

Eficiencia de la bioestimulación y la bioaumentación en la remoción de hidrocarburos del suelo: una revisión sistemática

Efficiency of biostimulation and bioaugmentation in hydrocarbon soil remediation: A systematic review

Deicy Ore¹ , Daniela Rumiche¹ , Karol Ponce¹ ,
Manuel Saavedra¹  y Yaneth Vasquez-Olivera^{1*} 

1 Carrera de Ingeniería Ambiental, Universidad Científica del Sur. Lima, Perú.



Citar como: Ore *et al.* (2025). «Eficiencia de la bioestimulación y la bioaumentación en la remoción de hidrocarburos del suelo: una revisión sistemática». *South Sustainability*, 6(1), e117.
DOI: 10.21142/SS-0601-2025-e117

Artículo recibido: 25/8/2024
Revisado por pares
Artículo aceptado: 8/1/2025



© Los autores, 2024. Publicado por la Universidad Científica del Sur (Lima, Perú)

* E-mail de correspondencia:
yvasquez@cientifica.edu.pe

RESUMEN

La biorremediación de hidrocarburos en el suelo mediante el uso de bacterias ha ganado relevancia en los últimos años, al subrayar su eficacia como una técnica tanto ambientalmente sostenible como económicamente viable. Este trabajo ha revelado que la bioestimulación y la bioaumentación son métodos efectivos para la degradación de contaminantes, si se presentan las condiciones ambientales favorables y se seleccionan los microorganismos correctos; no obstante, se han identificado desafíos en la aplicación práctica, especialmente en cuanto a la competencia con la microbiota nativa y la adaptación a las condiciones locales. Mediante un análisis exhaustivo de estudios recientes, este artículo profundiza en los parámetros críticos como el pH, la temperatura, la eficiencia de remediación y los mecanismos de acción involucrados. Se revisa y analiza la literatura científica sobre la biorremediación de hidrocarburos por bacterias, evaluando los parámetros fisicoquímicos, sus mecanismos de acción y la eficiencia mediante los métodos de bioestimulación y bioaumentación, destacando la importancia de las bacterias en la mitigación de la contaminación por hidrocarburos, y ofreciendo una perspectiva sobre las investigaciones necesarias para superar las barreras actuales y mejorar la eficiencia de estas técnicas.

Palabras clave: *biorremediación, bacterias, suelo contaminado, hidrocarburos, bioaumentación, bioestimulación*

ABSTRACT

Hydrocarbon bioremediation in soil using bacteria has gained greater relevance in recent years, highlighting its effectiveness as an environmentally sustainable and economically viable technique. This article demonstrates that biostimulation and bioaugmentation are effective methods for contaminant degradation, if favorable environmental conditions are present and the correct microorganisms are selected; however, challenges have been identified in practical application, particularly with regard to competition with native microbiota and adaptation to local conditions. Through a comprehensive analysis of recent studies, this article focuses on critical parameters such as pH, temperature, remediation efficiency and the mechanisms of action involved. The scientific literature on the bioremediation of hydrocarbons by bacteria is reviewed and analyzed, evaluating the physicochemical parameters, their mechanisms of action and efficiency, through biostimulation and bioaugmentation methods, highlighting the importance of bacteria in mitigating hydrocarbon contamination and offering a perspective on the research required in order to overcome existing barriers and improve the efficiency of these techniques.

Keywords: *bioremediation, bacteria, contaminated soil, hydrocarbons, bioaugmentation, biostimulation*



Introducción

El rápido avance industrial ha generado una creciente demanda de petróleo y sus derivados (Ejaz *et al.*, 2021). En la actualidad, la producción mundial de petróleo crudo supera aproximadamente los $5,5 \times 10^9$ toneladas anuales (Chuah *et al.*, 2022). Las principales fuentes de contaminación antropogénica incluyen la producción, el transporte, el procesamiento químico y la distribución de los hidrocarburos, componentes esenciales del petróleo (Ławniczak *et al.*, 2020).

En el suelo, la presencia de hidrocarburos reduce la tasa de crecimiento de las plantas, ya que obstaculiza su aptitud para fines agrícolas (Popoola *et al.*, 2021; Abubakar *et al.*, 2024). Además, el petróleo está categorizado como un contaminante orgánico persistente por la Agencia de Protección Ambiental (EPA), debido a su estabilidad, longevidad y tendencia a la bioacumulación y biomagnificación (Hussain *et al.*, 2024). Por lo tanto, su presencia en el ambiente puede tener consecuencias graves en la salud humana (Chen *et al.*, 2024).

Según Widdel y Rabus (2001), los hidrocarburos se componen principalmente de hidrógeno y carbono, la mayoría son apolares y presentan una baja reactividad química a temperatura ambiente. Se clasifican comúnmente según los enlaces que poseen; los alifáticos (alcanos, alquinos, alquenos) son los que se caracterizan por presentar cadenas simples en su estructura (Araujo *et al.*, 2016). Además, estos pueden presentar cadenas de carbono lineales, como los n-alcanos; ser ramificados, como los isoalcanos; o ser cíclicos, como los isoprenoides acíclicos (Ehiosun *et al.*, 2023).

Por otro lado, las moléculas que presentan anillos en su composición se denominan hidrocarburos aromáticos (Varjani, 2017). Estos se dividen en dos grupos: hidrocarburos aromáticos monocíclicos, que comprenden compuestos como el tolueno, benceno, xileno y etilbenceno; y los hidrocarburos aromáticos policíclicos, como el fluoranteno, pireno, benzo-pireno, entre otros (Costa *et al.*, 2012).

Para mitigar el impacto de estos contaminantes, la biorremediación es una técnica ambiental que resulta económicamente viable (Leflay *et al.*, 2020). Esta utiliza microorganismos como hongos, bacterias, algas o enzimas para facilitar la degradación, oxidación o transformación de contaminantes orgánicos en compuestos menos dañinos como agua, dióxido de carbono (CO₂) y biomasa (Martínez-Prado y Soto-Álvarez, 2017). Esta degradación se debe a la acción sinérgica de microorganismos, y se aplica a mares, ríos, lagos y suelos (Benites y Méndez, 2023).

La aplicación de dicha técnica depende de la distribución del contaminante y la biodisponibilidad de los microorganismos (Khalil *et al.*, 2023). Por lo tanto, para contrarrestar las diferentes limitantes y mejorar, tanto la

eficacia como la eficiencia de la biodegradación, resaltan dos metodologías (Chen *et al.*, 2022).

La bioaumentación es un método que implica introducir microorganismos exógenos para mejorar la degradación de hidrocarburos (Castillo *et al.*, 2020). Este método se utiliza cuando la microbiota nativa no puede degradar los contaminantes, ya sea en agua o suelo (Hadibarata *et al.*, 2022). Además, puede ser alóctona o autóctona, y su éxito depende de la capacidad de los microorganismos introducidos para competir con la microbiota autóctona, mantener estabilidad genética y viabilidad, y adaptarse a las condiciones ambientales del sitio que se quiere biorremediar (Chukwuma *et al.*, 2024).

En cambio, la bioestimulación consiste en modificar las condiciones del entorno, como el pH, la temperatura y el oxígeno disuelto (Helmy y Kardena, 2024). Esto se logra mediante la adición de nutrientes limitantes y aceptores de electrones, como fósforo, nitrógeno, oxígeno o carbono (Patiño *et al.*, 2021), para mejorar la actividad de los microorganismos nativos capaces de degradar hidrocarburos (Wang *et al.*, 2023).

La biorremediación de hidrocarburos por bacterias es crucial en el contexto actual de la contaminación ambiental y la necesidad urgente de encontrar soluciones sostenibles (Ubani *et al.*, 2022). La contaminación por hidrocarburos es una de las más persistentes y dañinas para los ecosistemas, ya que afecta no solo la biodiversidad, sino también la salud humana y la economía global (Saed *et al.*, 2023). En este contexto, este trabajo de revisión es de gran importancia, ya que pretende ofrecer una visión completa de los avances y desafíos en este campo, al establecer una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas (Zhang *et al.*, 2023). Por ende, el objetivo de esta investigación es revisar y analizar la literatura científica existente sobre la biorremediación de hidrocarburos por bacterias, así como los parámetros fisicoquímicos, sus mecanismos de acción y la tasa de eficiencia, mediante los métodos de bioestimulación y bioaumentación.

Metodología

En el presente trabajo, se realizó una búsqueda sistemática de literatura enfocada en artículos de investigación con las palabras clave «bacteria», «hidrocarburos», «suelo», «biorremediación», «bioaumentación» y «bioestimulación». Se emplearon operadores booleanos para combinar términos de manera efectiva y se limitó la búsqueda a los últimos cinco años (2019-2024), con el fin de obtener resultados más relevantes. Asimismo, se estableció como criterio de inclusión aquellos estudios ejecutados a nivel de laboratorio, en los cuales los parámetros analizados fueron monitoreados de forma eficaz y contaron con validación estadística. Se identificaron dos métodos predominantes para la degradación de hidrocarburos: la bioestimulación

y la bioaumentación. Se evaluaron los rangos óptimos de temperatura y pH que favorecen la eficiencia bacteriana en la degradación de los hidrocarburos y se compiló en un cuadro los análisis estadísticos más utilizados para analizar la eficiencia de remediación.

Para el análisis de resultados, se elaboró un esquema lógico con el fin de evaluar la eficiencia en la remoción de hidrocarburos (figura 1). La información recopilada se organizó en un cuadro y se procedió a seleccionar los ejes temáticos, estandarizar las tablas y descartar los artículos que no cumplieran con los criterios evaluados en cada eje.

Por otro lado, la eficiencia de degradación de los métodos estudiados se evaluó considerando los artículos que referían al rango de degradación del hidrocarburo (en porcentaje) y la tasa promedio de degradación. También se compilaron los mecanismos de acción, efectividad bacteriana, y se presentaron por metodología de remediación.

Dentro del análisis se incluyeron varios aspectos clave: se identificaron y evaluaron las diferentes cepas bacterianas utilizadas en la biorremediación, y se revisaron los aditivos o nutrientes utilizados como estimulantes para mejorar la actividad bacteriana y la eficiencia de la degradación. La eficiencia de degradación se midió con el porcentaje de rendimiento de la bacteria y el tiempo (en días) que demora la bacteria en degradar el hidrocarburo.

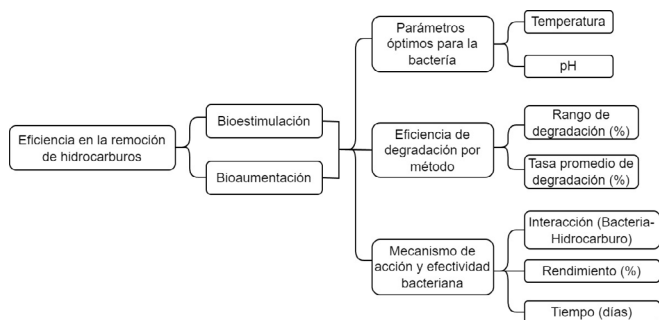


Figura 1. Proceso de selección de artículos científicos y parámetros analizados en esta investigación.

La figura 1 muestra el proceso que se siguió para la identificación, selección y el posterior análisis de los artículos científicos revisados en esta investigación, que inicia con la identificación del tema, la selección del método estudiado en los artículos científicos, y luego los criterios que se abordaron en cada artículo y los parámetros que se consideraron para indicar la eficiencia del método en la remoción del hidrocarburo del suelo.

Resultados y discusiones

Se revisaron en total 118 artículos científicos, y se analizaron como temas de interés los parámetros fisicoquímicos óptimos para el uso de bacterias en procesos de degradación de hidrocarburos, la bioaumentación, la bioestimulación y, dentro de estos, los mecanismos

de acción que presentan mejores resultados en diversos escenarios.

Parámetros fisicoquímicos (pH y temperatura)

Los resultados indican que el pH óptimo para activar las bacterias dentro de los estudios fluctúa entre 6 y 9; pueden activarse en condiciones ligeramente ácidas a ligeramente alcalinas, con el fin de observar un máximo rendimiento de degradación (tabla 1). Asimismo, los suelos destinados a biorremediación contaminados por hidrocarburos no se encuentran en condiciones muy ácidas ni básicas (Vizuite-García *et al.*, 2020).

