperaturas y modos de aireación. Con una disminución en la tasa de aireación bajo cada temperatura, el grado de degradación aumentó. Las condiciones óptimas (40 C, 3 h-on/1 h-off) promovieron la degradación del petróleo y mantuvieron la abundancia microbiana y su composición estables en el mayor tiempo posible. |
| 4  | Zheng et al. 2021 | Se construyó una biopila mejorada en un invernadero (GEB) a escala de campo con el objetivo obtener datos específicos sobre las funciones de la volatilización y la degradación microbiana. Posteriormente se realizaron cuatro ensayos de campo que agregaron como material estimulante estiércol de vaca y microorganismos exógenos en invernaderos construidos en Qingyang, China.  | El estiércol de vaca tuvo poco efecto sobre la comunidad microbiana de la biopila. Los microorganismos incubados inicialmente tuvieron efecto al cambiar la composición de la comunidad microbiana, sin embargo, tuvieron pocos efectos sobre la degradación del petróleo. La temperatura de los invernaderos podría afectar a la degradación microbiana y a la volatilización del petróleo.             |
| 5  | Anza et al. 2016  | Se construyeron cuatro biopilas, en las cuales fueron desarrollados tres tratamientos. La biopila testigo fue contaminada con concentraciones 30,000 ppm. La biopila del primer tratamiento 10,000 ppm. La biopila del segundo tratamiento 30,000 ppm y la biopila del tercer tratamiento con 50,000 ppm de hidrocarburos totales del petróleo (HTP). Las cepas microbianas utilizadas fueron Acinetobacter Sp, Sphingobacterium Sp y Stenotrophomona Sp. Los tratamientos fueron monitoreados en los días 1, 15, 30, 60 y 90. | Se obtuvieron porcentajes de remoción altos, en la remoción alifática se obtuvo 93.7 a 87.1% y en la fracción hidrocarbonada aromática se obtuvo remociones de 0 a 94.8 durante el periodo de 90 días que duro el tratamiento.   |

| Nº | AUTOR                | METODOLOGÍA / DESCRIPCIÓN   | RESULTADOS  |
|----|----------------------|---|---|
| 6  | Jiang et al. 2021    | Se construyeron tres biopilas a escala piloto: (1) pila de agente de carga, (2) Pila de nutrientes, (3) Pila de control, para tratar suelos envejecidos contaminados con petróleo. Se aplicó Micro-CT para obtener las características de los poros de las pilas. Se agregaron agente de carga y nutrientes en dos de las biopilas, y la otra pila se usó como control.   | Los resultados obtenidos señalan que el agente de carga tuvo un efecto positivo sobre la biopila y sus poros. La porosidad se incrementó de 0,33 a 3,32 % de la pila de control a. La tasa total de eliminación de TPH fueron: 36,82–49,18% (agente de carga), 20,07–23,43% (nutrientes) y 17,57–27,08% (control).  |
| 7  | Pérez et al. 2020    | Los factores abióticos fueron obtenidos durante el monitoreo semanal durante el periodo de tiempo de 365 días que duro el proceso de biorremediación. Se llevaron a cabo 7 tratamientos en biopilas y se agregaron estimulantes (mezcla de suelo, pulpa de café, hidrocarburo, estiércol animal, bagazo, aserrín y <i>Thalassia testudinum</i> ). Los tratamientos fueron homogenizados y aireados manualmente durante quince días y se humectaron con una frecuencia de cuatro 4 días. Las variables climáticas fueron obtenidas de una estación meteorológica. Para el muestreo de pH y también para la humedad se tomaron pequeñas submuestras de poca profundidad y superficie. | Los resultados señalan que no hay una relación directa entre las variables climatológicas y los cambios en el pH y como consecuencia del tratamiento. <i>Thalassia testudinum</i> y Bagazo, ofrecieron mejores resultados del tratamiento mayor al 20% preestablecido.  |
| 8  | Bisognin et al. 2018 | De esta biopila se evaluaron concentraciones de TPH y BTEX en nueve puntos. Cada recolección de muestras de suelo se utilizó para realizar el estudio microbiológico mediante el análisis de sus estructuras reproductivas láminas de microcultivo, y bacterias por la técnica de Polymerase Reaction Chair y secuenciación de genes. De las muestras de suelo fueron aisladas 101 cepas de microorganismos.  | En el estudio se observaron altos porcentajes de reducción en las concentraciones de TPH en un 92 % y de BTEX en un 100% en la biopila. Los resultados de los aislamientos de los microorganismos demostraron la capacidad degradación de hidrocarburos de algunos géneros de hongos como <i>Aspergillus</i> , <i>Penicillium</i> y <i>Verticillium</i> y bacterias tales como <i>Bacillus</i> spp. y <i>Streptomyces</i> sp. |

| Nº | AUTOR                 | METODOLOGÍA / DESCRIPCIÓN  | RESULTADOS   |
|----|-----------------------|--|--|
| 9  | Kim, Lee y Chang 2018 | Se construyeron biopilas de 3500 kg en Saskatoon, Canadá (tratadas y no tratadas). La biopila tratada recibió nutrientes a base de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), antes de la congelación estacional, la biopila no tratada no se modificó y se usó como control. Hubo un monitoreo constante debido a las variables climatológicas. Para los análisis de hidrocarburos de petróleo, se utilizaron de 9 a 15 réplicas de muestras de suelo por capa de suelo, por día de muestreo, por biopila. | La biopila tratada produjo y consumió más CO <sub>2</sub> y O <sub>2</sub> respectivamente. La biopila tratada obtuvo una remoción de TPH de 58%. Durante la congelación la biopila tratada obtuvo mejores resultados.   |
| 10 | Ma et al. 2016        | Se construyeron cuatro biopilas: 1) B. Directa (DW), 2) B. y consorcio microbiano, 3) B. con consorcio microbiano y agentes de carga, 4) B. con consorcio microbiano, agentes de carga y nutrientes inorgánicos, el experimento ocurrió durante un periodo de tiempo de 90 días.   | Las biopilas eliminaron respectivamente el 41.0%, 44.0%, 55.7% y 87.4%. Los agentes de carga y aumentaron en 56,9% y 26,6% en la eficiencia de eliminación de TPH. Un 7,3% de aumento de eliminación se obtuvo gracias a los consorcios microbianos.                           |
| 11 | van Dorst et al. 2021 | Esta investigación de cinco años constó de dos fases: Fase inicial 12-24 relación significativa con las tasas más altas de degradación de hidrocarburos, mayores cargas microbianas. Y la segunda fase acerca de las reducciones de hidrocarburos, durando entre 36 y 60 meses.  | Durante la fase inicial se encontraron <i>Arthrobacter</i> , <i>Rhodococcus</i> y <i>Dietzia</i> responsables de la degradación. Durante la segunda fase se observó un aumento de pH y la reducción de las bacterias. Los fertilizantes interrumpieron el ciclo del nitrógeno. |
| 12 | AlKaabi et al. 2020   | Aislamiento de bacterias altamente adaptadas a condiciones ambientales adversas, de las cuales seleccionaron las que tienen capacidad para la degradación de hidrocarburos. Durante su identificación por ribotipado se encontró predominancia de <i>Bacillus</i> y <i>Virgibacillus</i> (zona industrial), y de <i>Bacillus</i> y <i>Pseudomonas</i> (zona de   | Los resultados mostraron que las bacterianas fueron muy tolerantes al diésel al 10 % y mostraron un potencial de eliminación del 20 % al 85 % de los hidrocarburos. Cuando se bioestimularon en el suelo aumentaron la remoción de componentes totales del petróleo a 53%.     |

| Nº | AUTOR                 | METODOLOGÍA / DESCRIPCIÓN   | RESULTADOS   |
|----|-----------------------|---|--|
|    |                       | costa) para su posterior aplicación. Cuando inició el proceso de bioestimularon en suelo estas bacterias aumentaron la remoción de componentes totales del petróleo.  |  |
| 13 | Ccolque y Vargas 2017 | Aislamiento y caracterización de cepas bacterianas (Uncultured bacterium; Citrobacter youngae; Bacillus sonorensis y Enterobacter hormaechei). Construcción de 4 biopilas: Biopila Testigo (consorcio bacteriano nativo y concentración de $3.38 \times 10^5$ UFC/mL), Segunda Biopila (sustrato tierra, consorcio seleccionado y concentración inicial de $9.73 \times 10^8$ ), Tercera Biopila (compost, consorcio seleccionado y concentración inicial de $8.93 \times 10^8$ UFC/mL), Cuarta Biopila (humus, consorcio seleccionado y concentración inicial de $8.31 \times 10^8$ UFC/mL). | Los resultados mostraron la efectividad del consorcio bacteriano aislado seleccionado en: la segunda biopila (38.7% de remoción de TPH), tercera biopila (37.9% de remoción de TPH), cuarta Biopila (3.1% de remoción de TPH) en una prueba de 40 días.  |
| 14 | Romero 2021           | Se construyeron biopilas en contenedores, tras esto se procedió a aumentar la biomasa bacteriana de la cepa seleccionada. Los tratamientos consistieron: T1 control (suelo contaminado), T2 (bioaumentación bacteriana), T3 (tratamiento con texturizante) y T4 (combinación de bioaumentación bacteriana y texturizante). Durante 90 días donde también se adicionó aire (continuo) y humedad (periódica).   | Los resultados establecieron que T4 presentó una remoción máxima de 58.87 %, el tratamiento T2 56.71 %, el tratamiento T3 51.80 % y el tratamiento T1 41.08 %.   |
| 15 | Wu et al. 2017        | Estudio de laboratorio que hace realiza una combinación de dos técnicas de biorremediación: bioaumentación más la bioestimulación (BR) (agregando de nutrientes y consorcios bacterianos) y la atenuación natural (NA) en la eficiencia de degradación de hidrocarburos.  | Los TPH se redujeron en 4.5% para NA y 5.0 para BR despues de 112 dias. La biorremediación no mejoró significativamente la biodegradación de TPH en comparación con NA. La degradación de la fracción alifática de NA fue de 30.3 y de BR 28.7. La actividad microbiana del suelo fue mayor para BR. |

| Nº | AUTOR               | METODOLOGÍA / DESCRIPCIÓN   | RESULTADOS  |
|----|---------------------|---|---|
| 16 | Feng et al. 2021    | Las muestras de suelo se mezclaron minuciosamente y se analizaron en cuanto a varias propiedades físico-químicas. Se investigó la eficiencia de degradación de los hidrocarburos de petróleo en un medio como el suelo contaminado con atenuación natural. Se hizo el aislamiento de consorcios indígenas degradadores de hidrocarburos además de aplicar el biosurfactante. Para finalizar se llevó a cabo la medición de la actividad enzimática clave. | En el suelo contaminado la eficiencia de biodegradación de TPH se incrementó de 12.2% y en 44.5% y 57.7% en consorcio aislado. La vida media del proceso de degradación de TPH se redujo de 32,5 días a 20,4 días en el consorcio aislado. La adición de biosurfactante en suelos contaminados mejoró la degradación de TPH.  |
| 17 | Hossain et al. 2022 | Se aislaron bacterias del suelo contaminado con aceite mediante la técnica de cultivo de enriquecimiento, utilizando sales mínimas (MS). Estas fueron identificadas por sus características morfológicas y bioquímicas como resultado se obtuvo <i>Pseudomonas</i> sp., <i>Acinetobacter</i> sp. y <i>Enterobacter</i> sp, siendo utilizadas para la biorremediación.   | Todos los aislados mostraron eficacia de degradación en 4% v/v aceite diésel y en 8% v/v aceite quemado.  |
| 18 | Sun et al. 2022     | Aislamiento de bacterias, la cepa predominante fue <i>Enterobacter</i> sp. SAVR S-1, se experimentó mediante unidades de tipo experimental cuya base eran 500 g de suelo 500 g de suelo, con diferentes soluciones bacterianas y concentraciones de TPH. Durante un tiempo 30 días.   | El análisis genómico demostró que hubo un 53,13% de aumento de la comunidad microbiana, en este análisis las halobacterias aumentaron: <i>Halomonas</i> (0,27–3,28 %), <i>Aliifodinibius</i> (1,26–1,59 %), <i>Pontibacillus</i> (0,02–0,68 %), <i>Filobacillus</i> (0,02–0,66 %).<br>El análisis filogenético demostró la asignación de genes mejorada para transportadores ABC (4,22 %), ácidos grasos (0,14 %), benzoato (0,65 %), butanoato (1,29 %), propanoato (1,35 %) metabolismo y la degradación de compuestos aromáticos (0,28 %). |
| 19 | Zivelyte, Valters y | Se analizó la concentración de inicial de contaminación y el tiempo necesario para la para degradarla.  | Los resultados de la investigación muestran mayor efectividad a la técnica in situ (atenuación natural),  |