Los variados rangos de pH mostraron diferentes efectos en el proceso de biodegradación de hidrocarburos, incluso con pequeños cambios de pH (Mezzari *et al.*, 2011; Sun *et al.*, 2021). Esto debido a que ciertas enzimas, que son producidas por bacterias para llevar a cabo la biodegradación, actúan a un valor de pH específico (Guo *et al.*, 2020). Por ejemplo, Christopher *et al.* (2021) y Hossain *et al.* (2022) han demostrado que los suelos con un pH neutro (alrededor de 7) a ligeramente alcalino (hasta 8) facilitan el crecimiento óptimo de las bacterias del género *Pseudomonas sp.* y *Bacillus sp.*, al incrementar la producción y actividad enzimática, como la producción de los biosurfactantes, los cuales son cruciales para la degradación de hidrocarburos.

Asimismo, las bacterias *Enterobacter*, *Ochrobactrum sp.*, *Castellaniella sp.*, *Paenalcigenes suwonensis*, *Lactobacillus fermentum* y *Lactobacillus nagelii* alcanzaron un crecimiento óptimo y la máxima degradación del petróleo (ODB) en suelos con pH de 6 a 8, lo que favorece la disponibilidad de nutrientes y estabilidad de las enzimas microbianas (Koolivand *et al.*, 2022; Helmy y Karden, 2024; Deng *et al.*, 2021; y Omenna *et al.*, 2024). Asimismo, existen bacterias como *Stutzerimonas stutzeri*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Mycolicibacterium sp.*, que tienen un crecimiento óptimo en suelos con pH alcalino, en un rango de 8 a 9, ya que sus oxidasas y peroxidasas pueden ser más activas en un ambiente ligeramente alcalino, lo que facilita la descomposición de los hidrocarburos (Kumari y Chandra, 2023; Luo *et al.*, 2024; Yang *et al.*, 2021). Sin embargo, estas bacterias tienden a no desarrollarse en rangos de pH más bajos, como 4,5 y 3,5, ya que los suelos muy ácidos pueden inhibir la actividad microbiana y reducir así la eficiencia del proceso de biorremediación (Koolivand *et al.*, 2022).

Finalmente, muchos autores destacan la importancia y variabilidad del pH presente en los suelos contaminados, ya que este parámetro no solo influye en la tasa de degradación, sino también en la producción y acción de las diferentes enzimas (Kumari y Chandra, 2023). De acuerdo con ello, el estudio realizado por Abubaka *et al.* (2024) muestra que la lipasa tiene una actividad enzimática óptima a un pH específico de 8, por lo que cualquier desviación por encima o debajo de este valor provoca una



disminución significativa en la actividad enzimática, lo que perjudica la degradación de los hidrocarburos. A partir de ello, se destaca la importancia de controlar y ajustar el pH del suelo en procesos de biorremediación para maximizar la efectividad de la degradación de hidrocarburos.

Tabla 1. Rangos óptimos de pH para la degradación de hidrocarburos por diferentes bacterias

Bacteria	pH	Referencia
<i>Pseudomonas sp</i>	7	Hossain et al. (2022)
<i>Enterobacter</i>	6-8	Koolivand et al. (2022)
<i>Bacillus sp</i> <i>Bacillus malacitensis</i>	6-7	Christopher et al. (2021)
<i>Castellaniella sp.</i>	6,5	Deng et al. (2021)
<i>Cepa bacetriana</i> <i>Stutzerimonas stutzeri</i>	9	Kumari y Chandra (2023)
<i>Ochrobactrum sp.</i>	7	Helmy et al. (2024)
<i>Paenalcigenes suwonensis</i> <i>Lactobacillus fermentum</i> <i>Lactobacillus nagelii</i>	7	Omenna et al. (2024)
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	8	Luo et al. (2024)
<i>Mycolicibacterium sp.</i>	7-8	Yang et al. (2021)
<i>Bacillus subtilis</i>	8	Abubaka et al. (2024)
<i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	7	Zhang et al. (2024)

En cuanto a la temperatura, es crucial considerarla en la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos, porque afecta directamente a la degradación de hidrocarburos y condiciona la supervivencia de las bacterias (Liu et al., 2023). En su investigación, Koshlaf y Ball (2017) establecen que la temperatura ejerce una influencia significativa en la degradación de hidrocarburos y las propiedades fisicoquímicas del petróleo. Esta influencia se manifiesta en un aumento de la biodisponibilidad de los hidrocarburos, así como en la composición y actividad metabólica de las comunidades microbianas presentes. Adicionalmente, señalan que un incremento en la temperatura favorece la aceleración de las tasas de degradación de hidrocarburos. Por el contrario, si la temperatura disminuye, esto conduce a un retraso en el proceso de biodegradación (Zeng et al., 2023).

De acuerdo con la revisión bibliográfica, el rango óptimo de temperatura en suelos para lograr tasas de degradación altas es variable y depende de otros factores, como, por ejemplo, el pH, la salinidad, los nutrientes, la oxigenación, la conductividad eléctrica y el tipo de bacteria (Luo et al., 2024; Abubakar et al., 2024). Sin embargo, algunos autores mencionan que, en suelos, el rango de temperatura entre 30 y 40 °C es donde generalmente se producen las tasas de degradación más altas (Koshlaf y Ball, 2017), y temperaturas por debajo o por encima de este rango, acompañadas del envejecimiento de los hidrocarburos, pueden reducir la tasa de biodegradación

(Tang et al., 2012). Con base en esta información, se seleccionaron las investigaciones que muestran altas tasas de degradación (tabla 2).

Tabla 2. Rangos óptimos de temperatura para la degradación de hidrocarburos por diferentes bacterias

Bacteria	Rango óptimo de temperatura	Autor y año
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> WS02	25-35 °C	Luo et al. (2024)
<i>Bacillus subtilis</i>	40 °C	Abubakar et al. (2024)
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	50 °C	Abubakar et al. (2024)
<i>Enterobacter xiangfangensis</i> STP-3	35 °C	Muneeswari et al. (2021)
<i>Bacillus sp.</i> Z-13	15-45 °C	Zhang et al. (2023)
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> IIPIS-8	37 °C	Imam et al. (2023)
<i>Pseudomonas Pseudarthrobacter</i> <i>Paeniglutamibacter</i>	30 °C	Naloka et al. (2024)
<i>Mycolicibacterium sp</i>	30 °C	Yang et al. (2021)
<i>Pseudomonas sp.</i> SDR4 (CGMCC n.° 14048)	10 °C	Su et al. (2024)
<i>Pseudomonas sp</i>	37°C	Hossain et al. (2022)
<i>Stutzerimonas stutzeri</i> (LOBP-19A)	37 °C	Kumari y Chandra (2023)
<i>Bacillus malacitensis</i>	30 °C	Christopher et al. (2021)
<i>Bacillus subtilis</i> <i>Pseudomonas stutzeri</i> <i>Acinetobacter baumannii</i>	40 °C	Elumalai et al. (2021)

La tabla 2 demuestra que existen diversos rangos óptimos de temperatura para que las bacterias desarrollen su rol de degradación en hidrocarburos; las temperaturas van desde los 10 °C de *Pseudomonas sp.* hasta los 50 °C de *Pseudomonas aeruginosa*, lo cual está dentro del rango óptimo mencionado por Koshlaf y Ball (2017). Esta diversidad refleja la amplia variedad de adaptaciones fisiológicas que han desarrollado las bacterias para sobrevivir y prosperar en diferentes entornos; no se ha observado una correlación estricta entre el grupo de bacterias y la temperatura óptima. Por ejemplo, *Pseudomonas aeruginosa* tiene cepas con rangos óptimos tanto a 25-35 °C como a 50 °C. Algunas bacterias, como *Bacillus sp.* tienen un rango amplio de temperatura óptima (15-45 °C). Esto les permite funcionar en condiciones ambientales variables.

En la tabla 2, el 54 % de los artículos usan especies de *Pseudomonas* que son más eficientes a altas temperaturas para la biorremediación, lo cual concuerda con Chaudhary et al. (2020), quienes mencionan que estas especies son usadas ampliamente para la degradación de hidrocarburos, especialmente la *Pseudomonas aeruginosa*.

En el estudio de Abubakar *et al.* (2024), las *Pseudomonas aeruginosa* han mostrado un mayor porcentaje de degradación en comparación con *B. subtilis* a una misma temperatura de 40 y 50 °C (figura 2), lo que sugiere que *P. aeruginosa* es un degradador más eficiente del petróleo crudo en comparación con *B. subtilis*. Esto concuerda con los hallazgos de Vinothini *et al.* (2015), quienes informaron una degradación del 65 % de la muestra de petróleo crudo tratada con *Pseudomonas sp.* y una degradación del 40 % con la muestra de petróleo crudo tratada con *Bacillus sp.*

Finalmente, Abubakar *et al.* (2024) demostraron que la actividad de las bacterias *Pseudomonas* y *Bacillus* varía en función de la temperatura. De esto, se puede afirmar que la actividad de *Bacillus* es mayor a temperaturas más bajas (25-35 °C), mientras que la actividad de las *Pseudomonas* es mayor a temperaturas más altas (50 °C). Por lo tanto, se concluye que *Bacillus* es más efectiva para degradar

suelos contaminados con hidrocarburos en ambientes fríos, mientras que *Pseudomonas* es más efectiva en ambientes cálidos.

Prueba estadística usada en la validación de los resultados de las investigaciones analizadas

Para validar la eficiencia de degradación por metodologías analizadas (bioaumentación y bioestimulación), se verificó que las investigaciones desarrollen análisis estadísticos a los resultados obtenidos. Las pruebas estadísticas utilizadas por los autores estudiados se presentan en la tabla 3, donde el ANOVA (análisis de varianza) es el más usado, ya que aparece en el 42 % de las investigaciones de forma individual, pero llega a utilizarse hasta en 87 % asociado con otras técnicas como Tukey o Duncan.

Tabla 3. Prueba estadística usada para validar resultados en la remediación de hidrocarburos

Análisis estadístico	Porcentaje (%) de uso	Método de remediación	Referencias
ANOVA	42	Bioaumentación	Dike <i>et al.</i> (2024), Popoola <i>et al.</i> (2022), Abena <i>et al.</i> (2019), AlKaabi <i>et al.</i> (2020), Sun <i>et al.</i> (2021), Lee <i>et al.</i> (2024), Koolivand <i>et al.</i> (2022), Kansour <i>et al.</i> (2023)
		Bioestimulación	Osadebe <i>et al.</i> (2024), Chukwuma <i>et al.</i> (2023), Moral <i>et al.</i> (2022), Popoola <i>et al.</i> (2022), Feng <i>et al.</i> (2021)
ANOVA y Tukey	21	Bioaumentación	Ameen y Al-Homaidan (2024), Zhao <i>et al.</i> (2024), Perera <i>et al.</i> (2019), Machado <i>et al.</i> (2020)
		Bioestimulación	Zhao <i>et al.</i> (2024), Yap <i>et al.</i> (2024), Machado <i>et al.</i> (2020), Vizuete-García <i>et al.</i> (2020)
ANOVA y método de la diferencia significativa (LSD)	10	Bioaumentación	Guo <i>et al.</i> (2022), Miao <i>et al.</i> (2020)
		Bioestimulación	Miao <i>et al.</i> (2020), Barrios San Martín <i>et al.</i> (2022)
ANOVA y prueba de rango múltiple (DUNCAN)	14	Bioaumentación	Naloka <i>et al.</i> (2024), Saeed <i>et al.</i> (2023), Abubakar <i>et al.</i> (2024), Shirzadian Gilan <i>et al.</i> (2023)
		Bioestimulación	Saeed <i>et al.</i> (2023), Abubakar <i>et al.</i> (2024)
T-Test	7	Bioestimulación	Zhang <i>et al.</i> (2024), Elgazali <i>et al.</i> (2023)
Tukey	3	Bioestimulación	Vizuete-García <i>et al.</i> (2020)
Test de Levene, ANOVA y Tukey	3	Bioaumentación	Curiel-Alegre <i>et al.</i> (2024)

Bioaumentación y su eficiencia de degradación

Esta investigación identificó que el método de bioaumentación es el más empleado en los últimos años en la biorremediación del suelo por bacterias (tabla 4). En el rango A, que se caracterizó por tener la tasa promedio de degradación más alta (92,90 %), se encontraron los siguientes autores: Tripathi *et al.* (2023) con 93 %, Ehiosun *et al.* (2023) con 91 %, Muneeswari *et al.* (2021) con 82 %, Imam *et al.* (2023) con 98 %, Naloka *et al.* (2024) con 98 %,

Ghorbannezhad *et al.* (2021) con 98 %, Yang *et al.* (2021) con 98 %, Sun *et al.* (2021) con 84,2 %, Lee *et al.* (2024) con 93 %, Feizi *et al.* (2020) con 98 %, Perera *et al.* (2019) con 99,42 %, Nafal y Abdulhay (2020) con 95,5 %, Kadri *et al.* (2018) con 88,52 %, Deng *et al.* (2024) con 100 %, Chen *et al.* (2024) con 87 %, Zhou *et al.* (2024) con 100 %, Kumari y Chandra (2023) con 88 %, Naaz *et al.* (2024) con 90 %. Por otro lado, el rango E se caracterizó por tener la tasa promedio de degradación más baja (8,11 %).



Tabla 4. Rango de la tasa de degradación por bioaumentación

Rango	Degradación para bioaumentación (%)	Artículos revisados (%)	Promedio tasa de degradación (%)	Autor y año
A	80,01-100 %	42,86 %	92,90	Tripathi et al. (2023), Ehiosun et al. (2023), Muneeswari et al. (2021), Imam et al. (2023), Naloka et al. (2024), Ghorbannezhad et al. (2021), Yang et al. (2021), Sun et al. (2021), Lee et al. (2024), Feizi et al. (2020), Perera et al. (2019), Nafal y Abdulhay (2020), Kadri et al. (2018), Deng et al. (2024), Chen et al. (2024), Zhou et al. (2024), Kumari y Chandra (2023), Naaz et al. (2024)
B	60,01-80 %	23,81 %	72,19	Alsayegh et al. (2021), Patiño et al. (2021), Popoola y Yusuff (2021), ShirzadianGilan et al. (2023), Koolivand et al. (2022), Kadri et al. (2018), Zou et al. (2024), Liu et al. (2022), Christopher et al. (2021), Elumalai et al. (2021)
C	40,01-60 %	23,81 %	49,33	Chen et al. (2022), Ajona et al. (2021), Guo et al. (2022), Ameen y Al-Homaidan (2024), AlKaabi et al. (2020), Li et al. (2024), Mandree et al. (2021), Medić et al. (2020), Saeed et al. (2022)
D	20,01-40 %	7,14 %	33,50	Benites y Méndez (2023), Ejaz et al. (2021), Kansour et al. (2023)
E	1-20 %	2,38 %	8,11	Abubakar et al. (2024)
Total	100,00 %			

Por ejemplo, Deng et al. (2024) obtuvieron una tasa de degradación del 100 % utilizando elementos biológicos sintéticos artificialmente en estructuras microbianas como la *E. coli* ingenierizada. Esta cepa degradó eficazmente 1mM 1,2-dicloroetano (1,2-DCA) en 8 h y, 2mM en 12h, demostrando que los eliminadores microbianos sintéticos tienen una excelente tolerancia y metabolismo de los contaminantes. Este método suele emplearse cuando la biodegradación no se logra con la bioestimulación, por una insuficiencia en la composición del microbioma nativo que afecta su capacidad de degradación (Khoshkholgh et al., 2019). Además, al introducir microorganismos especializados, se reduce el tiempo para la remediación a diferencia de la bioestimulación, la cual depende de la supervivencia de las bacterias nativas y no de la desintoxicación eficiente (Lee et al., 2018).

Es importante mencionar que la eficiencia suele depender del éxito en la colonización de la cepa microbiana y de su capacidad para mejorar el sistema (Ji et al., 2020). Sin embargo, en el estudio de Abubakar et al. (2024) se visualiza que existen suelos con presencia de sales minerales con rangos de muy baja tasa de degradación (8,11 %) de *B. subtilis* en comparación con 1 *aeruginosa*, (15,69 %), bacteria que es considerada un degradador más eficiente de petróleo crudo para este medio. Esto sucede porque

este método puede fracasar si hay incompatibilidad entre las cepas bacterianas funcionales que fueron introducidas y las nativas, así como por el cambio de los microorganismos nativos del suelo (Liang et al., 2020). Además, puede existir la competencia de nutrientes entre los microorganismos, la presencia de inhibidores y porque su establecimiento a largo plazo es incierto (Sforza et al., 2018; Rahman et al., 2020).

Bioestimulación y su eficiencia de degradación

La técnica de bioestimulación se analizó en 25 artículos, los cuales presentaron diferentes rangos de degradación (tabla 5). En el rango A, con una tasa de degradación promedio de 89,9 %, se encontraron a los siguientes autores: Baoune et al. (2018) con 98 %, Popoola et al. (2022) con 94 %, Barrios San Martín et al. (2022) con 91,4-87,2 %, Ugaz-Hoyos et al. (2023) con 92,5-80,7 %, Cavazzoli et al. (2023) con 89 %, y Brzeszcz et al. (2024) con 86,8 %. A su vez, el rango B, con un promedio de 73,6 %, estuvo conformado por Parrales et al. (2022) con 80 %, Omenna et al. (2024) con 78,38 %, Pandey et al. (2022) con 77,33 %, Luo et al. (2024) con 75 %, Martínez-Prado y Soto-Álvarez (2017) con 73,18 %, Luo et al. (2024) con 73 %, Lee et al. (2018) con 65%, y Zhang et al. (2024) con 55,23 %. Asimismo, en el rango C el promedio fue de 52,3 % y D con 30,5 %.

Tabla 5. Artículos con método de bioestimulación por rango

Rango	Degradación para bioestimulación (%)	Artículos analizados (%)	Promedio tasa de degradación (%)	Autor y año
A	80,01-100 %	24,00 %	89,98	Brzeszcz <i>et al.</i> (2024), Barrios San Martín <i>et al.</i> (2022), Ugaz-Hoyos <i>et al.</i> (2023), Popoola <i>et al.</i> (2022), Baoune <i>et al.</i> (2018), Cavazzoli <i>et al.</i> (2023)
B	60,01-80 %	32,00 %	73,61	Luo <i>et al.</i> (2024), Zhang <i>et al.</i> (2024), Martínez-Prado y Soto-Álvarez (2017), Omenna <i>et al.</i> (2024), Parrales <i>et al.</i> (2022), Pandey <i>et al.</i> (2022), Lee <i>et al.</i> (2018), Luo <i>et al.</i> (2024)
C	40,01-60 %	32,00 %	52,27	Zhang <i>et al.</i> (2024), Wang <i>et al.</i> (2023), Ubani <i>et al.</i> (2022), Zhang <i>et al.</i> (2023), Yessentayeva <i>et al.</i> (2024), Yuan <i>et al.</i> (2024), Machado <i>et al.</i> (2020), Feng <i>et al.</i> (2021)
D	20,01-40 %	12,00 %	30,50	Gou <i>et al.</i> (2024), Chen <i>et al.</i> (2024), Elgazali <i>et al.</i> (2023)
Total	100,00 %			

Se destaca la alta efectividad de degradación que posee este método, con un promedio de hasta 89 %. Sin embargo, a pesar de tener porcentajes relativamente altos, el tiempo que requieren las bacterias para degradar los compuestos es mayor en comparación con la bioaumentación. Por ejemplo, Ugaz-Hoyos *et al.* (2020) obtuvieron un 80,7 % de degradación de petróleo crudo mediante bioestimulación en 30 días, mientras que Nafal y Abdulhay (2020) lograron un 75 % de degradación del mismo contaminante en solo 7 días utilizando bioaumentación.

Esto sucede porque la bioestimulación está limitada por factores ambientales como el pH, la temperatura y la disponibilidad de oxígeno, lo que puede generar una respuesta más lenta en comparación con la bioaumentación en términos de actividad microbiana (Barrios San Martín *et al.*, 2022). Aunque las bacterias pueden sobrevivir a estos factores, su capacidad degradativa necesita de otros elementos adicionales para remediar los hidrocarburos de manera efectiva (Ghorbannezhad *et al.*, 2021). Además, para incentivar a esa capacidad se le añaden estimulantes como el cloruro de amonio (NH_4Cl), el nitrito de sodio (NaNO_2) y el nitrato de sodio (NaNO_3), utilizados para proporcionar fuentes de nitrógeno, un nutriente esencial para el crecimiento y la actividad metabólica de las bacterias (Wang *et al.*, 2023).

Sin embargo, estos aditivos no terminan de ser efectivos frente a la ventaja en cuanto a eficiencia que tiene la bioaumentación (Zhang *et al.*, 2023). Por ejemplo, las bacterias degradadoras del género *Bacillus* muestran una mayor actividad en un rango de pH de 5,0 a 8,0 y temperaturas entre 25 y 37 °C, mientras que temperaturas por debajo de 20 °C reducen significativamente su actividad metabólica (Popoola y Yusuff, 2021). Dos estudios con el género *Bacillus* para remediar suelo con HTP mostraron resultados diferentes. Por un lado, se

utilizó bioestimulación con aditivos a una temperatura de 15 °C y se obtuvo 59 % de degradación (Zhang *et al.*, 2023). Por otro lado, el de bioaumentación estuvo a 25 °C con una tasa de degradación del 80 % en 5 días menos (Alsayegh *et al.*, 2021).

Si bien no es el método más eficiente, este se convierte en una opción más económica (Zou *et al.*, 2024), con costos operacionales reducidos hasta en un 50 % en comparación con la bioaumentación, ya que no requiere la producción, el transporte y el mantenimiento de cepas microbianas específicas (Ubani *et al.*, 2022), a diferencia de la bioaumentación, que puede llegar a tener tasas de degradación menores a 10 % (Chen *et al.*, 2022). La bioestimulación, al tratarse de bacterias nativas con capacidad para degradar, tendrá un mínimo más alto, con un promedio del 30,5 %. Además, reduce la necesidad de introducir microorganismos exógenos, lo que minimiza los riesgos ecológicos asociados con la introducción de especies foráneas (Saeed *et al.*, 2023).

Mecanismo de acción y efectividad de las bacterias en la remoción de hidrocarburos

Bioaumentación

La tabla 6 incluye 35 artículos que examinan los mecanismos de acción empleados por las bacterias para eliminar hidrocarburos presentes en el suelo mediante bioaumentación, tales como la adsorción, el aislamiento, la inoculación y la incubación, celdas de combustible microbianas (MFC) y *landfarming*. Además, se detallan los hidrocarburos más frecuentemente analizados por los autores, que son el petróleo crudo, los hidrocarburos totales de petróleo (HTP) y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). La tabla también presenta el porcentaje de eficiencia de estas bacterias y el tiempo en días requerido para lograr la remoción del hidrocarburo.