| Nº | AUTOR                 | METODOLOGÍA / DESCRIPCIÓN   | RESULTADOS  |
|----|-----------------------|---|---|
|    | Vasarevicius 2017     | Comparándose con las investigaciones y los resultados de biorremediación a través de nanocompuestos de sílice.  | aunque depende directamente de muchos factores, pudiendo variar los resultados en función a las áreas.  |
| 20 | Popoola y Yusuff 2021 | Fueron analizados y caracterizados tres tipos de suelo: suelo natural, suelo contaminado con petróleo crudo y suelo biorremediado. Para ello se usó Espectroscopia infrarroja transformada de Fourier, cromatografía de gases-espectroscopia de masas, rayos X de dispersión de energía, analizador de carbono-hidrógeno-nitrógeno y Microscopía electrónica de barrido.  | Los resultados obtenidos señalan valores para pH del suelo (4.69 g/g), la relación nitrógeno-fósforo (7.68 g/g), la concentración de petróleo crudo (250.05 mL/L) y la concentración de bacterias aisladas (568.35 cell/g).   |
| 21 | Ajona y Vasanthi 2021 | Aislamiento de cepas microbianas de áreas cercanas del suelo contaminado con petróleo crudo. Selección de un aislado para el recombinante y un aislado de cepas nativas. Ambas cepas se inocularon en el suelo durante 42 días, sometiéndose a condiciones ambientales y a concentraciones de aceite (0,5 %, 1 %, 3 % y 5 %). El proceso de biodegradación se monitorea mediante el análisis de cromatografía de gases y espectrometría de masas. | Los resultados obtenidos señalan un mayor rendimiento de la cepa microbiana con recombinante (también mostro una degradación mayor de alcanos normales totales), en comparación a al rendimiento de la cepa microbiana salvaje.   |
| 22 | Vasilyeva et al. 2020 | Tratamiento a través del absorbente ACD (del 4 al 12% p/p) de un suelo contaminado y además un biopreparado (BP) cuya base eran bacterias degradadoras de hidrocarburos, pudiéndose aplicar separado o en combinación.  | Los resultados mostraron los suelos modificados por el ACD muestran recuentos altos de microorganismos degradadores de petróleo (nativos o introducidos por el biopreparado) y también presentan mucha menos fitotoxicidad, en comparación con las muestras sin adsorbente. |
| 23 | Saeed et al. 2021     | Para el tratamiento del suelo contaminado con petróleo se aislaron 10 cepas de rizobacterias que ayudan al crecimiento vegetal. Seleccionándose <i>Pseudoarthrobacter Phenanthrenivorans</i> (MS2) y  | Se mostró una mejor germinación del maíz mediante una combinación de ambas cepas. Los resultados mostraron que el sistema de biorremediación del microbioma vegetal mejoró el   |

| Nº | AUTOR             | METODOLOGÍA / DESCRIPCIÓN  | RESULTADOS  |
|----|-------------------|--|---|
|    |                   | Azospirillum Oryzae (MS6). Usadas para el establecimiento del sistema de microbioma vegetal.   | contenido de clorofila (30,4%), potencial hídrico (23,2%), prolina (32%), aminoácidos (11,1%), en comparación con el control bajo estrés por aceite (10%). La eficiencia de degradación de hidrocarburos de este sistema fue del 38,5%.   |
| 24 | Liu et al. 2019   | En el sitio ex situ, el suelo contaminado se dividió en dos montones separados (volumen 4,5 m <sup>3</sup> y masa 7000 kg cada uno). Uno de los montones se dejó para la remediación por atenuación natural y el otro se trató con 2% w/w MBM.                                   | Los resultados muestran que el MBM aumentó la degradación del aceite diésel (gasóleo) en los suelos en comparación con la atenuación natural. El aumento fue comparable a los suelos tratados con urea. El pH del suelo aumentó en el suelo tratado con urea, y se mantuvo en el MBM, esto significa que los suelos tratados con MBM evitan el impacto negativo habitual de la urea en el pH del suelo y, también en la degradación microbiana. |
| 25 | Hoang et al. 2021 | Detallar los principales mecanismos y factores clave en el proceso de rizorremediación con un enfoque particular en los suelos contaminados TPH. Posteriormente la eficacia de aceleración de algunas enmiendas de suelo evaluar el potencial de diferentes enmiendas del suelo. | Los resultados mostraron aspectos positivos notables en estudios de laboratorio y escala de invernadero, pero mostraron ciertas carencias y dificultades como una práctica factible en condiciones de campo.  |
| 26 | Huang et al. 2019 | Se usó desechos orgánicos paja de arroz y la aserrín a un suelo contaminado para estimar su eficacia en la eliminación TPH e PAH.  | Los resultados mostraron que para la eliminación de TPH fue más afectivo la paja de arroz y para la eliminación de PAH fue el aserrín. El análisis de coordenadas principales (PCoA) indica que el tratamiento con paja de arroz separó la comunidad bacteriana, y el aserrín favoreció la abundancia de las bacterias degradadoras de petróleo y hongos.   |
| 27 | Cai et al. 2020   | Su utilizaron nutrientes durante el proceso de biorremediación para observar sus efectos sobre la  | Los resultados mostraron que la adición de nutrientes favoreció a la variedad de microorganismos, (bacterias degradadoras de  |

| Nº | AUTOR                            | METODOLOGÍA / DESCRIPCIÓN   | RESULTADOS   |
|----|----------------------------------|---|--|
|    |                                  | comunidad microbiana y los genes funcionales y el metabolismo de los hidrocarburos.   | hidrocarburos). Los genes funcionales reflejaron la posibilidad de desnitrificación aeróbica en el campo. La bioestimulación es el medio más adecuado de biorremediación.  |
| 28 | El-Liethy et al. 2022            | Se identificó en sitios de perforación a la cepa <i>Enterobacter hormaechei</i> mediante un análisis rRNA en el desierto occidental, Egipto para el tratamiento de suelos contaminados por hidrocarburos.   | Los resultados mostraron que la cepa <i>Enterobacter hormaechei</i> degradó el 0,6 % del aceite en condiciones optimizadas de pH (7,0) y temperatura (30 °C). El resultado del análisis por cromatografía de gases capilar reveló una degradación máxima (70,7 %) de peptona por parte de <i>E. hormaechei</i> . |
| 29 | Guarino, Spada y Sciarrillo 2017 | Se utilizó en experimentos a escala: a) Atenuación natural (NA), b) Landfarming (L), c) Landfarming asistido por bioaumentación (LB). Se seleccionaron y asilaron bacterias nativas de muestras de suelo, para ser utilizados mediante bioaumentación asistido. | Los resultados mostraron tras una prueba de 90 días los efectos de reducción de hidrocarburos totales de petróleo (TPH): a) Atenuación Natural (57%), b) Landfarming (70%), c) Landfarming asistido por bioaumentación (86%).  |
| 30 | Wolińska et al. 2016             | Para el experimento se utilizó la capa superficial (0–20 cm) de Mollic Gleysol. Se contaminó el suelo con gasolina, diésel y aceites para motores de automóviles en el laboratorio.   | Los resultados revelaron la gasolina pareció ser la sustancia más tóxica para la actividad microbiana entre las demás usadas. La toxicidad de las sustancias se resume como: gasóleo > aceite nuevo > aceite usado > gasolina.   |

Como causa del crecimiento económico que ha ocurrido en el mundo en los últimos años, el consumo de petróleo y sus derivados se ha incrementado de gran manera, las fugas y los derrames accidentales se convierten en un problema habitual que puede llegar a pasar durante la exploración, producción, refinación, transporte y almacenamiento de petróleo y productos derivados del petróleo (Holliger et al. 1997). Esto ha provocado serios problemas de contaminación por petróleo y sus derivados en el suelo. Según el DS N° 002-2013-MINAM define el suelo contaminado como aquel cuyas características químicas han sido alteradas de manera negativa por la presencia de sustancias químicas contaminantes depositadas por la actividad humana y que representan un riesgo para la salud humana y el ambiente. Las consecuencias de esta contaminación del suelo son muy graves, ya que, la vegetación y la producción de biomasa se pueden ver afectadas porque interrumpen el ciclo de nutrientes, afectan a la hidrosfera y ponen en peligro los recursos hídricos subterráneos.

Según Wauquier (2004) el crudo, materia que se utiliza al refinar el petróleo, proviene de naturaleza animal y vegetal originario de campos de gas, que pasan por procesos y condiciones como temperatura y presión además de factores bacterianos. Este fluye por diversas capas y sedimentos, concentrándose en formaciones geológicas, las cuales son exploradas para su extracción. El petróleo tiene diversos compuestos estos se detallan en la siguiente tabla:

**Tabla 2: Componentes del petróleo**

| <b>COMPUESTO</b> | <b>PESO %</b>  |
|------------------|----------------|
| <b>CARBONO</b>   | <b>84-87</b>   |
| <b>HIDROGENO</b> | <b>11 - 14</b> |
| <b>AZUFRE</b>    | <b>0 - 5</b>   |
| <b>NITROGENO</b> | <b>0- 0.2</b>  |
| <b>OXIGENO</b>   | <b>0- 0.5</b>  |

Fuente: Wauquier (2004)

Las fracciones del crudo de petróleo dependen de la presencia de algunos componentes químicos específicos, estos elementos se pueden ir uniendo en elementos cada vez más complejos, son obtenidos destilación, diversos gases de

hidrocarburos (propano, butano y etano), gasolina, queroseno, diésel, aceites lubricantes y asfalto (Balciroğlu 2016).

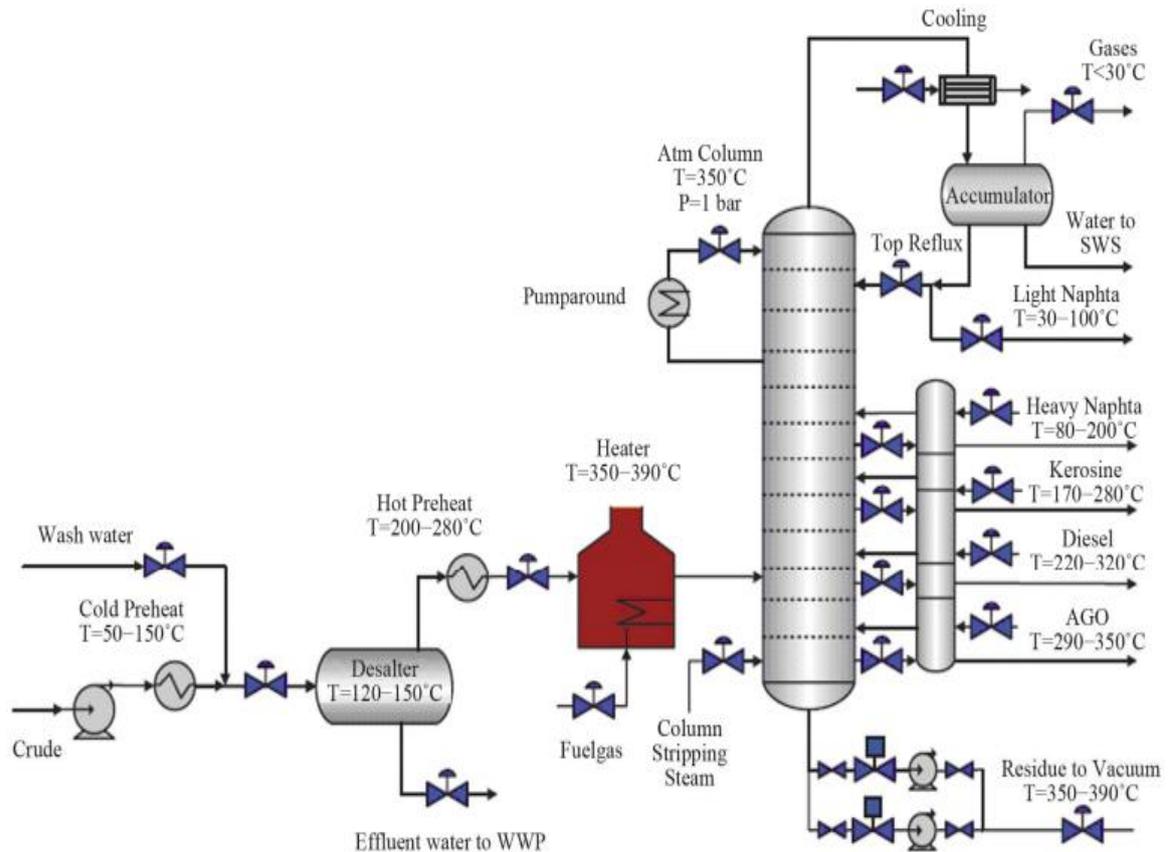


Figura 1: Producción de combustibles

Fuente: Popoola, Babagana y Susu (2013)

El petróleo crudo es una mezcla compleja de compuestos, comprende desde C6 hasta C60, aquí se incluye hidrocarburos alifáticos (isoalcanos, cicloalcanos y n-alcanos), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y sus derivados, que contienen bajos porcentajes de azufre (Borji et al. 2020). En muchos casos estos son llamados también resinas, que constan de compuestos heterocíclicos tales como aromáticos que contienen azufre nitrógeno y oxígeno (derivados de tiofeno y fenol) (Abdel-Shafy y Mansour 2016).