Tabla 6. Bioaumentación, mecanismo de acción y eficiencia en la remoción de hidrocarburos del suelo

Mecanismo de acción	Tipo de hidrocarburo	Bacteria	Eficiencia (%)	Tiempo (días)	Referencia	
Aislamiento	HAP	<i>Rhodococcus sp.</i> <i>Achromobacter sp.</i> <i>Oerskovia paurometabola</i> <i>Pantoea sp.</i> <i>Sejongia sp.</i> <i>Microbacterium maritypicum</i> <i>Arthrobacter equi</i>	99	84	Haleyur et al. (2019)	
		<i>Rhodococcus</i> <i>Burkholderia</i> <i>Bacillus</i> <i>Acinetobacte</i>	85,5	45	Tripathi et al. (2023)	
		<i>Bacillus malacitensis</i>	61,8	28	Christopher et al. (2021)	
		<i>Bacillus sp.</i>	53,04	74	Mandree et al. (2021)	
	HTP	<i>Cocos</i>	93,75	1	Popoola et al. (2022)	
		<i>Bacillus lincheniformis</i> <i>Pseudomonas aeruginosa</i> <i>Virgibacillus</i>	53	90	AlKaabi et al. (2020)	
		<i>Dietzia</i> <i>Nocardioiides</i> <i>Rhodococcus</i> <i>Pseudomonas</i> <i>Bacillus</i> <i>Halomonas</i> <i>Nocardioipsis</i>	93	365	Lee et al. (2024)	
		<i>Esfgingomonas sp.</i> <i>Acinetobacter sp.</i> <i>Enterobacter sp</i> <i>Estafilococos sp.</i>	75	7	Koolivand et al. (2022)	
	Aislamiento e inoculación	Pireno	<i>Bacillus subtilis</i> <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	<i>B. subtilis</i> : 8,11 <i>P. aeruginosa</i> : 15,6	28	Abubakar et al. (2024)
			<i>Micolicibacterium sp.</i>	98	8	Yang et al. (2021)
Petróleo crudo		<i>Bacillus marsiflavi</i>	46	40	Saeed et al. (2022)	
		<i>Bacillus thioparans</i> <i>Bacillus oceanisediminis</i> <i>Bacillus simplex</i>	30,50	90	Kansour y Al-Mailen (2023)	
Aislamiento, inoculación e incubación	HAP	<i>Enterobacter sp.</i>	40	30	Ejaz et al. (2021)	
	Naftaleno	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	91	2	Imam et al. (2023)	
	HTP	<i>Bacillus sorensis</i> <i>Bacillus cereus</i> <i>Pseudomonas stutzeri</i>	80	30	Alsayegh et al. (2021)	
	Petróleo crudo	<i>Pseudomonas guguanaensis</i>	74	42	Ajona y Vasanthi (2021)	
	Diésel II	<i>Bacillus thuringiensis</i>	56,46	15	Patiño et al. (2021)	
Inoculación	Hexadecano	<i>Bacillus sp.</i> <i>Aspergillus sp.</i>	99,42	14	Perera et al. (2019)	
		<i>Kocuria rosea</i> <i>Bacillus amyloliquefaciens.</i>	95,5	12	Nafal et al. (2020)	
	Petróleo crudo	<i>Novosphingobium sp.</i> <i>Gordonia amicalis</i> <i>Gordonia terrae</i>	87	5	Ehiosun et al. (2023)	
		<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	87,07	90	Chen et al. (2024)	
		<i>Pseudomonas stutzeri</i>	46	60	Li et al. (2024)	
		<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	40,25	60	Ameen y Al-Homaidan (2024)	

	Hexadecano, aceite de motor, BTEX.	<i>Alcanivorax borkumensis</i>	88,52	3	Kadri et al. (2018)
		<i>Bacillus kochii</i>	98	56	Feizi et al. (2020)
		<i>Pteris vittata L.</i>	84,2	10	Sun et al. (2021)
	Fenantreno	<i>Pseudomonas Pseudarthrobacter Paeniglutamibacter</i>	65	5	Naloka et al. (2024)
		<i>Pseudomonas aeruginosa ai</i>	50	7	Medić et al. (2020)
	Diésel	<i>Bacillus methylophilus.</i>	60,48	60	Machado et al. (2020)
Landfarming	HTP	<i>Pseudomonas Bacillus</i>	100	56	Zhou et al. (2024)
	Petróleo	<i>Pseudomonas</i>	30	7	Benites y Méndez (2023)
Celdas de combustible microbianas (MFC)	Aceite de motor	<i>S. aureus Pseudomonas Aeruginosa</i>	93	7	Naaz et al. (2024)
Absorción	Petróleo crudo, diésel C32 y C34	<i>Bacillus subtilis Pseudomonas stutzeri Acinetobacter baumannii</i>	70	5	Elumalai et al. (2021)
Oxidación química	Petróleo crudo	<i>Proteobacterias Actinobacterias</i>	68,30	141	Zou et al. (2024)
Inmovilización	HTP, HAP Y HST	<i>Pseudomonas pseudoalcaligenes Pseudomonas guguangensis Acinetobacter venetianus Sphingobacterium pakistanense</i>	HTP: 48,64 HST: 59,83 HAP: 56,29	84	Guo et al. (2022)

Aislamiento

Considerando como primer mecanismo al aislamiento, se obtuvieron ocho autores diferentes que emplearon esta técnica para la remoción de hidrocarburos (tabla 6). Para el petróleo se mostró una eficiencia de degradación que varía entre 93 % y 75 %, en 365 y 7 días, respectivamente (Lee et al., 2021; Koolivand et al., 2022). Esta variabilidad indica que la efectividad del aislamiento depende mucho de las cepas bacterianas seleccionadas y los parámetros fisicoquímicos. Koolivand et al. (2022) informaron una eficiencia del 75 % en solo 7 días, usando una mezcla de *Sphingomonas sp.*, *Acinetobacter sp.*, *Enterobacter sp.* y *Staphylococcus sp.*, lo que sugiere que combinar varias cepas bacterianas puede mejorar significativamente la eficiencia.

Asimismo, se puede observar que los autores Mandree et al. (2021) y Popoola et al. (2021) emplearon una sola cepa de bacterias para la biodegradación, las cuales fueron *Bacillus sp.* y *Bacilococos*. Si bien ambas pertenecen al mismo filo bacteriano, son diferentes en cuanto a su morfología. La degradación de HAP y de petróleo se dio por estas bacterias debido a su capacidad de producir biosurfactantes, lo cual facilitó la biodisponibilidad de los hidrocarburos, al hacerlos más accesibles para que las bacterias lo utilicen como fuente de carbono y energía en el proceso de biodegradación (Popoola et al., 2021).

Por otro lado, Abubakar et al. (2024) empleó 2 cepas de bacterias y tuvo un menor porcentaje de degradación en comparación con las que emplearon entre 4 a 7 cepas de bacterias. Esto puede verse influenciado porque las cepas de *Bacillus subtilis* y *Pseudomonas aeruginosa* necesitan un periodo de adaptabilidad más largo del que el investigador les dio en su tratamiento (28 días). También puede existir influencia de las condiciones de pH y temperatura, así como de la capacidad de producción de enzimas degradativas y asimilación del petróleo (Tripathi et al., 2023).

Aislamiento e inoculación

En el análisis del mecanismo combinado de inoculación y aislamiento (tabla 6), cuatro autores han utilizado esta técnica combinada. De estos, solo uno utiliza una mezcla de bacterias del género *Bacillus* y logra una degradación del 30,50 % en 90 días para el petróleo, la cual no fue tan alta debido a su diferencia ecofisiológica, por lo que sus ciclos de crecimiento y degradación son mucho más lentos y tienen diferentes capacidades metabólicas (Kansour y Al-Mailem, 2023).

Para la degradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), *Enterobacter cloacae sp.* alcanzó una tasa de degradación del 40 % en 30 días, debido a que el potencial de degradación se vio afectado por las actividades agronómicas en la zona de estudio (Ejaz et



al., 2021). Por otro lado, *Mucocilbacterium sp.* logró la mayor degradación, al alcanzar un 98 % en solo 8 días para el pireno, ya que esta bacteria tiene una alta afinidad molecular con el contaminante, e incluso puede degradar hidrocarburos aromáticos policíclicos de alto peso molecular (Yang et al., 2021).

Los resultados destacan la efectividad del mecanismo combinado de inoculación y aislamiento, en especial para reducir el tiempo necesario para la biodegradación de contaminantes.

Aislamiento, inoculación e incubación

Solo cuatro autores utilizan la combinación de aislamiento, inoculación e incubación como estrategia (tabla 6). Estos mecanismos muestran variaciones significativas en la eficiencia y el tiempo de degradación. Patiño et al. (2021) observaron una alta eficiencia del 46,56 % en 15 días con *Bacillus thuringiensis* en la degradación del petróleo, en la que destacó la eficiencia de este mecanismo. Asimismo, Ajona et al. (2021) encontraron una eficiencia del 74 % en 42 días usando *Pseudomonas guguanensis* para degradar petróleo, lo que sugiere que la cepa bacteriana específica y el tipo de hidrocarburo pueden influir en los resultados.

Por otro lado, Alsayegh et al. (2021) reportaron una eficiencia del 80 % en 30 días con *Bacillus sorensis*, *Bacillus cereus* y *Pseudomonas stutzeri* en la degradación de hidrocarburos totales de petróleo (HTP), en la que resalta la importancia de la combinación de múltiples cepas bacterianas.

Por último, Imán et al. (2023) lograron una eficiencia del 91 % en 2 días utilizando *Pseudomonas aeruginosa* para degradar, lo que mostró la efectividad de esta cepa bacteriana cuando se combina aislamiento, inoculación e incubación. Por ello, se puede indicar que la combinación de estos tres mecanismos de acción será altamente efectiva para la remediación de suelos contaminados por hidrocarburos, con variaciones en la eficiencia y el tiempo de degradación, dependiendo de las cepas bacterianas y los tipos de hidrocarburos tratados.

Inoculación

En la evaluación del mecanismo de inoculación para la biodegradación, se ha obtenido que 12 autores emplean esta técnica (tabla 5). De estos, solo 4 estudios consideraron una combinación de bacterias, mientras que el resto utilizó solo una especie, donde los géneros *Pseudomonas* y *Bacillus* son los más frecuentes en estas investigaciones.

Para el género *Pseudomonas*, se ha reportado una tasa de degradación que varía del 40,25 % al 87,07 % en un periodo de 60 a 90 días (Ameen y Al-Homaidan, 2024; Chen et al., 2024) para contaminantes como petróleo, fenantreno e HTP. En particular, *P. aeruginosa* logró una degradación del

87,07 % en 90 días para petróleo crudo (Chen et al., 2024). Una subespecie, *P. aeruginosa ai*, alcanzó un 50 % de degradación en 7 días para fenantreno, mientras que una mezcla de *P. Pseudarthrobacter* y *P. Paeniglutamibacter* alcanzó un 65 % en 5 días para el mismo contaminante (Medić et al., 2020; Naloka et al., 2024). A pesar de que las condiciones climáticas del estudio podrían haber limitado el potencial completo de degradación, este grupo de bacterias está adaptado a una amplia variabilidad de temperaturas, y su sinergia ha demostrado aumentar significativamente la degradación del contaminante (Naloka et al., 2024). Por ello, estos resultados sugieren que la combinación de bacterias puede reducir el tiempo de degradación significativamente.

Para el género *Bacillus*, la degradación fue significativamente mayor al combinarse con otras bacterias como *Kocuria rosea* y *Aspergillus sp.*, ya que logró un 95,5 % de degradación en 12 días y un 99,42 % en 14 días para petróleo y hexadecano, respectivamente. Estas tasas tan altas en poco tiempo se deben a la adición de otras bacterias además de *Bacillus*, ya que mejora la biodisponibilidad del contaminante (Nafal y Abdulhay, 2020; Perera et al., 2019). Por ejemplo, *Bacillus*, por sí sola, alcanzó una degradación del 98 % en 56 días para fenantreno. Esto se debe a que es un hidrocarburo aromático policíclico (HAP) con una estructura química más estable, por lo que la bacteria necesita más tiempo para lograr la degradación (Feizi et al., 2020).

Por otro lado, *Alcanivorax borkumensis* destacó al degradar contaminantes como hexadecano, aceite de motor y BTEX en un 88,52 % en solo 3 días, lo cual se debe a que es capaz de degradar una gran variedad de contaminantes gracias a las enzimas específicas para este propósito (Kadri et al., 2018). Esta tasa de degradación fue superior a la obtenida por una mezcla de *Novosphingobium sp.*, *Gordonia amicalisy* *Gordonia terrae*, que degradó un 87 % de petróleo en 5 días (Ehiosun et al., 2023).

Estos resultados sugieren que la inoculación no solo es eficaz en la degradación del petróleo, sino que también reduce significativamente el tiempo de tratamiento. La combinación de diferentes bacterias parece ser una estrategia prometedora para mejorar la eficiencia de biodegradación en menores tiempos.

Landfarming y celdas de combustible microbiana (MFC)

Con respecto a los mecanismos de acción novedosos, Zhou et al. (2024) y Benites y Mendez (2023) proponen el *landfarming* como un método prometedor para la remoción de HAP y petróleo con un tiempo de degradación de 56 y 7 días, respectivamente. Zhou et al. (2024) lograron un mayor porcentaje de remoción utilizando las cepas de *Pseudomonas* y *Bacillus*, y alcanzaron un 100 %, mientras que Benites y Mendez (2023) obtuvieron un 30 % empleando la cepa de *Pseudomonas*, como se muestra en la tabla 6.

Esta diferencia en el porcentaje de remoción puede ser por el tiempo de degradación aplicado. Además, la composición del suelo donde se encuentra el contaminante pudo haber sido otro factor importante, ya que, al centrarse en un solo tipo de hidrocarburo específico, como los HAP, se pudo lograr un mejor enfoque en la degradación. Esto permitió una optimización más precisa de las condiciones que favorecen el crecimiento de las bacterias. Asimismo, la combinación de las cepas *Pseudomonas* y *Bacillus* pudo haber tenido un efecto sinérgico, al mejorar la degradación de contaminantes y los mecanismos de acción con mayor efectividad (Zhou *et al.*, 2024). Por otro lado, Naaz *et al.* (2024) plantearon el mecanismo de celdas de combustible microbianas (MFC) para degradar aceite de motor, con las cepas *S. aureus* y *Pseudomonas aeruginosa*, y lograron un 93 % de remoción en 7 días. Esto puede deberse a que ambas bacterias, al trabajar juntas, logran producir una gran cantidad de biosurfactantes, lo que facilita la biodisponibilidad del aceite de motor (Agüero *et al.*, 2023); sin embargo, es un mecanismo que necesita ser investigado a mayor profundidad para medir su eficiencia.

Absorción, oxidación química e inmovilización

El mecanismo de adsorción demostró ser extremadamente eficiente al utilizar *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas stutzeri* y *Acinetobacter baumannii*, y lograron una eficiencia del 70 % en la remoción de petróleo crudo, diésel C32 y C34, en solo 5 días (Elumalai *et al.*, 2021). Este método es notable por su rapidez en la

eliminación de hidrocarburos, lo que lo hace ideal para aplicaciones cuyo factor crítico es el tiempo.

En el caso de la oxidación química, según la tabla 6, se emplearon proteobacterias y actinobacterias para oxidar químicamente el petróleo crudo, y alcanzaron una eficiencia del 68,30 % en la degradación de petróleo en 141 días (Zou *et al.*, 2024). Aunque el tiempo de degradación es relativamente largo, la alta eficiencia sugiere que este método es adecuado para la degradación completa de contaminantes en suelos.

Finalmente, para el mecanismo de inmovilización, se utilizó *Pseudomonas pseudoalcaligenes*, *Pseudomonas guguanensis*, *Acinetobacter venetianus* y *Sphingobacterium pakistanense* inmovilizadas para degradar HTP, HST y HAP, y se logró una degradación de 48,64 %, 59,83 % y 56,29 %, respectivamente. La inmovilización ayudó a mantener activas a las bacterias en el suelo contaminado y mejoraron la efectividad del tratamiento (Gou *et al.*, 2022).

Bioestimulación

La tabla 7 presenta 20 artículos que mencionan los mecanismos de acción de las bacterias para eliminar hidrocarburos del suelo, así como la eficiencia de degradación al usar estimulantes que activan y potencian dichos mecanismos. Tras la revisión se encontró que generalmente los autores incluyen el petróleo, los hidrocarburos totales de petróleo (HTP) y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) para su análisis. Los porcentajes de eficiencia varían desde el 8 % hasta el 92,5 %.

Tabla 7. Bioestimulación, mecanismo de acción y eficiencia en la remoción de hidrocarburos del suelo

Mecanismo de acción	Tipo de hidrocarburo	Bacteria	Estimulante	Eficiencia (%)	Tiempo (días)	Referencia
Absorción	HAP	Bacterias y arqueas	Agente electrodonador (EA)	70	8	Gou <i>et al.</i> , 2024
	HTP	<i>Enterococcus</i> <i>Vagococcus</i> <i>Sphingomonas</i> <i>Proteus</i>	Soforolípido (SL)	58,80	30	Feng <i>et al.</i> , 2021
Agitación	Gasoil	<i>Acinetobacter sp.</i> <i>Gordonia sp.</i> <i>Biosurfactant-producing strain</i>	Nutrientes oleófilos naturales y un fertilizante oleófilo artificial	73	11	Luo <i>et al.</i> , 2024
Aislamiento	Petróleo crudo	<i>Streptomyces</i>	Sideróforos, 1-aminociclopropano-1-carboxilato desaminasa	98	7	Baoune <i>et al.</i> , 2018
	Aceite de motor	<i>Bacillus licheniformis</i>	BS1*, BS2*, BS3*	80	90	Parrales <i>et al.</i> , 2022
	Petróleo	<i>B. cereus</i>	Agar nutritivo	75	4	Hussain <i>et al.</i> , 2024
	HTP	<i>Bacillus sp.</i> Z-13	Cloruro de amonio (NH ₄ Cl) Nitrito de sodio (NaNO ₂) Nitrato de sodio (NaNO ₃)	NH ₄ Cl: 59 NaNO ₂ : 42 NaNO ₃ : 46	35	Zhang <i>et al.</i> , 2023
	HAP	Proteobacteria Firmicutes Actinobacteria Bacteroidetes	Estiércol	49	305	Ubanii <i>et al.</i> , 2022



	Queroseno y derivados de petróleo	<i>Pseudomonas plecoglossicida</i> <i>Pseudomonas taiwanensis</i> ,	Carbono y extracto de levadura	8	7 y 14	Ordoñez et al., 2019
Encapsulación	Hidrocarburos totales del rango C10-C40	<i>Parvibaculum</i> , <i>Arenimonas</i> y géneros no clasificados de <i>Actinobacteria</i>	Metil-β-ciclodextrina (Cdx) y harina de carne y huesos (MBM)	90	84	Cavazzoli et al. (2023)
Inmovilización	HTP	Bacterias lácticas	Biosurfactantes	92,5	60	Ugaz-Hoyos et al., 2020
	HAP	<i>Stenotrophomonas maltophilia</i> (SPM)	Ácido fúlvico y biochar (FA/WS)	55,23	7	Zhang et al., 2024
	Petróleo	<i>Pseudomona</i>	Ramnolípidos	91,4	30	Barrios San Martín et al., 2022
		<i>Paenalcáligenes Lactobacillus</i>	Kenaf-core	71,06	90	Omenna et al., 2024
Inoculación	Diésel	<i>Aeromonas hydrophila</i> RP1	Biosurfactante de naturaleza glucolipopeptídica	77,33	7	Pandey et al., 2022
		<i>Flavobacterium sp.</i>	Adición de nutrientes (SMM - Synthetic Mineral Medium)	73,18	8	Martínez et al., 2017
	HTP	<i>Aeromonas hydrophila</i> YL17 <i>Shewanella putrefaciens</i> Pdp11	Biochar inmovilizado	67	60	Saeed et al., 2023
Técnicas de PCR cuantitativa en tiempo real (qPCR) y ARN ribosomal 16S (16S rRNA)	HAP	<i>Proteobacteria</i> <i>Bacteroidota</i> <i>Actinobacteriota</i>	Rhamnolípidos	20,49	82	Chen et al., 2024
	HTP	<i>Rubrobacter</i> <i>Solirubrobacter</i> <i>Gaiella</i>	KNO ₃ y Peptona	KNO ₃ : 44,74 Peptona: 44,39	60	Wang et al., 2023.

*BS1 y *BS2: Bioestimulantes obtenidos por fermentación con la bacteria *Bacillus licheniformis*; y *BS3: Bioestimulante obtenido por hidrólisis enzimática de los lodos depuradores

La cepa bacteriana Z-13 fue estimulada con diferentes fuentes de nitrógeno, como cloruro de amonio (NH₄Cl), nitrito de sodio (NaNO₂) y nitrato de sodio (NaNO₃), para evaluar su capacidad de degradar hidrocarburos de petróleo (TPH). Los TPH disminuyeron a 890 mg/kg, 626 mg/kg y 685 mg/kg, respectivamente, con tasas de degradación del 59 %, 42 % y 46 %. Entre estas fuentes, el NH₄Cl mostró el mejor efecto en la estimulación de la degradación de TPH. En comparación con la eficiencia de la cepa sin estimulación, que logró un 34 % de degradación, la tasa aumentó en un 25 % cuando se usó NH₄Cl (Zhang et al., 2023). Esto se debe a que la cepa Z-13 prefiere el NH₄⁺-N como fuente de nitrógeno, lo que promueve interacciones simbióticas y estimula las vías metabólicas para degradar los TPH. Por lo tanto, elegir adecuadamente las fuentes de nitrógeno puede mejorar la biodegradación de contaminantes ambientales.

Además, el estudio de Cavazzoli et al. (2023) obtuvo una tasa de degradación del 90 % en 84 días para el mismo contaminante, con el uso de metil-β-ciclodextrina (Cdx) y harina de carne y huesos (MBM) como aditivos para mejorar la biodegradación de hidrocarburos en suelos. Se encontró que la adición de Cdx aumentaba la bioaccesibilidad de compuestos orgánicos recalcitrantes, ya que reactivó los procesos de biodegradación y modificó la composición de la comunidad bacteriana del suelo. Por su parte, la adición de MBM no siempre afecta la

comunidad bacteriana, pero proporciona nutrientes para mejorar la calidad y fertilidad del suelo. Por ello, la adición de insumos naturales y amigables con el medioambiente como el Cdx y MBM es una alternativa viable para la disminución de hidrocarburos.

Del mismo modo, la investigación de Saeed et al. (2023) logró una eficiencia en la reducción del HTP de 67 % en 60 días, y utilizó el biocarbón como principal componente. Gracias a su gran superficie, porosidad y características microporosas, lo convierten en un sustrato ideal para la adsorción de bacterias y la degradación de contaminantes. Los grupos funcionales alcanos en la superficie del biocarbón facilitan la formación de enlaces covalentes y una fuerte conexión entre las bacterias y el biocarbón. Además, el biocarbón proporciona nutrientes a los microorganismos, lo que favorece su actividad enzimática y la descomposición de hidrocarburos. La gran superficie y textura rugosa del biocarbón también permiten la fijación de biopelículas sintetizadas por los microbios, mejorando bastante la bioadsorción. La adición de biocarbón al suelo contaminado aumenta la respiración microbiana y la descomposición del carbono orgánico, lo que indica una mayor actividad microbiana y biodegradación de contaminantes. Este componente, junto a factores como el suelo y vida microbiana, son grandes aciertos en la eficiencia de degradación de HTP.

Por lo tanto, la adición de matrices naturales y ambientalmente sostenibles puede, por un lado, aumentar la eficiencia de eliminación de hidrocarburos y, posiblemente, inmovilizar contaminantes inorgánicos como el plomo y, por otro lado, proporcionar nutrientes a la comunidad microbiana del suelo, mejorando su calidad y fertilidad.

Conclusiones

La biorremediación de hidrocarburos en suelos mediante bacterias es una estrategia efectiva, sostenible y económicamente viable. Los parámetros fisicoquímicos, como el pH, idealmente entre 6 y 9, y la temperatura, óptima entre 30 °C y 40 °C, son cruciales para maximizar la actividad de bacterias degradadoras, tales como *Pseudomonas sp.* o *Bacillus sp.*, que destacan tanto por su adaptabilidad a estas condiciones como por su alta eficiencia en la degradación de hidrocarburos.

La bioaumentación ha demostrado ser el método más efectivo, ya que involucra la adición de bacterias específicas para aumentar la velocidad de degradación, al lograr tasas que pueden alcanzar más del 90 % en condiciones favorables. Por otro lado, aunque la bioestimulación también es efectiva y más económica, no siempre alcanza los niveles de eficiencia de la bioaumentación.