Para su fraccionamiento el crudo es enviado a torres en donde se separa en proporciones de hidrocarburos en la cual su composición de carbono varía. Esta información se describe en la siguiente tabla:

**Tabla 3: Fraccionamiento del crudo**

| <b>FRACCIÓN</b>   | <b>COMPOSICIÓN</b> | <b>USOS</b>     |
|-------------------|--------------------|-----------------|
| Gas natural       | C1 - C4            | Combustible     |
| Eter de petroleo  | C5 - C6            | Disolvente      |
| Ligoína           | C 7                | Disolvente      |
| Gasolina cruda    | C6 - C12           | Comb motores    |
| Querosene         | C11 - C16          | Com,motores,dom |
| Combustoleo       | C14 - C18          | Calef,calderas  |
| Aceite Lubricante | C 15 - C24         | Lubricantes     |
| Asfalto           | C 22               | Construcción    |

En la gran mayoría de países industrializados, el contaminante ambiental más común y presente en la mayoría de ellos son los productos del petróleo (combustibles y productos derivados) (Manisalidis et al. 2020).

Debido a la composición compleja de los diferentes tipos de derivados de petróleo, los suelos contaminados por hidrocarburos requieren una tecnología económica y eficaz para tratar el suelo contaminado con petróleo junto con un aumento de la conciencia pública y límites estrictos en los estándares de descarga de contaminantes relacionados. En lo que respecta a la tecnología de remediación actual, la protección ambiental y la economía de la tecnología de biorremediación la convierten en un método vital para la remediación de suelos contaminados con petróleo en el sitio (Sun et al. 2022).

La biorremediación es una tecnología innovadora de tratamiento ambiental, este se basa en la aplicación de cierto tipo de organismos con el objetivo de degradar cualquier tipo de desechos y contaminante permitiendo convertirlos en sustancias menos contaminantes o eliminar por completo su toxicidad, gracias al metabolismo de los organismos (Abad 2017). Los cambios en las propiedades físico-químicas ocasionados por los organismos son fundamentales, puesto que determinarán el comportamiento y toxicidad de los hidrocarburos (Pérez et al. 2020).

Las bacterias son el microorganismo más eficaz y prometedor en la degradación del petróleo crudo debido a su capacidad para atacar casi cualquier hidrocarburo hasta la parafina más pesada (residuos asfálticos) (Lee et al. 2015).

Las tecnologías para recuperar un suelo contaminado con petróleo dependen de la aplicación de degradación, las técnicas de biorremediación se clasifican en técnicas del tipo: ex situ o in situ. El tipo de contaminante, la profundidad a la que se encuentra, el grado de contaminación en el que se encuentre, el ambiente, la ubicación, los factores climatológicos y el costo son algunos de los criterios que se toman en cuenta al momento de elegir la técnica de biorremediación que podría ser usada (Frutos et al. 2010; Smith et al. 2015).

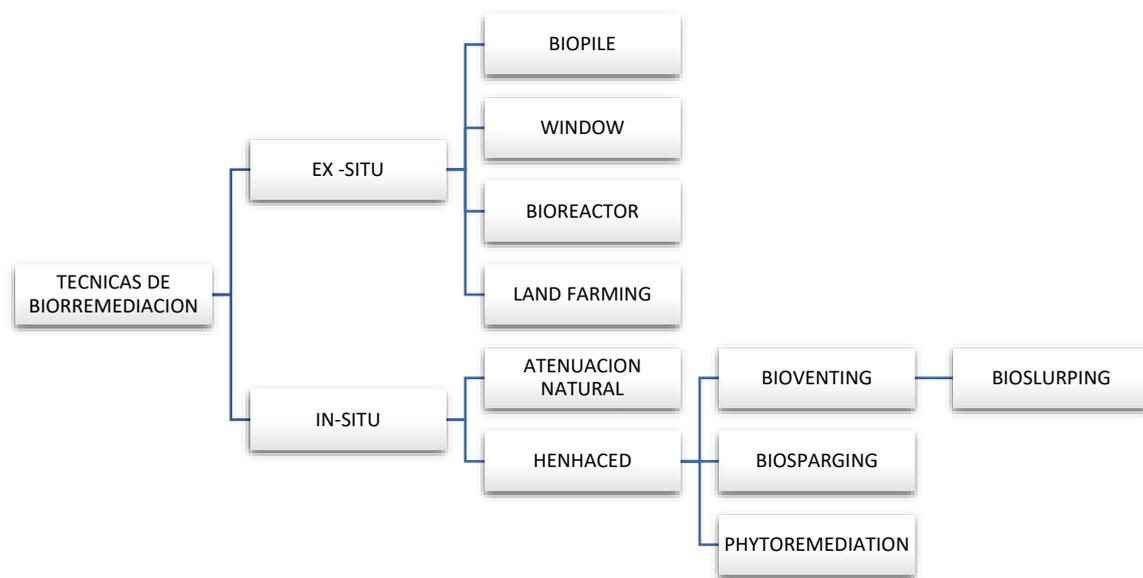


Figura 2: Clasificación de técnicas de biorremediación

Fuente: Azubuiké, Chikere y Okpokwasili (2016)

Este trabajo se basará en el estudio de la técnica exsitu mediante biopilas que consiste en la formación de pilas de material biodegradable las dimensiones de las pilas pueden variar, estas están compuestas por una parte de suelo que contenga el contaminante y por otra parte de materia orgánica, se deben generar condiciones favorables para el desarrollo continuo de los procesos de biodegradación de los contaminantes. Estas generalmente cuentan con un aislante (geomembranas) que se encuentra el fondo de la pila con la finalidad del control de lixiviados (Azubuiké, Chikere y Okpokwasili 2016).

La altura de las biopilas puede variar entre 2 a 4 metros y, y también pueden variar las condiciones ambientales a las que sean sometidas: humedad y temperatura a

las distintas profundidades (Delgadillo, Ronald y Hernandez 2016).

Estas pilas pueden ser aireadas de forma activa, mediante el volteo de la pila y también pueden ser aireadas de forma pasiva, a través de tubos perforados de aireación, con distribución continua de nutrientes, microorganismos y aire. En comparación con otras técnicas de biorremediación, el sistema de biopilas es más flexible y su eficiencia se puede mejorar con el suplemento de diferentes enmiendas. (p. ej., nutrientes, sustratos, biorreactivos, oxígeno) en base a las características del suelo y las propiedades específicas que presente el material contaminante (Liu et al. 2021).

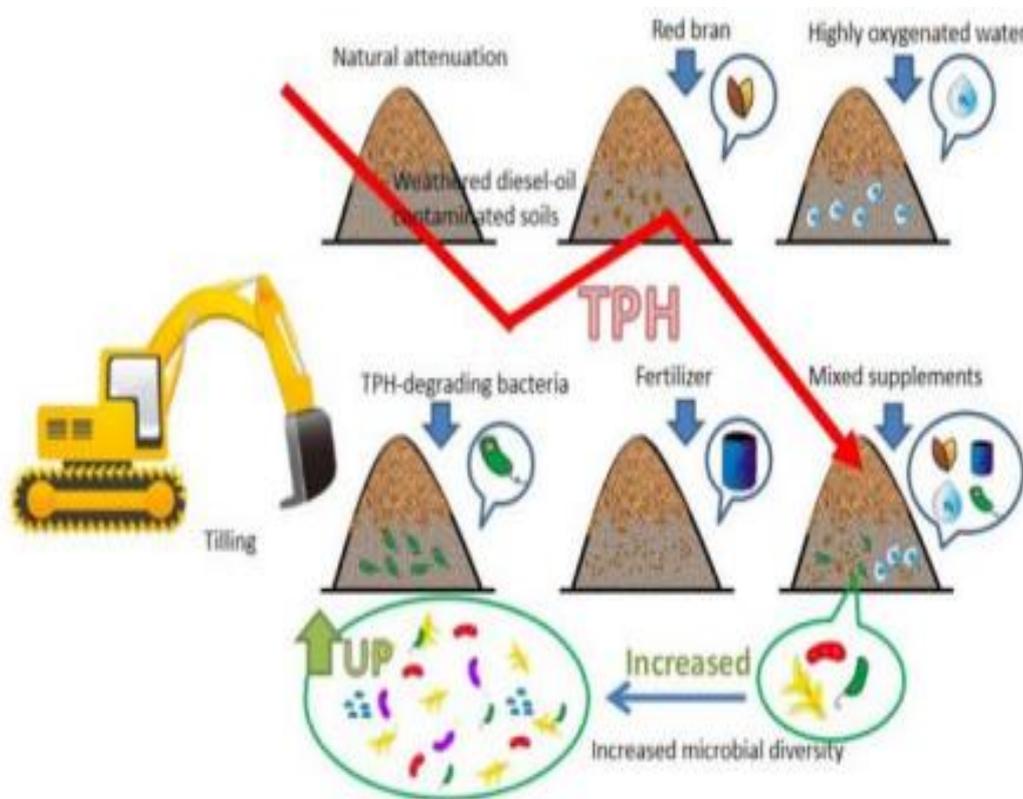


Figura 3: Funcionamiento de las biopilas

Fuente: Liu et al. (2021)

La bioestimulación y la bioaumentación son estrategias necesarias si la biorremediación mediante biopila no está dando los resultados esperados y estas estrategias podrían producir una mayor biodegradación de contaminantes.

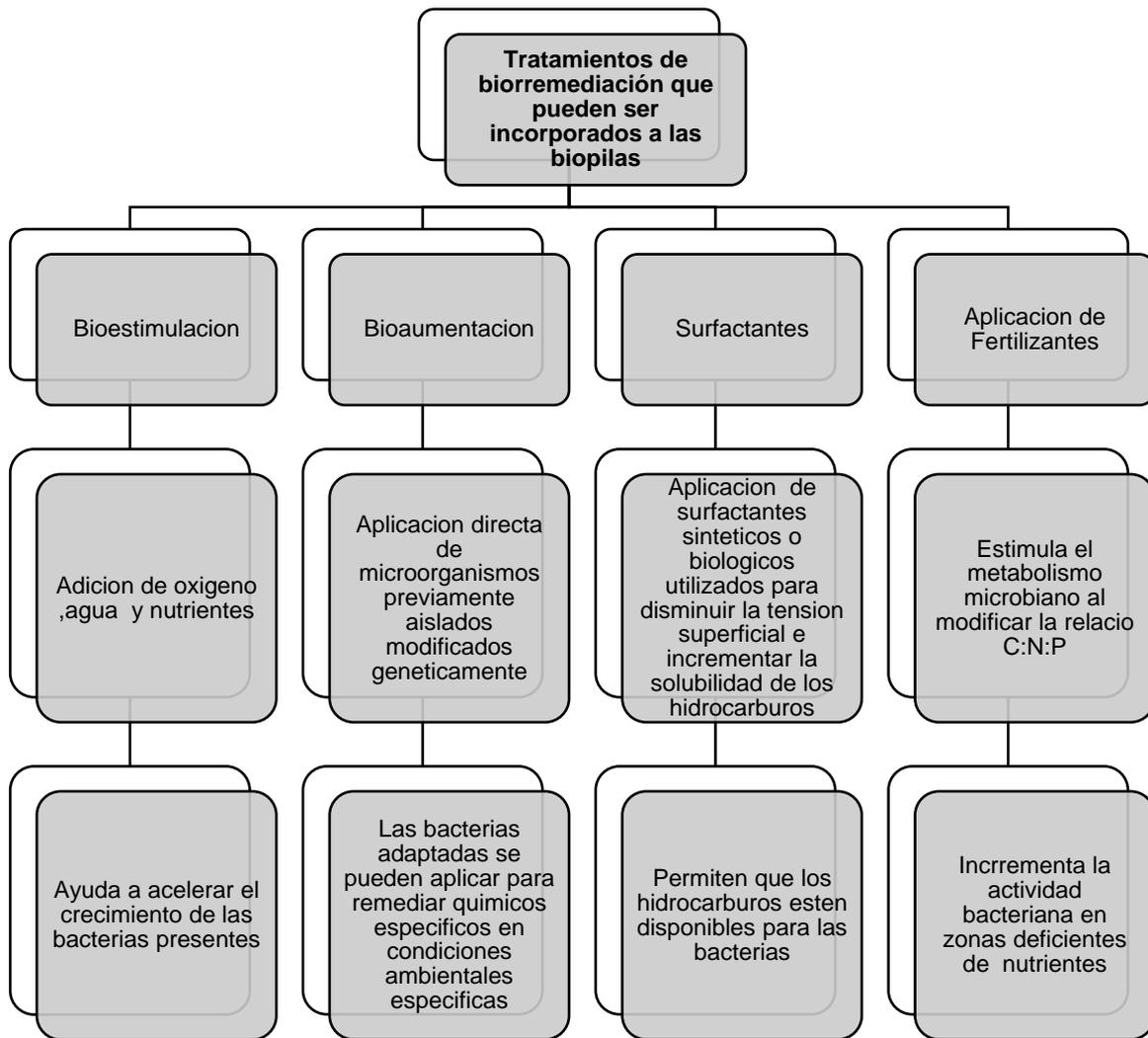


Figura 4: Tratamientos de biorremediación que pueden ser incorporados a las biopilas

La biorremediación acelera procesos de biodegradación que ocurren naturalmente en ecosistemas contaminados, donde las comunidades microbianas presentes suelen en su mayoría ser microorganismos adaptados, con la capacidad de utilizar los compuestos tóxicos del lugar contaminado. Algunas bacterias pueden usar los hidrocarburos como fuente de carbono para su crecimiento y en un menor porcentaje algunas bacterias tienen capacidad para degradar hidrocarburos gaseosos y parafínicos.

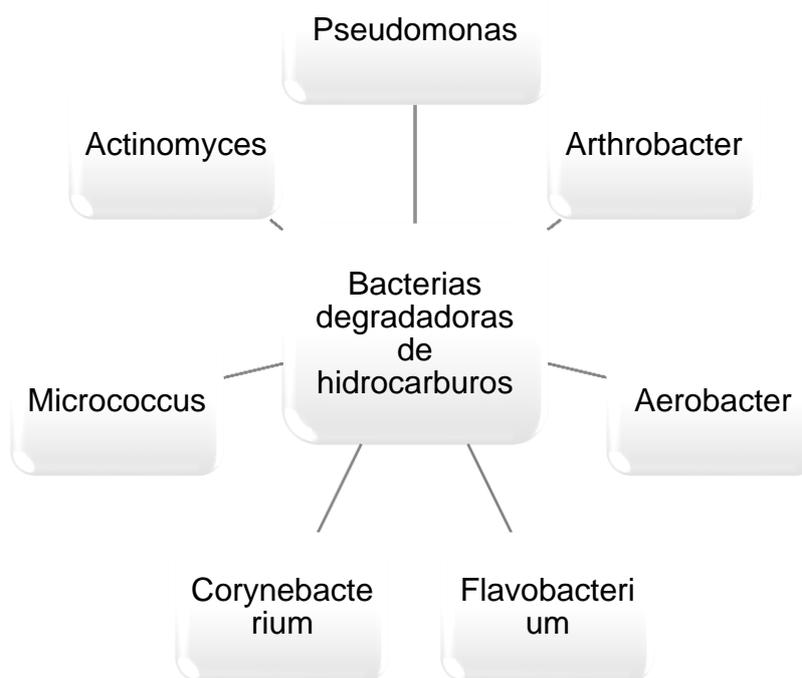


Figura 5: Bacterias degradadoras de hidrocarburos

Fuente: Kim et al. (2019); Liu et al. (2021); Zhang et al. (2021); Zheng et al. (2021)

### **III. METODOLOGÍA**

#### **3.1 Tipo y diseño de investigación**

Esta investigación es de tipo aplicada, pues utilizará la investigación de tipo básica (Nieto 2018). Es por esta razón que se realizará un análisis documental de los artículos científicos con el objetivo que el proyecto tenga la mejor información y pueda servir para investigaciones futuras.

La revisión sistemática puede definirse como un método para comparar los hallazgos de estudios en artículos y luego sintetizarlos (Snyder 2019).

El diseño de este trabajo es de tipo, no experimental, cualitativo y de revisión sistemática.

En esta investigación se llevará a cabo una revisión de los artículos científicos recopilados de las bases de datos, y se extraerá la información necesaria de acuerdo a los objetivos planteados.

#### **3.2 Categorías, Subcategorías y matriz de categorización**

En la siguiente matriz de categorización, se detallan: objetivos específicos, problemas específicos, y a su vez estos fueron manifestados mediante las categorías y subcategorías. Teniendo como objetivo la relación de los objetivos planteados con criterios de búsqueda para poder realizar una investigación precisa y de manera adecuada.

**Tabla 4: Matriz de Categorización Apriorística**

| <b>Objetivos específicos</b>   | <b>Problemas específicos</b>   | <b>Categoría</b>                             | <b>Subcategoría</b>   |
|--|--|--|---|
| Evaluar qué mecanismos de biorremediación han sido integrados al sistema de biopilas para mejorar su efectividad | ¿ Qué mecanismos de biorremediación han sido integrados al sistema de biopilas para mejorar su efectividad?  | Mecanismos integrados al sistema de biopilas | Adición de Agentes de carga, compost y nutrientes<br>Atenuación Natural<br>Adición de Consorcio Bacteriano<br>Aislado |
| Indicar los tipos de microorganismos que su efectividad fue mayor con la técnica de biopilas                     | ¿ Cuáles son los tipos de microorganismos que su efectividad fue mayor con la técnica de biopilas en Biorremediación de suelos contaminados por crudo de petróleo y derivados? | Microorganismos                              | Tipos de Bacterias<br>(Pseudomonas Rhodococcus, Alcaligenes, Acinetobacter, Achromobacter)                            |

### **3.3 Escenario de estudio**

El lugar o medio natural o escenario, en el cual ocurre el fenómeno objeto de estudio (Sánchez, Reyes y Mejía 2018).

En esta investigación, el escenario son diferentes ecosistemas con suelos contaminados detallado en los artículos científicos recopilados previamente en los antecedentes.

### **3.4 Participantes**

En esta investigación realizada mediante una revisión sistemática, se compila la información de tres bases de datos en específico: ScienceDirect, SpringerLink, Scielo y Alicia, de ellas se extrajeron artículos de revistas científicas de todo el mundo, comprendiendo el periodo de tiempo entre 2016 y 2022.

### **3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Como técnica de compilación, utilizaremos el análisis bibliográfico, este consiste en una forma de investigación técnica y es también un conjunto de operaciones intelectuales, destinadas a describir y representar documentos de manera sistemática y unificada con el objetivo de ayudar a su recuperación. Contiene un proceso de análisis-síntesis que incluye revisión bibliográfica, traducción, clasificación, redacción de revisiones, etc (Dulzaides Iglesias y Molina Gómez 2004).

Como en este caso la metodología de muchos autores en relación al tema escogido para el estudio, gracias a esto identificamos, seleccionamos y luego evaluamos aquellos que correspondan con el tema del proyecto elegido.

En este caso la información no ha podido ser obtenida directamente de los autores, sino se consiguió a través de plataformas digitales. De esta manera la información obtenida, será compartida.

### **3.6 Procedimiento**

El procedimiento que se utilizó para la selección de los artículos científicos se detalla en el siguiente gráfico:

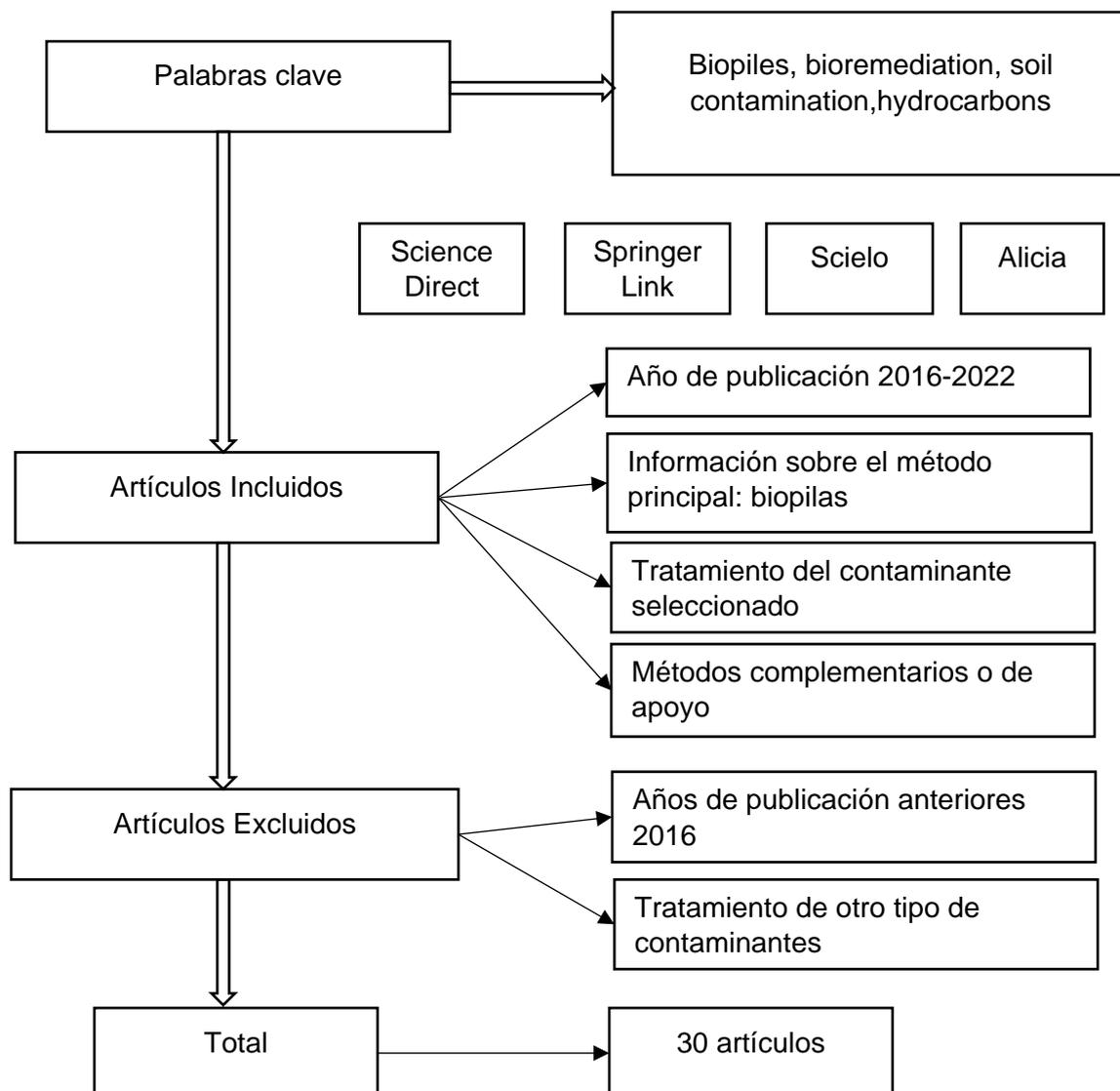


Figura 6: Procedimiento

### 3.7 Rigor científico

El rigor científico requiere de ver en retrospectiva los resultados y hallazgos encontrados para comprender el status, con que se ha desarrollado la investigación. Para cumplirlo se necesitan tener los 4 criterios: credibilidad o valor de verdad, transferibilidad o aplicabilidad, dependencia, confortabilidad (Suárez 2007).

De lo mencionado en el párrafo anterior los diferentes artículos de investigación analizados cumplen con las condiciones necesarias solicitadas por el rigor

científico, por lo que se deduce que esta investigación cumple con los criterios necesarios.