Es esencial que futuras investigaciones se centren en optimizar estos métodos asegurando resultados eficientes en escenarios reales. La variabilidad en el pH y las temperaturas óptimas de diferentes bacterias subraya la importancia de estudiar más parámetros fisicoquímicos y adaptar las estrategias de biorremediación según las condiciones locales del sitio contaminado. La

implementación efectiva de estas estrategias no solo contribuirá a mitigar la contaminación por hidrocarburos, sino también a mejorar la salud de los ecosistemas y la calidad de vida de las comunidades afectadas.

Contribución de autoría

DO: conceptualización y redacción del borrador original

DR: redacción del borrador original

KP: metodología y redacción del borrador original

MS: redacción del borrador original

YV-O: conceptualización, supervisión y redacción del borrador original

Fuente de financiamiento

Autofinanciado.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial a los estudiantes del décimo ciclo de la carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Científica del Sur que participaron en la selección de los artículos científicos analizados en este estudio; gracias a Mariela Aquino, Luis Arismendiz, María Bardales, Antuanette Armas, María Cerna, Corayma Guevara, Cristhian Fernández, Garreta Joaquín, Nathaly Pérez, Pisconte Mayra, Joyce Malca y Micaela Ubillús.

Referencias bibliográficas

- Abena, M. T. B., Li, T., Shah, M. N. y Zhong, W. (2019).** «Biodegradation of total petroleum hydrocarbons (TPH) in highly contaminated soils by natural attenuation and bioaugmentation». *Chemosphere*, 234, pp. 864-874. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.111>
- Abubakar, A., Abioye, O., Aransiola, S., Maddela, N. R. y Prasad, R. (2024).** «Crude oil biodegradation potential of lipase produced by *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa* isolated from hydrocarbon contaminated soil». *Environmental Chemistry And Ecotoxicology*, 6, pp. 26-32. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.12.001>
- Ajona, M. y Vasanthi, P. (2021).** «Bio-remediation of crude oil contaminated soil using recombinant native microbial strain». *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101635. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101635>
- Al-Hawash, A. B., Alkooranee, J. T., Abbood, H. A., Zhang, J., Sun, J., Zhang, X. y Ma, F. (2018).** «Isolation and characterization of two crude oil-degrading fungi strains from Rumaila oil field, Iraq». *Biotechnology Reports*, 17, pp. 104-109. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.btre.2017.12.006>
- 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*, 28, e00543. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00543>
- Al-Marri, S., Eldos, H., Ashfaq, M., Saeed, S., Skariah, S., Varghese, L., Mohamoud, Y., Sultan, A. y Raja, M. (2023).** «Isolation, identification, and screening of biosurfactant-producing and hydrocarbon-degrading bacteria from oil and gas industrial waste». *Biotechnology Reports*, 39, e00804. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.btre.2023.e00804>
- Alsayegh, S. Y., Al-Ghouti, M. A. y Zouari, N. (2021).** «Study of bacterial interactions in reconstituted hydrocarbon-degrading bacterial consortia from a local collection, for the bioremediation of weathered oily-soils». *Biotechnology Reports*, 29, e00598. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.btre.2021.e00598>
- Al-Thukair, A., Malik, K. y Nzila, A. (2020).** «Biodegradation of selected hydrocarbons by novel bacterial strains isolated from contaminated Arabian Gulf sediment». *Scientific Reports*, 10(1). Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78733-0>
- Ambaye, T. G., Chebbi, A., Formicola, F., Rosatelli, A., Prasad, S., Gomez, F. H., Scaffoni, S., Franzetti, A. y Vaccari, M. (2022).** «Ex-situ bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil using mixed stimulants: Response and dynamics of bacterial community and phytotoxicity». *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6), 108814. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108814>
- Ameen, F. y Al-Homaidan, A. A. (2024).** «Combined impacts of bioaugmentation and vermiremediation on crude oil-contaminated soil: Mitigating strategies for prospective environmental management». *Emerging Contaminants*, 10(2), 100302. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100302>
- Anjos, N. A. dos, Lima, S. D. de, Rothebarth, A. V. de P., Lima, Z. M. de, Caixeta, D. S. y Morais, E. B. de. (2018).** «Bioremediation of diesel/biodiesel contaminated sandy soil in microcosm: evaluation of fungal bioaugmentation and natural attenuation». *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, 40(1), e39468. Disponible en: <https://doi.org/10.4025/actasciobiols.v40i1.39468>
- Araujo, J., Yegres, F., Barreto, G., Antequera, A. Angel, Depool, B., y Rojas, Y. (2016).** «Biocatalizadores fúngicos hidrocarbonoclasticos del género *Aspergillus* para la descontaminación de agua con Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (HPAs)». *Revista Cubana de Química*, 28(2), pp. 703-735. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212016000200013&lng=es&tlng=es
- Baoune, H., Ould El Hadj-Khelil, A., Pucci, G., Sineli, P., Loucif, L. y Polti, M. A. (2018).** «Petroleum degradation by endophytic *Streptomyces* spp. isolated from plants grown in contaminated soil of southern Algeria». *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147, pp. 602-609. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.013>
- Barrios San Martín, Y., Toledo León, H., Abalos Rodríguez, A., Acosta Díaz, S. y Sánchez López, M. I. (2022).** «Aplicación de ramnolípidos de *Pseudomonas* sp. Y3-B1A en la biodegradación de hidrocarburos a diferentes escalas». *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36. Disponible en: <https://doi.org/10.20937/rica.54389>
- Benites, A. M. J. y Méndez, J. F. R. (2023).** «Biorremediación de agua y suelo contaminados por residuos orgánicos de petróleo en Iquitos». *Ciencia Latina*, 7(5), pp. 7936-7968. Disponible en: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i5.8376
- Brzeszcz, J., Steliga, T., Ryszka, P., Kaszycki, P. y Kapusta, P. (2024).** «Bacteria degrading both n-alkanes and aromatic hydrocarbons are prevalent in soils». *Environmental Science and Pollution Research International*, 31(4), pp. 5668-5683. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31405-8>
- Burbano, D. E. O., Medina, C. A. A., Tamayo, A. E., Lasprilla, L. M. P. y Benítez-Campo, N. (2019).** «Biodegradación de hidrocarburos alifáticos saturados por microorganismos aislados de suelo contaminado con derivados del petróleo». *Revista de Ciencias*, 22(2). Disponible en: <https://doi.org/10.25100/rc.v22i2.7917>
- Castillo, R. T., Calero, F. J. M., La Torre, M. C., Ponce, J. N. F. y Matonnier, E. L. M. (2020).** «Aislamiento de bacterias con potencial biorremediador y análisis de comunidades bacterianas de zona impactada por derrame de petróleo en Condorcanqui (Amazonas, Perú)». *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 22(3), pp. 215-225. Disponible en: <https://doi.org/10.18271/ria.2020.656>
- Cavazzoli, S., Squartini, A., Sinkkonen, A., Romantschuk, M., Rantalainen, A. L., Selonen, V. y Roslund, M. I. (2023).** «Nutritional additives dominance in driving the bacterial communities succession and bioremediation of hydrocarbon and heavy metal contaminated soil microcosms». *Microbiological Research*, 270, 127343. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127343>
- Chaudhary, T., Dixit, M., Gera, R., Shukla, A. K., Prakash, A., Gupta, G., y Shukla, P. (2020).** «Techniques for improving formulations of bioinoculants». *3 Biotech*, 10(5). Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02182-9>
- Chen, T., Dong, Y., Huang, W. y Ma, Y. (2024).** «Dynamics of microbial community and functional genes during bioremediation of PAHs-contaminated soil by two biostimulants». *Biochemical Engineering Journal*, 208, 109356. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2024.109356>
- Chen, T., Zhang, Y. y Dong, Y. (2024).** «Bioremediation experiments and dynamic model of petroleum hydrocarbon contaminated soil». *Journal of Environmental Management*, 365, 121247. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121247>
- Chen, W., Teng, Y., Ren, W., Luo, Y. y Yu, Y. (2022).** «A highly effective polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading bacterium, *Paracoccus* sp. HPD-2, shows opposite remediation potential in two soil types». *Pedosphere*, 32(5), pp. 673-685. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.06.012>

- Christopher, J. M., Sridharan, R., Somasundaram, S. y Ganesan, S. (2021).** «Bioremediation of aromatic hydrocarbons contaminated soil from industrial site using surface modified amino acid enhanced biosurfactant». *Environmental Pollution*, 289, 117917. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117917>
- Chuah, L. F., Chew, K. W., Bokhari, A., Mubashir, M. y Show, P. L. (2022).** «Biodegradation of crude oil in seawater by using a consortium of symbiotic bacteria». *Environmental Research*, 213, 113721. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113721>
- Chuah, L. F., Nawaz, A., Dailin, D. J., Oloruntobi, O., Habila, M. A., Tong, W. Y. y Misson, M. (2023).** «Investigating the crude oil biodegradation performance in bioreactor by using a consortium of symbiotic bacteria». *Chemosphere*, 337, 139293. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139293>
- Costa, A. S., Romão, L. P. C., Araújo, B. R., Lucas, S. C. O., Maciel, S. T. A., Wisniewski, A. y Alexandre, M. R. (2012).** «Environmental strategies to remove volatile aromatic fractions (BTEX) from petroleum industry wastewater using biomass». *Bioresource Technology*, 105, pp. 31-39. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096085241101707X>
- Curriel-Alegre, S., Ali, H., Rad, C., Velasco-Arroyo, B., Rumbo, C., Rivilla, R., Durán, D., Redondo-Nieto, M., Eduard Borràs, Molognoni, D., Martín-Castellote, S., Juez, B. y Barros, R. (2024).** «Bioaugmentation and vermicompost facilitated the hydrocarbon bioremediation: scaling up from lab to field for petroleum-contaminated soils». *Environmental Science and Pollution Research International*, 32(2). Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32916-8>
- Dai, X., Lv, J., Zhang, Z. y Wang, H. (2023).** «Bioremediation of heavy oil-contaminated intertidal zones using slow-release nutrients and rhamnolipid biosurfactants». *Journal Of Environmental Chemical Engineering*, 11(2), 109323. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109323>
- Deng, L., Ren, Y., Wei, C. y Wang, J. (2021).** «Biodegradation of pyrene by a novel strain of *Castellaniella* sp. under denitrifying condition». *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 104970. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104970>
- Deng, Y. D., Zhang, W. H., Zuo, Z. H., Zhang, H., Xu, J., Gao, J. J., Wang, B., Li, Z. J., Fu, X. Y., Wang, L. J., Wang, Y., Tian, Y. S., Peng, R. H. y Yao, Q. H. (2024).** «The complete degradation of 1,2-dichloroethane in *Escherichia coli* by metabolic engineering». *Journal of Hazardous Materials*, 472, 134476. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134476>
- Dike, C. C., Batra, A. R., Khudur, L. S., Nahar, K. y Ball, A. S. (2024).** «Effect of the application of *Ochrobactrum* sp.-Immobilised biochar on the remediation of diesel-contaminated soil». *Toxics*, 12(4), 234. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/toxics12040234>
- Ehiosun, K. I., Godin, S., Vargas, V., Preud'homme, H., Grimaud, R. y Lobinski, R. (2023).** «Biodegradation of saturate fraction of crude oil and production of signature carboxylic acids». *Chemosphere*, 339, 139773. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139773>
- Ejaz, M., Zhao, B., Wang, X., Bashir, S., Haider, F. U., Aslam, Z., Khan, M. I., Shabaan, M., Naveed, M. y Mustafa, A. (2021).** «Isolation and characterization of oil-degrading *Enterobacter* sp. from naturally hydrocarbon-contaminated soils and their potential use against the bioremediation of crude oil». *Applied Sciences*, 11(8), 3504. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app11083504>
- Elgazali, A., Althalb, H., Elmusrati, I., Ahmed, H. M. y Banat, I. M. (2023).** «Remediation approaches to reduce hydrocarbon contamination in petroleum-polluted soil». *Microorganisms*, 11(10), pp. 2577-2577. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/microorganisms11102577>
- Elumalai, P., Parthipan, P., Huang, M., Muthukumar, B., Cheng, L., Govarthanan, M. y Rajasekar, A. (2021).** «Enhanced biodegradation of hydrophobic organic pollutants by the bacterial consortium: Impact of enzymes and biosurfactants». *Environmental Pollution*, 289, 117956. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117956>
- Feizi, R., Jorfi, S. y Takdastan, A. (2020).** «Bioremediation of phenanthrene-polluted soil using *Bacillus kochii* AHV-KH14 as a halo-tolerant strain isolated from compost». *Environmental Health Engineering and Management*, 7(1), pp. 23-30. Disponible en: <https://doi.org/10.34172/ehem.2020.04>
- 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*, 273, 116476. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116476>
- Ghorbannezhad, H., Moghimi, H. y Dastgheib, S. M. M. (2021).** «Evaluation of pyrene and tetracosane degradation by mixed-cultures of fungi and bacteria». *Journal of Hazardous Materials*, 416, 126202. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126202>
- Gou, Y., Song, Y., Li, P., Wei, W., Luo, N. y Wang, H. (2024).** «Study on the accelerated biodegradation of PAHs in subsurface soil via coupled low-temperature thermally treatment and electron acceptor stimulation based on metagenomic sequencing». *Journal of Hazardous Materials*, 465, 133265. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133265>
- Guo, S., Liu, X. y Tang, J. (2022).** «Enhanced degradation of petroleum hydrocarbons by immobilizing multiple bacteria on wheat bran biochar and its effect on greenhouse gas emission in saline-alkali soil». *Chemosphere*, 286, 131663. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131663>
- Hadibarata, T., Kristanti, R. A., Bilal, M., Al-Mohaimed, A. M., Chen, T. y Lam, M. K. (2022).** «Microbial degradation and transformation of benzo[a]pyrene by using a white-rot fungus *Pleurotus eryngii* F032». *Chemosphere*, 307, 136014. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136014>
- Haleyur, N., Shahsavari, E., Jain, S. S., Koshlaf, E., Ravindran, V. B., Morrison, P. D., Osborn, A. M. y Ball, A. S. (2019).** «Influence of bioaugmentation and biostimulation on PAH degradation in aged contaminated soils: Response and dynamics of the bacterial community». *Journal of Environmental Management*, 238, pp. 49-58. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.115>
- Helmy, Q. y Kardena, E. (2024).** «Enhancing field-scale bioremediation of weathered petroleum oil-contaminated soil with biocompost as a bulking agent». *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 100735. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100735>
- Hentati, D., Cheffi, M., Hadrich, F., Makhloufi, N., Rabanal, F., Manresa, A., Sayadi, S. y Chamkha, M. (2021).** «Investigation of halotolerant marine *Staphylococcus* sp. CO100, as a promising hydrocarbon-degrading and biosurfactant-producing bacterium, under saline conditions». *Journal of Environmental Management*, 277, 111480. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111480>
- Heras-Martínez, H. M., Muñoz-Castellanos, L. N., Bugarín, A., Ramos-Sánchez, V. H., Ochoa, I. S. y Chávez-Flores, D. (2022).** «Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by *Acremonium* sp. activity». *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 38, pp. 261-269. Disponible en: <https://doi.org/10.20937/rica.54462>



- Hossain, M. F., Akter, M. A., Sohan, M. S. R., Sultana, 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*, 29(1), pp. 211-216. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.08.069>
- Hussain, N., Muccee, F., Hammad, M., Mohiuddin, F., Bunny, S. M. y Shahab, A. (2024).** «Molecular and metabolic characterization of petroleum hydrocarbons degrading *Bacillus cereus*». *Polish Journal of Microbiology*, 73(1), pp. 107-120. Disponible en: <https://doi.org/10.33073/pjm-2024-012>
- Imam, A., Suman, S. K., Singh, P., Vempatapu, B. P., Tripathi, D., Ray, A. y Kanaujia, P. K. (2023).** «Proteomic response of *Pseudomonas aeruginosa* IIPIS-8 during rapid and efficient degradation of naphthalene». *Environmental Research*, 216, 114511. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114511>
- Kadri, T., Magdouli, S., Rouissi, T. y Brar, S. K. (2018).** «Ex-situ biodegradation of petroleum hydrocarbons using *Alcanivorax borkumensis* enzymes». *Biochemical Engineering Journal*, 132, pp. 279-287. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.01.014>
- Kansour, M. K. y Al-Mailem, D. M. (2023).** «Bioremediation of two oil-contaminated Kuwaiti hyper-saline soils by cross bioaugmentation and the role of indigenous halophilic/halotolerant hydrocarbonoclastic bacteria». *Environmental Technology & Innovation*, 32, 103259. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103259>
- Khalil, M. H., Soltan, Y. A., Khadiga, G. A., Elmahdy, A., Sallam, S. M. A., Zommara, M. A., Rabee, A. E. y Khattab, I. M. (2023).** «Comparison of dietary supplementation of sodium selenite and nanostructured selenium on nutrient digestibility, blood metabolites, antioxidant status, milk production, and lamb performance of Barki ewes». *Animal Feed Science and Technology*, 297, 115592. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2023.115592>
- Khoshkholgh Sima, N. A., Ebadi, A., Reiahisamani, N., y Rasekh, B. (2019).** «Bio-based remediation of petroleum-contaminated saline soils: Challenges, the current state-of-the-art and future prospects». *Journal of Environmental Management*, 250, 109476. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109476>
- Koolivand, A., Abtahi, H., Parhamfar, M., Saeedi, R., Coulon, F., Kumar, V., Villaseñor, J., Sartaj, M., Najarian, N., Shahsavari, M., Seyedmoradi, P., Rahimi, L. y Bagheri, F. (2022).** «The effect of petroleum hydrocarbons concentration on competition between oil-degrading bacteria and indigenous compost microorganisms in petroleum sludge bioremediation». *Environmental Technology & Innovation*, 26, 102319. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102319>
- Koshlaf, E. y Ball, A. (2017).** «Soil bioremediation approaches for petroleum hydrocarbon polluted environments». *AIMS Microbiology*, 3(1), pp. 25-49. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31294147/>
- Kumari, B. y Chandra, R. (2023).** «Benzo [a] pyrene degradation from hydrocarbon-contaminated soil and their degrading metabolites by *Stutzerimonas stutzeri* (LOBP-19A)». *Waste Management Bulletin*, 1(3), pp. 115-127. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.07.006>
- ławniczak, L., Woźniak-Karczewska, M., Loibner, A. P., Heipieper, H. J. y Chrzanowski, Ł. (2020).** «Microbial degradation of hydrocarbons—Basic principles for bioremediation: A review». *Molecules*, 25(4), pp. 856-856. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/molecules25040856>
- Lee, K. C., Archer, S. D., Kansour, M. K. y Al-Mailem, D. M. (2024).** «Bioremediation of oily hypersaline soil via autochthonous bioaugmentation with halophilic bacteria and archaea». *Science of The Total Environment*, 922, 171279. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171279>
- Lee, D. W., Lee, H., Kwon, B.-O., Khim, J. S., Yim, U. H., Kim, B. S., y Kim, J.-J. (2018).** «Biosurfactant-assisted bioremediation of crude oil by indigenous bacteria isolated from Taean beach sediment». *Environmental Pollution*, 241, pp. 635-643. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.05.070>
- Leflay, H., Okurowska, K., Pandhal, J. y Brown, S. (2020).** «Pathways to economic viability: A pilot scale and techno-economic assessment for algal bioremediation of challenging waste streams». *Environmental Science: Water Research and Technology*, 6(12), pp. 3400-3414. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/d0ew00700e>
- Li, L., Liu, Y., Zhang, Y., Wang, X., Liu, H., Liu, Q., Chen, S. y Zhou, G. (2024).** «Dynamic responses in *Pseudomonas stutzeri* M3 bioaugmentation of crude-oil-contaminated soil: Hydrocarbons, microbial community structures, and functional genes». *Journal Of Environmental Chemical Engineering*, 12(1), 111863. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111863>
- Li, M., Cao, L., Liu, D., Su, T., Cheng, W., Li, G. y Ma, T. (2024).** «Efficient bio-remediation of multiple aromatic hydrocarbons using different types of thermotolerant, ring-cleaving dioxygenases derived from *Aeribacillus pallidus* HB-1». *Bioresource Technology*, 398, 130472. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130472>
- Li, Q., Wang, K., Wu, Q., Tao, Y., Xie, K., Li, J., & Xia, W. (2023).** «Treatment of Oil-Polluted Seawater by Modified Biochar Immobilized with Petroleum Degrading Bacteria». En *Lecture notes in civil engineering* (pp. 9-17). Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-981-99-3737-0_2
- Liu, F., Liu, H., Zhu, H., Xie, Y., Zhang, D., Cheng, Y. y Yang, S. (2023).** «Remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated groundwater by biochar-based immobilized bacteria». *Biochemical Engineering Journal*, 197, 108987. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2023.108987>
- Liu, X., He, L., Zhang, X., Kong, D., Chen, Z., Lin, J. y Wang, C. (2022).** «Bioremediation of petroleum-contaminated saline soil by *Acinetobacter baumannii* and *Talaromyces* sp. and functional potential analysis using metagenomic sequencing». *Environmental Pollution*, 311, 119970. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119970>
- Liu, F., Liu, H., Zhu, H., Xie, Y., Zhang, D., Cheng, Y., Zhang, J., Feng, R., y Yang, S. (2023).** «Remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated groundwater by biochar-based immobilized bacteria». *Biochemical Engineering Journal*, 197 Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2023.108987>
- Lopez-Lopez, K. y Mahecha, R. A. L. (2022).** «Aislamiento y caracterización de bacterias endémicas colombianas con capacidad de degradar tolueno». *Revista Colombiana de Biotecnología/Revista Colombiana de Biotecnología*, 24(1), pp. 6-18. Disponible en: <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v24n1.98613>
- Luo, P., Tang, Y., Lu, J., Jiang, L., Huang, Y., Jiang, Q., Chen, X., Qin, T. y Shiels, H. A. (2024).** «Diesel degradation capability and environmental robustness of strain *Pseudomonas aeruginosa* WS02». *Journal of Environmental Management*, 351, 119937. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119937>
- Luo, Q., Wang, Y., Chen, Q., Sun, W. y Zhu, B. (2024).** «Bioremediation of diesel oil polluted seawater by a hydrocarbon-degrading bacterial consortium with oleophilic nutrients». *Regional Studies in Marine Science*, 71, 103412. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103412>
- Ma, L., Li, Z., Qiao, M., Liu, J., Jia, B., Yang, B. y Liu, Y. (2023).** «Enhancing electrokinetic remediation of TPH-Cr(VI) co-contaminated soils with biochar-immobilized bacteria as biological permeable reactive barriers». *Chemical Engineering Journal*, 478, 147301. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.147301>