### 3.8 Método de análisis de datos

El análisis de datos se detalla en el siguiente gráfico:

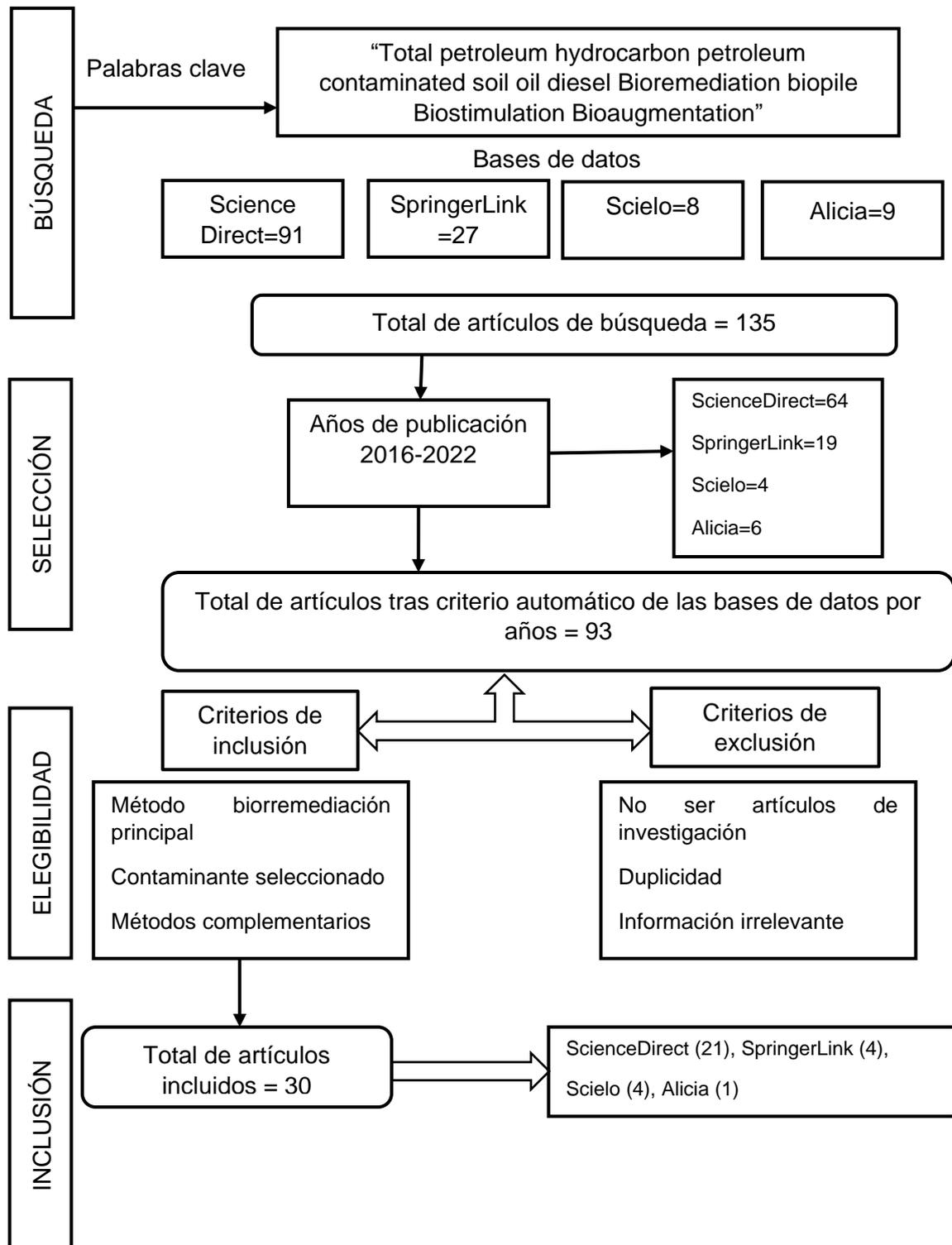


Figura 7: Análisis de datos

### **3.9 Aspectos éticos**

Para esta investigación es necesario mencionar que la ética y la honestidad son componentes importantes de este trabajo, ya que nos permitirá demostrar la veracidad de la información revisada, tal como lo establece la política anti plagio del artículo 15 del Código. de Ética de la Investigación Universidad César Vallejo, aceptado en Resolución de Consejo Universitario N° 0126-2017-UCV emitida el 23 de mayo de 2017.

Debido a que la información recopilada ha sido extraída a partir de diferentes investigaciones realizadas por expertos en temas relevantes para este trabajo, se analiza y explica citando y colocando referencias según ISO 690 -2 Esto es para respetar la autoría del trabajo de investigación que se está revisando.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La efectividad de la técnica de biopilas para el tratamiento de suelos contaminados con crudo de petróleo se muestra en la tabla 5 en donde el resultado final estará expresado en porcentaje de efectividad de eliminación. En la tabla 5 se consideran variables como espacio contaminado, contaminante, concentración inicial, tipo de hidrocarburo, aditivos y algunos parámetros experimentales (humedad, temperatura y tiempo).

Teniendo en cuenta la variedad de artículos científicos y los diferentes autores, algunos datos en específico de la tabla 5 se expresa las siglas ND (no determinó el autor).

**Tabla 5: Efectividad de la técnica de Biopilas**

| AUTOR           | ESPACIO CONTAMINADO |                                    | CONTAMINANTE      | CONCENTRACIÓN INICIAL TPH | TÉCNICAS                               | FACTORES ADITIVOS                           | PARÁMETROS EXPERIMENTALES |       |        | EFECTIVIDAD ELIMINACIÓN |      |
|-----------------|---------------------|------------------------------------|-------------------|---------------------------|--|---|---------------------------|-------|--------|-------------------------|------|
|                 | LUGAR               | TIPO                               |                   |                           |  |   | HUMEDAD                   | T     | TIEMPO |                         |      |
| Kim et al. 2019 | Kuwait              | Suelo franco-arenoso               | Petróleo          | 5.8% /34.153 mg Xkg       | Biolavado secuencia l-biopila procesos | Cultivo de Enriquecimiento o Hemoglobina    | < 1%                      | 30 °C | 4D     | 20% //8620 ± 318 mg Xkg | 86 % |
|                 |                     |                                    |                   |                           |  | Cultivo de Enriquecimiento o Hemoglobina    |                           | 30°C  | 4D     | 21% //6791 mg X kg      |      |
|                 |                     |                                    |                   |                           |  | Ninguno                                     |                           | 30°C  | 12D    | 45% // 4731 ± 97 mg Xkg |      |
| Liu et al. 2021 | Kaohsiung, Taiwán   | franco arenoso con porosidad entre | Gasóleo degradado | 3015 a 3785 mg/kg         | Biopila + aditivos                     | Salvado rojo RB                             | 25%                       | 25°C  | 42D    | 73%                     |      |
|                 |                     |                                    |                   |                           | Biopila + aditivos                     | Fertilizante instantáneo soluble en agua WF |                           | 25°C  |        | 68%                     |      |

| AUTOR             | ESPACIO CONTAMINADO |      | CONTAMINANTE | CONCENTRACIÓN INICIAL TPH | TÉCNICAS  | FACTORES ADITIVOS                                | PARÁMETROS EXPERIMENTALES |            |        | EFECTIVIDAD ELIMINACIÓN |
|-------------------|---------------------|------|--------------|---------------------------|---|--|---------------------------|------------|--------|-------------------------|
|                   | LUGAR               | TIPO |              |                           |   |  | HUMEDAD                   | T          | TIEMPO |                         |
|                   |                     |      |              |                           |   |  | 36 y 44%                  |            |        |                         |
|                   |                     |      |              |                           | Biopila + aditivos  | Mezcla con agua altamente oxigenada OW           |                           | 25°C       |        | 55%                     |
|                   |                     |      |              |                           | Biopila + aditivos  | Inoculación de bacterias degradadoras de TPH TDB |                           | 25°C       |        | 41%                     |
|                   |                     |      |              |                           | Biopila + aditivos  | Atenuación natural NA                            |                           | 25°C       |        | 27%                     |
|                   |                     |      |              |                           | Biopila + aditivos  | Adición de suplementos mixtos MIX                |                           | 25°C       |        | 79%                     |
| Zhang et al. 2021 | Jilin, China        | ND   | Petróleo     | 23200 ± 834 mg/kg         | Biopilas aeróbicas mesófilas  | Cascarilla de arroz                              | 18%                       | 20 - 40 °C | 80 D   | 72.99%                  |
| Zheng et al. 2021 | Qingyan g, China.   | ND   | Petróleo     | ND                        | Biopila mejorada con bioestimulación mas bioaumentación en un invernadero | Estiércol de vaca, microorganismos exógenos      | ND                        | 0-39 °C    | 30 D   | 50-80%                  |

| AUTOR                 | ESPACIO CONTAMINADO |   | CONTAMINANTE | CONCENTRACIÓN INICIAL TPH | TÉCNICAS | FACTORES ADITIVOS                      | PARÁMETROS EXPERIMENTALES |          |        | EFECTIVIDAD ELIMINACIÓN |
|-----------------------|---------------------|---|--------------|---------------------------|----------|--|---------------------------|----------|--------|-------------------------|
|                       | LUGAR               | TIPO  |              |                           |          |  | HUMEDAD                   | T        | TIEMPO |                         |
| Anza Cruz et al. 2016 | Chiapas, México     | Bajo contenido de arcilla y/o limo y alto contenido de nutrientes | Aceite       | ND                        | Biopilas | Bacterias                              | 50-90%                    | 25-30 °C | 90D    | 87.10%                  |
| Jiang et al. 2021     | China Dongying      | ND  | Petroleo     | ND                        | Biopilas | Agente de carga (paja de algodón)      | 10-20%                    | 45 °C    | 220D   | 36,82–49,18 %           |
|                       |                     |   |              |                           | Biopilas | Agente de carga (paja de algodón) Urea |                           |          |        | 20,07–23,43 %           |
|                       |                     |   |              |                           | Biopilas | Ninguno                                |                           |          |        | 17,57–27,08 %           |

| AUTOR                 | ESPACIO CONTAMINADO               |  | CONTAMINANTE                            | CONCENTRACIÓN INICIAL TPH                     | TÉCNICAS                                | FACTORES ADITIVOS      | PARÁMETROS EXPERIMENTALES |          |        | EFECTIVIDAD ELIMINACIÓN |       |
|-----------------------|-----------------------------------|--|---|---|---|------------------------|---------------------------|----------|--------|-------------------------|-------|
|                       | LUGAR                             | TIPO                                     |   |   |   |                        | HUMEDAD                   | T        | TIEMPO |                         |       |
| Perez et al., 2020    | Venezuela                         | arena-arcillo-limoso de baja plasticidad | Grasas y aceites<br>Petróleo            | 26230,4 mg/kg y<br>10626,8 mg/kg de GyA e HTP | Biopilas                                | Materia orgánica       | 20-35%                    | 23-27 °C | 365 D  | ND                      |       |
| Bisognin et al. 2018  | Porto Alegre , Río Grande del Sur | ND                                       | Gasolina, diésel y aceite gama orgánica | 9.833 mg.kg                                   | Biopilas                                | Consortios Microbianos | ND                        | 25-35 °C | 130 D  | 2.907,83 mg.kg          | 92 %, |
|                       |                                   |  |   |   | Biopilas                                | Consortios Microbianos |                           |          |        | 468.73 mg.kg-1          |       |
|                       |                                   |  |   |   | Biopila                                 | Consortios Microbianos |                           |          |        | 329,69 mg.kg            |       |
| Kim, Lee y Chang 2018 | Saskatoon, Canadá.                | Arcilloso de grano fino y grueso         | Petróleo                                | 2385 ± 477,3 mg/kg y<br>2811 ± 507,5 mg/kg,   | Biopila tratada+ congelación estacional | Fertilizante + Humato  | 15%                       | 1-28 °C  | 260 D  | 57%                     |       |
|                       |                                   |  |   |   | Biopila sin tratar                      | Nutrientes             |                           |          |        | 58%                     |       |
|                       |                                   |  |   |   | Biopila sin tratar                      | Nutrientes             |                           |          |        | 36%                     |       |

| AUTOR                 | ESPACIO CONTAMINADO                       |        | CONTAMINANTE       | CONCENTRACIÓN INICIAL TPH                   | TÉCNICAS        | FACTORES ADITIVOS   | PARÁMETROS EXPERIMENTALES |          |        | EFECTIVIDAD ELIMINACIÓN |
|-----------------------|---|--------|--------------------|---|-----------------|---|---------------------------|----------|--------|-------------------------|
|                       | LUGAR                                     | TIPO   |                    |   |                 |   | HUMEDAD                   | T        | TIEMPO |                         |
| Ma et al. 2016        | Liaohé en el norte de China               | ND     | Aceite             | 3,52 104 ± 2,38 103 mg/kg                   | Biopila directa | Ninguno   | 40-60%                    | 20-50 °C | 90 D   | 41%                     |
|                       |   |        |                    |   | Biopila         | Consortios Microbianos  |                           |          |        | 44%                     |
|                       |   |        |                    |   | Biopila         | Consortios Microbianos +Agentes de carga                          |                           |          |        | 55.70%                  |
|                       |   |        |                    |   | Biopila         | Consortios Microbianos +Agentes de carga + nutrientes inorgánicos |                           |          |        | 87.40%                  |
| Van Dorst et al. 2021 | Islas Windmill, en la Antártida oriental. | ND     | Combustible diésel | 5000 mg/kg APROXIMADO                       | Biopilas        | Adición de nutrientes y la homogeneización                        | ND                        | 2-18°C   | 1825D  | 50%                     |
| AlKaabi et al. 2020   | Qatar                                     | Arenas | Petróleo           | 280 mg/kg, aceite orgánico/ <1 mg/kg diésel | Biopilas        | Bioestimulación   | 58%                       | 34 °C    | 90 D   | 30-53%                  |
| Ccolque y Vargas 2017 | Peru                                      | ND     | Petróleo           | 25654 mg/Kg                                 | Biopila         | Sustrato tierra   | 29.4%                     | 21.4 °C  | 40 D   | 38.7%                   |
|                       |   |        |                    |   | Biopila         | Compost   | 30.6%                     | 21.2 °C  | 41 D   | 37.9%                   |

| AUTOR       | ESPACIO CONTAMINADO |               | CONTAMINANTE | CONCENTRACIÓN INICIAL TPH | TÉCNICAS | FACTORES ADITIVOS                                  | PARÁMETROS EXPERIMENTALES |          |        | EFECTIVIDAD ELIMINACIÓN |
|-------------|---------------------|---------------|--------------|---------------------------|----------|--|---------------------------|----------|--------|-------------------------|
|             | LUGAR               | TIPO          |              |                           |          |  | HUMEDAD                   | T        | TIEMPO |                         |
|             |                     |               |              |                           | Biopila  | Humus  | 28.7%                     | 21 °C    | 42 D   | 31%                     |
| Romero 2021 | México              | Franco limoso | Petróleo     | 36, 843.27 mg/kg          | Biopila  | Control  | 20-80 %                   | 20-40 °C | 90D    | 41.08%                  |
|             |                     |               |              |                           | Biopila  | Bioaumentación bacteriana                          |                           |          |        | 56.71%                  |
|             |                     |               |              |                           | Biopila  | Texturizante de plátano                            |                           |          |        | 51.8%                   |
|             |                     |               |              |                           | Biopila  | Bioaumentación bacteriana +texturizante de plátano |                           |          |        | 58.87%                  |

De acuerdo a lo presentado en la tabla 5, se encontró que la efectividad de la técnica de biorremediación por biopilas para tratar suelos contaminados con crudo de petróleo y derivados resultaron ser eficientes disminuyendo gran cantidad de porcentaje de TPH según los artículos científicos analizados.

Según Bisognin et al. (2018) y los resultados obtenidos en su trabajo prueban la efectividad del sistema de biopilas en la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos, ya que las concentraciones de compuestos HTP se redujeron significativamente al final del tratamiento, presentando, respectivamente, efectividad del 92% para los parámetros analizados. Además Ma et al. (2016) muestra que el bioapilamiento redujo significativamente la cantidad total de contaminantes detectados en los desechos de perforación. Para las pilas, la cantidad total de picos en el día 30 fue menor que la del día 0, lo que indica que el bioapilamiento redujo la cantidad total de contaminantes y también cambió significativamente la composición química de los contaminantes en los desechos de perforación.

Así mismo en el artículo de análisis de la comunidad microbiana de biopilas en la Antártida por van Dorst et al. (2021) concluye que los innovadores sistemas de biopilas ex situ, tolerantes a las condiciones extremas de la Antártida, estimularon con éxito la población microbiana y la enriquecieron para una comunidad microbiana simplificada capaz de degradar los hidrocarburos de manera eficiente.

Cabe resaltar que parte del logro de la efectividad de la técnica de biopila para la biorremediación de suelos es gran parte a la adición de diferentes enmiendas y aditivos como fuente de nutrientes, agentes de carga, surfactantes, sustratos, biorreactivos, oxígeno entre otros. De acuerdo a los aportes de Kim et al. (2019) el uso de hemoglobina como fuente de nutrientes pareció tener una fuerza selectiva sobre las especies pertenecientes al filo bacteroidetes en el suelo contaminado con petróleo crudo de Kuwait y resultó en el cambio de la comunidad bacteriana autóctona. Este cultivo de enriquecimiento se usó en el paso de biolavado y el 75% de TPH (es decir, la suma de UCM, n-alcanos e hidrocarburos aromáticos) y se eliminó después del paso de biolavado. Y que durante el paso de biopila de 4 días, se eliminó el 21 % del TPH residual y se eliminó más TPH durante el paso adicional de biopila de 12 días, alcanzando la concentración final de TPH de 4731 mg kg<sup>-1</sup>.

Por otro lado un estudio realizado Liu et al. (2021) muestra que el sistema de biopila con suplementos mixtos hubo la mayor efectividad de eliminación de TPH (79 % de eliminación de TPH), seguido del grupo RB con aproximadamente 73 % de eliminación de TPH durante el período operativo de 42 días. Los sustratos de carbono y los nutrientes en las enmiendas MIX y RB podrían activar de manera efectiva la función intrínseca actividades microbianas, y esto fue beneficioso para la remediación del suelo.

En el caso de Anza et al. (2016) que realizó la biorremediación de suelos contaminados con aceites usados del servicio automotor mediante la técnica de biopilas adicionando bacterias e identificando cepas bacterianas nativas ,logro porcentajes de remoción considerables de las fracciones, en la remoción alifática se logró 93.7 a 87.1% y la fracción hidrocarbonada aromática, remociones de 0 a 94.8 en 90 días de tratamiento.

En la investigación de Jiang et al. (2021) en el que se exploró los efectos del agente de carga y los nutrientes en las características de los poros, la efectividad de la remediación por biopilas y la biotoxicidad del suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo. Usando como método la construcción de tres biopilas a escala piloto para tratar suelos envejecidos contaminados con petróleo, además, se aplicó Micro-CT para obtener las características de los poros de las pilas, se tuvo como resultados que los agentes de carga promovieron la circulación de gas al mejorar la estructura de poros de la biopila. Y la actividad metabólica de los microorganismos aumentó como resultado de la promoción del hábitat microbiano, así se logró la mayor biodegradación de los hidrocarburos de petróleo.

Con lo que respecta a la adición de agentes de carga para para aumentar la efectividad de la técnica de biopila Ma et al. (2016) en su investigación muestra que estos pueden mejorar significativamente el rendimiento de la biopila, mientras que la adición de inóculos microbianos tuvo impactos positivos mínimos en la eliminación de contaminantes. La efectividad de remoción de TPH de la pila de consorcio microbiano y agentes de carga (55.7%) fue mayor el de la pila con adición de solo agentes microbianos (44,0%) como se muestra en la tabla 5.

Durante el tratamiento a través del sistema de biopilas se integran ciertos mecanismos que ayudan y mejoran la efectividad del tratamiento, descritos en la figura 6.

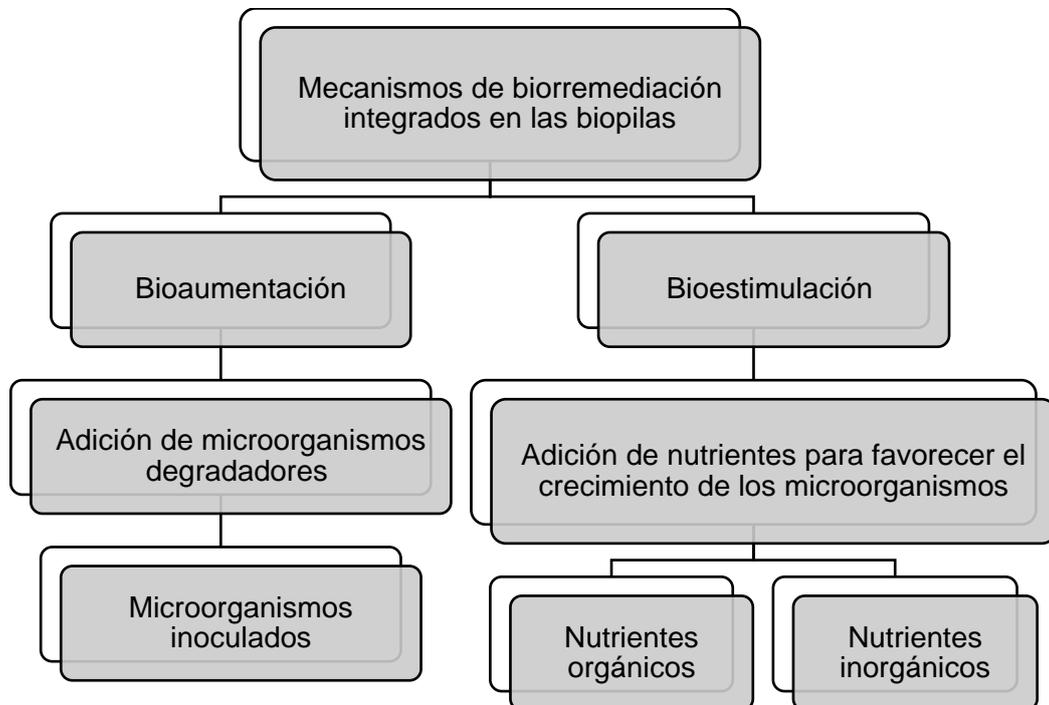


Figura 8: Mecanismos de biorremediación en la biopila

Una gran cantidad de autores cuya información ha sido recopilada en esta revisión tienen como punto de vista en común que la combinación de ambos mecanismos de biorremediación (bioaumentación y bioestimulación) descritos en la figura 6, mejora significativamente la efectividad del sistema de biopilas, recomendando el uso y combinación de ambos mecanismos. Entre la visión compartida de estos autores y su investigación tenemos: Kim et al. (2019) utilizando microorganismos autóctonos y un cultivo de enriquecimiento mejorado con hemoglobina, Liu et al. (2019) para sus seis sistemas de biopilas que utilizaron tanto microorganismos aislados y nutrientes orgánicos (salvado rojo, fertilizante) teniendo una efectividad de 79% el sistema que utilizó una combinación mixta, Zheng et al. (2021) utilizando estiércol de vaca y microorganismos exógenos y (Ma et al. 2016) utilizando consorcios microbianos, agentes de carga y nutrientes inorgánicos.

Entre los autores que solo utilizaron bioestimulación (nutrientes) durante su investigación tenemos: Zhang et al. (2021) utilizando cascarilla de arroz como nutriente, (Jiang et al. 2021) utilizando paja de algodón y urea como nutrientes, Kim,

Lee y Chang (2018) utilizando enmiendas de humato y nutrientes a base de nitrógeno, fosforo y potasio.

Y finalmente entre los autores que solo utilizaron bioaumentación (adición de microorganismos) durante su investigación tenemos a Anza et al. (2016); Bisognin et al. (2018).

Todos los tipos de microorganismos que fueron utilizados por diferentes investigadores y que contribuyeron a mejorar la efectividad de la técnica de biopilas para el tratamiento de suelos contaminados con crudo de petróleo se detallan en la tabla 6.

**Tabla 6: Microorganismos usados en las biopilas**

| <b>AUTOR</b>          | <b>MICROORGANISMOS USADOS EN LAS BIOPILAS PARA MEJORAR SU EFECTIVIDAD</b> |
|-----------------------|---|
| Kim et al. 2019       | Brevundimonas<br>Pseudomonas<br>Stenotrophomonas                          |
| Liu et al. 2021       | Pseudomonas<br>Sphingomonas   |
| Zhang et al. 2021     | Bacillus sp.<br>Bacillus subtilis   |
| Zheng et al. 2021     | Pseudomona putida MHF 7109  |
| Anza et al. 2016      | Pseudomonas   |
| Bisognin et al. 2018  | Bacillus spp.   |
| Kim, Lee y Chang 2018 | Luteimonas<br>Pseudomonas<br>Sphingomonas                                 |
| Van Dorst et al. 2021 | Dietzia<br>Rhodococcus  |
| AlKaabi et al. 2020   | Bacillus<br>Pseudomonas   |
| Ccolque y Vargas 2017 | Bacillus spp.   |

| AUTOR       | MICROORGANISMOS USADOS EN LAS BIOPILAS PARA MEJORAR SU EFECTIVIDAD                 |
|-------------|--|
|             | Citrobacter spp<br>Enterobacter spp<br>Pseudomona spp.<br>Proteus spp.             |
| Romero 2021 | Bacillus cibi<br>Bacillus megaterium<br>Pseudomonas aeruginosa<br>Stenotrophomonas |

Según las diferentes investigaciones recopiladas los microorganismos utilizados pueden ser de diferentes tipos y varían debido a características únicas que presenta cada uno de los estudios realizados, entre esas características tenemos: el tipo de suelo, el tipo de contaminante, la temperatura y la humedad del suelo, estas características pueden generar que los microorganismos degraden con mayor o menor efectividad los contaminantes, aumentando o reduciendo la efectividad del sistema de biopilas.

Estudios realizados por Zheng et al. (2021); Kim, Lee y Chang (2018); van Dorst et al. (2021) y AlKaabi et al. (2020) tienen por resultado puntos de vista similares acerca del uso de microorganismos endógenos a la zona donde se produjo la liberación del contaminante y descritos en la tabla 6 es lo recomendado para el tratamiento y uso en los sistemas de biopilas pues estos microorganismos están adecuados a las condiciones climáticas del lugar y pueden mejorar la efectividad de la biopila, a pesar que los experimentos se hicieron en ambientes climatológicos completamente opuestos, los tres primeros autores realizaron sus experimentos en ambientes cuya temperatura era baja (incluso sometiendo a la biopila a etapas de congelación estacional) y el último autor realizó su experimento en temperaturas elevadas típicas en Qatar, demostrando la importancia de los microorganismos endógenos.

De entre los diferentes tipos de microorganismos usados se destacan como las más empleadas por los investigadores y sus estudios las Pseudomonas y sus cepas.

Los estudios realizados por Kim et al. (2019) y Anza et al. (2016) demuestran la capacidad de las *Pseudomonas* para producir biosurfactantes que mejoran las capacidades de las biopila. El estudio de Liu et al. (2021) señala que las *Pseudomonas* contribuyeron a la eliminación de componentes ligeros de hidrocarburos de petróleo (compuestos con bajo contenido de carbono) (C10–16). Mientras que Anza et al. (2016) demuestra que las *Pseudomonas* tienen también capacidad para degradar hidrocarburos aromáticos (benceno, tolueno, etilbenceno, xileno, naftaleno). Y el estudio de Romero 2021 demuestra que el uso de un compuesto bacteriano formado *Bacillus cibi*, *Bacillus megaterium*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Stenotrophomonas* son capaces de degradar el petróleo crudo, incluso en presencia de salinidad.

Con respecto a los demás autores que usaron otro tipo de microorganismos diferentes a las *Pseudomonas* tenemos que Liu et al. (2019) y su el uso de *Sphingomonas* lograron resultados en la eliminación de los componentes pesados de hidrocarburos de petróleo (compuestos con alto contenido de carbono) (C24–30). Respecto a la investigación realizada por Zhang et al. (2021) los resultados muestran una gran capacidad de adaptación del *Bacillus subtilis* y *Bacillus sp* a un ambiente bajo en carbono. En el estudio realizado por Bisognin et al. (2018) se utilizaron muchas cepas de *Bacillus*, demostrando su gran capacidad en la degradación del gasóleo, logrando una reducción de aproximadamente 87,5% en la concentración de HTP en 10 días.

## V. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos se puede concluir que:

- ❖ La efectividad de la técnica de biorremediación por biopilas en suelos contaminados por crudo de petróleo y derivados ha sido corroborado por los investigadores teniendo como resultado un 80% de efectividad de eliminación de TPH en la mayor parte de los de casos y en una parte menor de investigaciones presentando una efectividad de eliminación mayor al 50%, esta variación se debe a condiciones únicas y que se presentan en cada investigación de tratamiento de suelos contaminados por crudo de petróleo y derivados mediante el sistema de biopilas.
- ❖ Los mecanismos de biorremediación que han sido integrados al sistema de biopilas para mejorar su efectividad fueron la bioaumentación y la bioestimulación, siendo usados por separado o combinando ambos métodos por los diferentes investigadores, con el objetivo de mejorar la efectividad del sistema.
- ❖ Los microorganismos que ayudaron a mejorar la efectividad de la técnica de biopilas, en las diversas investigaciones son muy diversos, debido a las condiciones únicas de cada investigación, sin embargo, destaca el tipo de *Pseudomonas*, como la única especie en común entre los diferentes autores e investigaciones y cuya efectividad para degradar hidrocarburos ha sido comprobada.

## **VI. RECOMENDACIONES**

Con los estudios realizados acerca de la efectividad del sistema de biopilas para el tratamiento de suelos contaminados con crudo de petróleo y derivados se puede recomendar lo siguiente:

- ❖ Se recomienda para el tratamiento mediante biopilas tener en cuenta factores de: humedad, temperatura, tipo de suelo, tipo y concentración de contaminante, ya que estos pueden alterar el funcionamiento y efectividad del sistema de biopilas.
- ❖ Se recomienda utilizar un enfoque mixto entre los mecanismos de bioaumentación (adición de microorganismos degradadores) y bioestimulación (adición de nutrientes), debido a que esto mejorara las condiciones del sistema de biopilas incrementado su efectividad y mejorando el tratamiento.
- ❖ Se recomienda el uso de microorganismos endógenos como medio de estimulación para el sistema de biopilas, pues estos organismos están mejor adaptados a las condiciones únicas que se presenten en el lugar donde se llevara a cabo el tratamiento.

## REFERENCIAS

1. ABDEL-SHAFY, H.I. y MANSOUR, M.S.M., 2016. A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egyptian Journal of Petroleum* [en línea], vol. 25, no. 1, pp. 107-123. ISSN 20902468. DOI 10.1016/j.ejpe.2015.03.011. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.03.011>.
2. AGNELLO, A.C., BAGARD, M., VAN HULLEBUSCH, E.D., ESPOSITO, G. y HUGUENOT, D., 2016. Comparative bioremediation of heavy metals and petroleum hydrocarbons co-contaminated soil by natural attenuation, phytoremediation. *Science of the Total Environment* [en línea], vol. 563-564, pp. 693-703. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2015.10.061. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.061>.
3. AJONA, M. y VASANTHI, P., 2021. Bio-remediation of crude oil contaminated soil using recombinant native microbial strain. *Environmental Technology and Innovation* [en línea], vol. 23, pp. 101635. ISSN 23521864. DOI 10.1016/j.eti.2021.101635. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101635>.
4. ALKAABI, N., AL-GHOUTI, M.A., JAOUA, S. y ZOUARI, N., 2020. Potential for native hydrocarbon-degrading bacteria to remediate highly weathered oil-polluted soils in Qatar through self-purification and bioaugmentation in biopiles. *Biotechnology Reports* [en línea], vol. 28, pp. e00543. ISSN 2215017X. DOI 10.1016/j.btre.2020.e00543. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00543>.
5. ALVAREZ, P.J.J. y VOGEL, T.M., 1991. Substrate interactions of benzene, toluene, and para-xylene during microbial degradation by pure cultures and mixed culture aquifer slurries. *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 57, no. 10, pp. 2981-2985. ISSN 00992240. DOI 10.1128/aem.57.10.2981-2985.1991.
6. ANZA CRUZ, H.G., ORANTES CALLEJA, P.D. y GONZÁLEZ HERRERA, R., 2016. Biorremediación de suelos contaminados con aceite automotriz usados mediante sistema de biopilas. vol. 5, no. 12, pp. 49-77. DOI 10.31644/imasd.12.2016.a04.

7. AZUBUIKE, C.C., CHIKERE, C.B. y OKPOKWASILI, G.C., 2016. Bioremediation techniques—classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, vol. 32, no. 11, pp. 1-18. ISSN 15730972. DOI 10.1007/s11274-016-2137-x.
8. BALCIOĞLU, E.B., 2016. Potential effects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in marine foods on human health: a critical review. *Toxin Reviews*, vol. 35, no. 3-4, pp. 98-105. ISSN 15569551. DOI 10.1080/15569543.2016.1201513.
9. BISOGNIN, R., LÓPEZ, D., LÓPEZ, D.A.R., MULLER, M.V.G. y RIEGER, A., 2018. A, 2018. Analysis of microbial potential of a biopile in soil bioremediation contaminated by petroleum hydrocarbons. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, vol. 23, no. 3, pp. 517-526. ISSN 14134152. DOI 10.1590/s1413-41522018152421.
10. BORJI, H., AYOUB, G.M., AL-HINDI, M., MALAEB, L. y HAMDAN, H.Z., 2020. Nanotechnology to remove polychlorinated biphenyls and polycyclic aromatic hydrocarbons from water: a review. *Environmental Chemistry Letters* [en línea], vol. 18, no. 3, pp. 729-746. ISSN 16103661. DOI 10.1007/s10311-020-00979-x. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00979-x>.
11. CAI, P., CAI, P., CAI, P., NING, Z., NING, Z., LIU, Y., HE, Z., HE, Z., SHI, J. y NIU, M., 2020. Diagnosing bioremediation of crude oil-contaminated soil and related geochemical processes at the field scale through microbial community and functional genes. *Annals of Microbiology*, vol. 70, no. 1. ISSN 18692044. DOI 10.1186/s13213-020-01580-x.
12. COLQUE, Y.M. y VARGAS, A.F., 2017. Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos totales de petróleo (HTP's) mediante el método de biopilas con dos tipos de sustrato (tierra y abonos orgánicos). , pp. 203.
13. DELGADILLO, J., RONALD, R. y HERNANDEZ, H., 2016. Composting in Bio-Piles for the Clean-Up of Soils. *Agroproductividad*, vol. 9, no. 8, pp. 45-51. ISSN 0188-7394.
14. DIAS, R.L., RUBERTO, L., CALABRÓ, A., BALBO, A. Lo, DEL PANNO, M.T. y MAC CORMACK, W.P., 2015. Hydrocarbon removal and bacterial

- community structure in on-site biostimulated biopile systems designed for bioremediation of diesel-contaminated Antarctic soil. *Polar Biology*, vol. 38DIAS, R., no. 5, pp. 677-687. ISSN 07224060. DOI 10.1007/s00300-014-1630-7.
15. DULZAIDES IGLESIAS, M.E. y MOLINA GÓMEZ, A.M., 2004. Análisis documental y de información: Dos componentes de un mismo proceso. *Acimed*, vol. 12, no. 2. ISSN 10249435.
  16. EL-LIETHY, M.A., EL-NOUBI, M.M., ABIA, A.L.K., EL-MALKY, M.G., HASHEM, A.I. y EL-TAWHEEL, G.E., 2022. Eco-friendly bioremediation approach for crude oil-polluted soils using a novel and biostimulated *Enterobacter hormaechei* ODB H32 strain. *International Journal of Environmental Science and Technology* [en línea], ISSN 17352630. DOI 10.1007/s13762-021-03885-z. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03885-z>.
  17. FENG, L., JIANG, X., HUANG, Y., WEN, D., FU, T. y FU, R., 2021. Petroleum hydrocarbon-contaminated soil bioremediation assisted by isolated bacterial consortium and sophorolipid. *Environmental Pollution* [en línea], vol. 273, pp. 116476. ISSN 18736424. DOI 10.1016/j.envpol.2021.116476. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116476>.
  18. FRUTOS, F.J.G., ESCOLANO, O., GARCÍA, S., BABÍN, M. y FERNÁNDEZ, M.D., 2010. Bioventing remediation and ecotoxicity evaluation of phenanthrene-contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 183, no. 1-3, pp. 806-813. ISSN 03043894. DOI 10.1016/j.jhazmat.2010.07.098.
  19. GOMEZ, F. y SARTAJ, M., 2014. Optimization of field scale biopiles for bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil at low temperature conditions by response surface methodology (RSM). *International Biodeterioration and Biodegradation* [en línea], vol. 89, pp. 103-109. ISSN 09648305. DOI 10.1016/j.ibiod.2014.01.010. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.01.010>.
  20. GUARINO, C., SPADA, V. y SCIARRILLO, R., 2017. Assessment of three approaches of bioremediation (Natural Attenuation, Landfarming and Bioaugmentation – Assisted Landfarming) for a petroleum hydrocarbons contaminated soil. *Chemosphere* [en línea], vol. 170, pp. 10-16. ISSN 18791298. DOI 10.1016/j.chemosphere.2016.11.165. Disponible en:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.165>.

21. HOANG, S.A., LAMB, D., SESHADRI, B., SARKAR, B., CHOPPALA, G., KIRKHAM, M.B. y BOLAN, N.S., 2021. Rhizoremediation as a green technology for the remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials* [en línea], vol. 401, no. June 2020, pp. 123282. ISSN 18733336. DOI 10.1016/j.jhazmat.2020.123282. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123282>.
22. HOLLIGER, C., GASPARD, S., GLOD, G., HEIJMAN, C., SCHUMACHER, W., SCHWARZENBACH, R.P. y VAZQUEZ, F., 1997. Contaminated environments in the subsurface and bioremediation: Organic contaminants. *FEMS Microbiology Reviews*, vol. 20, no. 3-4, pp. 517-523. ISSN 01686445. DOI 10.1016/S0168-6445(97)00030-2.
23. HOSSAIN, M.F., AKTER, M.A., SOHAN, M.S.R., SULTANA, D.N., REZA, M.A. y HOQUE, K.M.F., 2022. Bioremediation potential of hydrocarbon degrading bacteria: isolation, characterization, and assessment. *Saudi Journal of Biological Sciences* [en línea], vol. 29, no. 1, pp. 211-216. ISSN 1319562X. DOI 10.1016/j.sjbs.2021.08.069. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.08.069>.
24. HUANG, Y., PAN, H., WANG, Q., GE, Y., LIU, W. y CHRISTIE, P., 2019. Enrichment of the soil microbial community in the bioremediation of a petroleum-contaminated soil amended with rice straw or sawdust. *Chemosphere* [en línea], vol. 224, pp. 265-271. ISSN 18791298. DOI 10.1016/j.chemosphere.2019.02.148. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.148>.
25. JIANG, J., WANG, S., WANG, L., LV, Q., YANG, Y., CHEN, K., LIU, L. y WANG, X., 2021. The improvement of pore characteristics, remediation efficiency, and biotoxicity of petroleum-contaminated soil with the addition of bulking agent on field-scale biopile treatment. *Journal of Soils and Sediments*, vol. 21, no. 8, pp. 2855-2864. ISSN 16147480. DOI 10.1007/s11368-021-02992-1.
26. KIM, J., LEE, A.H. y CHANG, W., 2018. Enhanced bioremediation of nutrient-amended, petroleum hydrocarbon-contaminated soils over a cold-climate winter: The rate and extent of hydrocarbon biodegradation and microbial

- response in a pilot-scale biopile subjected to natural seasonal freeze-thaw t. *Science of the Total Environment* [en línea], vol. 612, pp. 903-913. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.08.227. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.227>.
27. KIM, T., HONG, J.K., JHO, E.H., KANG, G., YANG, D.J. y LEE, S.J., 2019. Sequential biowashing-biopile processes for remediation of crude oil contaminated soil in Kuwait. *Journal of Hazardous Materials* [en línea], vol. 378, no. May, pp. 120710. ISSN 18733336. DOI 10.1016/j.jhazmat.2019.05.103. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.05.103>.
28. LEE, H., YUN, S.Y., JANG, S., KIM, G.H. y KIM, J.J., 2015. Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons in creosote-contaminated soil by *Peniophora incarnata* KUC8836. *Bioremediation Journal*, vol. 19, no. 1, pp. 1-8. ISSN 15476529. DOI 10.1080/10889868.2014.939136.
29. LIU, P.F., YANG, Z.H., CHEN, Y.L., LO, K.H. y KAO, C.M., 2021. Remediation of weathered diesel-oil contaminated soils using biopile systems: An amendment selection and pilot-scale study. *Science of the Total Environment* [en línea], vol. 786, pp. 147395. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2021.147395. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147395>.
30. LIU, X., SELONEN, V., STEFFEN, K., SURAKKA, M., RANTALAINEN, A.L., ROMANTSCHUK, M. y SINKKONEN, A., 2019. Meat and bone meal as a novel biostimulation agent in hydrocarbon contaminated soils. *Chemosphere* [en línea], vol. 225, pp. 574-578. ISSN 18791298. DOI 10.1016/j.chemosphere.2019.03.053. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.053>.
31. MA, J., YANG, Y., DAI, X., CHEN, Y., DENG, H., ZHOU, H., GUO, S. y YAN, G., 2016. Effects of adding bulking agent, inorganic nutrient and microbial inocula on biopile treatment for oil-field drilling waste. *Chemosphere* [en línea], vol. 150, pp. 17-23. ISSN 18791298. DOI 10.1016/j.chemosphere.2016.01.123. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.01.123>.
32. MANISALIDIS, I., STAVROPOULOU, E., STAVROPOULOS, A. y

- BEZIRTZOGLU, E., 2020. Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Frontiers in Public Health*, vol. 8, no. February, pp. 1-13. ISSN 22962565. DOI 10.3389/fpubh.2020.00014.
33. NAEEM, U. y QAZI, M.A., 2020. Leading edges in bioremediation technologies for removal of petroleum hydrocarbons. *Environmental Science and Pollution Research* NAEEM, U. y QAZI, M.A., 2020. Leading edges in bioremediation technologies for removal of petroleum hydrocarbons. *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, no. 22, pp. 27370-27382. ISSN 16147499. DOI 10.1007/s11356-019-06124-8.
34. NIETO, N.T.E., 2018. Tipos de investigación: Metodología de la Investigación. *Repositorio Institucional USDG* [en línea], pp. 1-4. Disponible en: <http://repositorio.usdg.edu.pe/handle/USDG/34>.
35. OSSAI, I.C., AHMED, A., HASSAN, A. y HAMID, F.S., 2020. Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review. *Environmental Technology and Innovation* [en línea], vol. 17, pp. 100526. ISSN 23521864. DOI 10.1016/j.eti.2019.100526. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100526>.
36. PÉREZ, E.C., OMAR, O.M.V.R., RODRÍGUEZ, C. y JAVIE, G.B.D., 2020. Biopilas a Escala Semi-Piloto. , pp. 3BY, B., AT, B. y BENÍTEZ, O.G., 2020. Biopilas a.
37. POPOOLA, L.T., BABAGANA, G. y SUSU, A.A., 2013. A Review of an Expert System Design for Crude Oil Distillation Column Using the Neural Networks Model and Process Optimization and Control Using Genetic Algorithm Framework. *Advances in Chemical Engineering and Science*, vol. 03, no. 02, pp. 164-170. ISSN 2160-0392. DOI 10.4236/aces.2013.32020.
38. POPOOLA, L.T. y YUSUFF, A.S., 2021. Optimization and characterization of crude oil contaminated soil bioremediation using bacteria isolates: Plant growth effect. *South African Journal of Chemical Engineering* [en línea], vol. 37, no. October 2020, pp. 206-213. ISSN 10269185. DOI 10.1016/j.sajce.2021.06.004. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2021.06.004>.
39. SAEED, M., ILYAS, N., ARSHAD, M., SHEERAZ, M., AHMED, I. y

- BHATTACHARYA, A., 2021. Development of a plant microbiome bioremediation system for crude oil contamination. *Journal of Environmental Chemical Engineering* [en línea], vol. 9, no. 4, pp. 105401. ISSN 22133437. DOI 10.1016/j.jece.2021.105401. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105401>.
40. SÁNCHEZ, H., REYES, C. y MEJÍA, K., 2018. *Manual de términos en investigación científica, tecnológica y humanística* [en línea]. S.l.: s.n. ISBN 9786124735141. Disponible en: <http://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/1480>.
41. SMITH, E., THAVAMANI, P., RAMADASS, K., NAIDU, R., SRIVASTAVA, P. y MEGHARAJ, M., 2015. Remediation trials for hydrocarbon-contaminated soils in arid environments: Evaluation of bioslurry and biopiling techniques. *International Biodeterioration and Biodegradation* [en línea], vol. 101, pp. 56-65. ISSN 09648305. DOI 10.1016/j.ibiod.2015.03.029. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.03.029>.
42. SNYDER, H., 2019. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research* [en línea], vol. 104, no. August, pp. 333-339. ISSN 01482963. DOI 10.1016/j.jbusres.2019.07.039. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>.
43. SUÁREZ, M., 2007. El Carácter científico de la investigación. *Universidad Rovira i Virgili* [en línea], pp. 645-654. Disponible en: <https://tdx.cat/bitstream/handle/10803/8922/10CapituloXEIcaracterCientificoDelainvestigaciontfc.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.
44. SUN, S., SU, Y., CHEN, S., CUI, W., ZHAO, C. y LIU, Q., 2022. Bioremediation of oil-contaminated soil: Exploring the potential of endogenous hydrocarbon degrader *Enterobacter* sp. SAVR S-1. *Applied Soil Ecology* [en línea], vol. 173, no. 66, pp. 104387. ISSN 09291393. DOI 10.1016/j.apsoil.2022.104387. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104387>.
45. VAN DORST, J., WILKINS, D., CRANE, S., MONTGOMERY, K., ZHANG, E., SPEDDING, T., HINCE, G. y FERRARI, B., 2021. Microbial community analysis of biopiles in Antarctica provides evidence of successful hydrocarbon biodegradation and initial soil ecosystem recovery.

- Environmental Pollution* [en línea], vol. 290, no. August, pp. 117977. ISSN 18736424. DOI 10.1016/j.envpol.2021.117977. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117977>.
46. VASILYEVA, G., KONDRASHINA, V., STRIJAKOVA, E. y ORTEGA-CALVO, J.J., 2020. Adsorptive bioremediation of soil highly contaminated with crude oil. *Science of the Total Environment* [en línea], vol. 706, pp. 135739. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2019.135739. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135739>.
47. WHELAN, M.J., COULON, F., HINCE, G., RAYNER, J., MCWATTERS, R., SPEDDING, T. y SNAPE, I., 2015. Fate and transport of petroleum hydrocarbons in engineered biopiles in polar regions. *Chemosphere* [en línea], vol. 131, pp. 232-240. ISSN 18791298. DOI 10.1016/j.chemosphere.2014.10.088. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.10.088>.
48. WOLIŃSKA, A., KUŻNIAR, A., SZAFRANEK-NAKONIECZNA, A., JASTRZĘBSKA, N., ROGUSKA, E. y STĘPNIEWSKA, Z., 2016. Biological activity of autochthonic bacterial community in oil-contaminated soil. *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 227, no. 5. ISSN 15732932. DOI 10.1007/s11270-016-2825-z.
49. WU, M., YE, X., CHEN, K., LI, W., YUAN, J. y JIANG, X., 2017. Bacterial community shift and hydrocarbon transformation during bioremediation of short-term petroleum-contaminated soil. *Environmental Pollution* [en línea], vol. 223, pp. 657-664. WU, M., YE, X., CHEN, K., LI, W., YUAN, J. ISSN 18736424. DOI 10.1016/j.envpol.2017.01.079. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.079>.
50. ZHANG, K., WANG, S., GUO, P. y GUO, S., 2021. Characteristics of organic carbon metabolism and bioremediation of petroleum-contaminated soil by a mesophilic aerobic biopile system. *Chemosphere* [en línea], vol. 264, pp. 128521. ISSN 18791298. DOI 10.1016/j.chemosphere.2020.128521. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128521>.
51. ZHENG, Y.M., XI, B.D., SHAN, G.C., YU, M. Da, CUI, J., WEI, K.H., LIU, H.B. y HE, X.S., 2021. High proportions of petroleum loss ascribed to volatilization rather than to microbial degradation in greenhouse-enhanced biopile. *Journal*

*of Cleaner Production* [en línea], vol. 303, pp. 127084. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2021.127084. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127084>.

52. ZIVELYTE, V., VALTERS, K. y VASAREVICIUS, S., 2017. Comparison between passive remediation and bioremediation for the hydrocarbons contaminated soil clean up. *Energy Procedia* [en línea], vol. 128, pp. 339-344. ISSN 18766102. DOI 10.1016/j.egypro.2017.08.322. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.322>.





**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

### **Declaratoria de Autenticidad del Asesor**

Yo, UGARTE ALVAN CARLOS ALFREDO, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - LIMA ESTE, asesor de Tesis titulada: "Revisión Sistemática: Biopila como Técnica de Tratamiento para Suelos Contaminados por Crudo de Petróleo y Derivados", cuyos autores son YESQUEN ALDANA DAYHANA BELEN, VIERA ANCAJIMA FERNANDO DAVID, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 13.00%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

LIMA, 15 de Noviembre del 2022

| <b>Apellidos y Nombres del Asesor:</b>   | <b>Firma</b>   |
|--|--|
| UGARTE ALVAN CARLOS ALFREDO<br><b>DNI:</b> 10473562<br><b>ORCID:</b> 0000-0001-6017-1192 | Firmado electrónicamente<br>por: CUGARTEA el 28-11-<br>2022 10:47:35 |

Código documento Trilce: TRI - 0441257