- Ma, Y., Zhu, H., Liu, H., Xie, Y., Zhang, D., Cheng, Y., Feng, R., Zhang, J. y Yang, S. (2023). «Degradation characteristics of oil-degrading bacteria and its study of petroleum hydrocarbon metabolites». *Clean*, 52(2). Disponible en: <https://doi.org/10.1002/clean.202300163>
- Machado, T. S., Decesaro, A., Cappellaro, A. C., Machado, B. S., van Schaik Reginato, K., Reinehr, C. O., Thomé, A. y Colla, L. M. (2020). «Effects of homemade biosurfactant from *Bacillus methylotrophicus* on bioremediation efficiency of a clay soil contaminated with diesel oil». *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 201, 110798. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110798>
- Maeda, A. H., Nishi, S., Hatada, Y., Ohta, Y., Misaka, K., Kunihiro, M., Mori, J. F. y Kanaly, R. A. (2020). «Chemical and genomic analyses of polycyclic aromatic hydrocarbon biodegradation in *Sphingobium barthi* KK22 reveals divergent pathways in soil sphingomonads». *International Biodeterioration & Biodegradation*, 151, 104993. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2020.104993>
- Mandree, P., Masika, W., Naicker, J., Moonsamy, G., Ramchuran, S. y Laloo, R. (2021). «Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons from industry contaminated soil using indigenous *Bacillus* spp.». *Processes*, 9(9), 1606. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/pr9091606>
- Martínez-Prado, M. y Soto-Álvarez, C. (2017). «Remoción de hidrocarburos de petróleo de un suelo de baja permeabilidad: biorremediación y electroremediación». *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(3), pp. 955-970. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62053304022>
- Medić, A., Lješević, M., Inui, H., Bešković, V., Kojić, I., Stojanović, K. y Karadžić, I. (2020). «Efficient biodegradation of petroleum n-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons by polyextremophilic *Pseudomonas aeruginosa* strain with multidegradative capacity». *RSC Advances*, 10(24), pp. 14060-14070. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/c9ra10371f>
- Medina, R., Gara, P. M. D., Fernández-González, A. J., Rosso, J. A. y Del Panno, M. T. (2018). «Remediation of a soil chronically contaminated with hydrocarbons through persulfate oxidation and bioremediation». *Science of The Total Environment*, 618, pp. 518-530. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.326>
- Mezzari, M. P., Zimmermann, D. M. H., Corseuil, H. X., y Nogueira, A. V. (2011). «Potential of grasses and rhizosphere bacteria for bioremediation of diesel-contaminated soils». *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35, pp. 2227-2236. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600038>
- Miao, R., Guo, M., Zhao, X., Gong, Z., Jia, C., Li, X. y Zhuang, J. (2020). «Response of soil bacterial communities to polycyclic aromatic hydrocarbons during the phyto-microbial remediation of a contaminated soil». *Chemosphere*, 261, 127779. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127779>
- Morante, L., Canchignia H., Morante, J., Romero, R., Cedeño, A. y Abasolo, F. (2018). «Bacterias con potencialidades para la degradación de hidrocarburos en suelos contaminados de Quevedo, Ecuador». *Revista Cubana de Ciencias Biológicas*, 6(3). Disponible en: <https://revistas.uh.cu/rccb/article/view/1134>
- Muneeswari, R., Iyappan, S., Swathi, K. V., Sudheesh, K. P., Rajesh, T., Sekaran, G. y Ramani, K. (2021). «Genomic characterization of *Enterobacter xiangfangensis* STP-3: Application to real time petroleum oil sludge bioremediation». *Microbiological Research*, 253, 126882. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126882>
- Munzero, J., Kassaza, K., Bazira, J. y Kiwanuka, G. N. (2024). «Bioremediation potential of bacteria isolated from soil in automobile garages and fuel stations in Mbarara City, Southwestern Uganda». *Bioremediation Journal*, 1-13. <https://doi.org/10.1080/10889868.2024.2325444>
- Muralidharan, M., Gayathri, K. V., Kumar, P. S., Preethi, D., Kavitha, R., Rajagopal, R. y Rangasamy, G. (2023). «Mixed polyaromatic hydrocarbon degradation by halotolerant bacterial strains from marine environment and its metabolic pathway». *Environmental Research*, 216, 114464. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114464>
- Naaz, T., Kumari, K., Singh, V., Khan, A., Pandit, S., Priya, K. y Jadhav, D. (2024). «Bioremediation of hydrocarbon by co-culturing of biosurfactant-producing bacteria in microbial fuel cell with Fe₂O₃-modified anode». *Journal of Environmental Management*, 351, 119768. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119768>
- Naaz, T., Kumari, S., Sharma, K., Singh, V., Khan, A. A., Pandit, S., Priya, K. y Jadhav, D. A. (2024). «Bioremediation of hydrocarbon by co-culturing of biosurfactant-producing bacteria in microbial fuel cell with Fe₂O₃-modified anode». *Journal of Environmental Management*, 351, 119768. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119768>
- Nafal, D. H. y Abdulhay, H. S. (2020). «Bioremediation of petroleum polluted soils using Consortium Bacteria». *Iraqi Journal of Science*, 61(5), pp. 961-969. Disponible en: <https://doi.org/10.24996/ij.s.2020.61.5.3>
- Naloka, K., Kuntaveesuk, A., Muangchinda, C., Chavanich, S., Viyakarn, V., Chen, B. y Pinyakong, O. (2024). «*Pseudomonas* and *Pseudarthrobacter* are the key players in synergistic phenanthrene biodegradation at low temperatures». *Scientific Reports*, 14, 11976. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62829-y>
- Nápoles Álvarez, J., Bahín Deroncelé, L., Gutiérrez Rojas, M., Del Toro Álvarez, D. y Abalos Rodríguez, A. (2019). «Degradación de diesel en agua de mar utilizando un consorcio bacteriano». *Tecnología Química*, 39(2). Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852019000200403&lang=es
- Omenna, E. C., Omage, K., Ezaka, E. y Azeke, M. A. (2023). «Tolerance, taxonomic and phylogenetic studies of some bacterial isolates involved in bioremediation of crude oil polluted soil in the southern region of Nigeria». *Heliyon*, 9(4), e15639. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15639>
- Omenna, E. C., Omage, K., Ezaka, E. y Azeke, M. A. (2024). «Bio-augmentation and bio-stimulation with kenaf core enhanced bacterial enzyme activities during bio-degradation of petroleum hydrocarbon in polluted soil». *Scientific Reports*, 14(1). Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50882-y>
- Ordoñez Burbano, D. E., Abella Medina, C. A., Echeverry Tamayo, A., Paz Lasprilla, L. M., y Benítez-Campo, N. (2018). «Biodegradación de hidrocarburos alifáticos saturados por microorganismos aislados de suelo contaminado con derivados del petróleo». *Revista de Ciencias*, 22(2), pp. 33-44. Disponible en: <https://doi.org/10.25100/rc.v22i2.7917>
- Osadebe, A. U., Ougbue, C. J. y Okpokwasili, G. C. (2024). «Biochar and Iron oxide nanoparticle-impregnated alginate beads as adsorbents for enhanced ex situ bioremediation of petroleum-contaminated freshwater». *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 6, pp. 42-50. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.01.002>
- Osman, S. A., Youssif, A. M., Hakim, M. A., Sabry, S. A. y Ghozlan, H. A. (2023). «Biodegradation of paraffin wax using *Bacillus* sp. SASH for quality improvement of crude oil properties». *Petroleum Science and Technology*, 42(10), pp. 1193-1210. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10916466.2023.2183217>
- Pandey, R., Krishnamurthy, B., Obaid, S. A., Ansari, M. J., Batish, D. R. y Singh, H. P. (2024). «Glycolipid biosurfactant production and petroleum hydrocarbon degradation by a new strain of *Citricoccus zhacaiensis*». *Biocatalysis And Agricultural Biotechnology*, 59, 103248. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103248>

- Pandey, R., Krishnamurthy, B., Singh, H. P. y Batish, D. R. (2022).** «Evaluation of a glycolipopeptide biosurfactant from *Aeromonas hydrophila* RP1 for bioremediation and enhanced oil recovery». *Journal of Cleaner Production*, 345, 131098. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131098>
- Parrales, I. G., Macías, P. P., Del Toro Carrillo de Albornoz, M., Rubio, J. P., Moral, M. T., Parrales, I. G., Macías, P. P., Del Toro Carrillo de Albornoz, M., Rubio, J. P. y Moral, M. T. (2022).** «Biorremediación de suelos contaminados con aceite de motor mediante bioestimulantes obtenidos de lodos de depuradora». *Revista de Ciências Agrárias*, 45(4), pp. 657-661 Disponible en: <https://doi.org/10.19084/rca.28751>
- Patiño, O., Robles, H. y León, L. (2021).** «Biodegradación de petróleo por *Bacillus thuringiensis* como alternativa para la recuperación de suelos agrícolas». *Arnaldoa*, 28(2), pp. 339-348. Disponible en: <http://www.scielo.org.pe/pdf/arnal/v28n2/2413-3299-arnal-28-02-339.pdf>
- Perdigão, R., Tomasino, M. P., Magalhães, C., Carvalho, M. F., Almeida, C. M. R. y Mucha, A. P. (2024).** «Microbial response to a port fuel spill: Community dynamics and potential for bioremediation». *Marine Pollution Bulletin*, 203, 116434. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116434>
- Pereira, E., Napp, A. P., Allebrandt, S., Barbosa, R., Reuwsaat, J., Lopes, W., Kmetzsch, L., Staats, C. C., Schrank, A., Dallegrave, A., Peralba, M. D. C. R., Passaglia, L. M., Bento, F. M. y Vainstein, M. H. (2019).** «Biodegradation of aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons in seawater by autochthonous microorganisms». *International Biodeterioration & Biodegradation*, 145, 104789. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.104789>
- Perera, M., Wijayarathna, D., Wijesundera, S., Chinthaka, M., Seneviratne, G., y Jayasena, S. (2019).** «Biofilm mediated synergistic degradation of hexadecane by a naturally formed community comprising *Aspergillus flavus* complex and *Bacillus cereus* group». *BMC Microbiology*, 19, 84. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s12866-019-1460-4>
- 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*, 37, pp. 206-213. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2021.06.004>
- Popoola, L. T., Yusuff, A. S., Adeyi, A. A. y Omotara, O. O. (2022).** «Bioaugmentation and biostimulation of crude oil contaminated soil: Process parameters influence». *South African Journal of Chemical Engineering*, 39, pp. 12-18. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2021.10.003>
- Qin, W., Zhu, Y., Fan, F., Wang, Y., Liu, X., Ding, A. y Dou, J. (2017).** «Biodegradation of benzo(a)pyrene by *Microbacterium* sp. strain under denitrification: Degradation pathway and effects of limiting electron acceptors or carbon source». *Biochemical Engineering Journal*, 121, pp. 131-138. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2017.02.001>
- Rahman, Z., Jagadheeswari, Mohan, A., Tharini, Selvendran, y Priya, S. (2020).** «Electrokinetic remediation: An innovation for heavy metal contamination in the soil environment». *Materials Today Proceedings*, 37, pp.2730-2734. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.541>
- Saeed, M., Ilyas, N., Bibi, F., Jayachandran, K., Dattamudi, S. y Elgorban, A. M. (2022).** «Biodegradation of PAHs by *Bacillus marsiflavi*, genome analysis and its plant growth promoting potential». *Environmental Pollution*, 292, 118343. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118343>
- Saeed, M., Ilyas, N., Bibi, F., Shabir, S., Jayachandran, K., Sayyed, R., Shati, A. A., Alfaifi, M. Y., Show, P. L. y Rizvi, Z. F. (2023).** «Development of novel kinetic model based on microbiome and biochar for in-situ remediation of total petroleum hydrocarbons (TPHs) contaminated soil». *Chemosphere*, 324, 138311. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138311>
- Sforza, E., Pastores, M., Spagni, A. y Bertucco, A. (2018).** «Microalgae-bacteria gas exchange in wastewater: how mixotrophy may reduce the oxygen supply for bacteria». *Environmental Science and Pollution Research*, 25(28), 28004-28014. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2834-0>
- Shirzadian Gilan, R., Parvizi, Y., Pazira, E. y Rejali, F. (2023).** «Remediation capacity of drought-tolerant plants and bacteria in petroleum hydrocarbon-contaminated soil in Iran». *South African Journal of Botany*, 153, pp. 1-10. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.12.014>
- Su, D., Liu, Y., Liu, F., Dong, Y. y Pu, Y. (2024).** «Enhancing polycyclic aromatic hydrocarbon soil remediation in cold climates using immobilized low-temperature-resistant mixed microorganisms». *Science of The Total Environment*, 939, 173414. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173414>
- Sun, J., Shi, S., Zheng, J., Zheng, X., Xu, X., Liu, K., Wei, P., Chen, Q., Liu, F., Zhao, C. y Zhang, X. (2024).** «An immobilized composite microbial material combined with slow release agents enhances oil-contaminated groundwater remediation». *Science of the Total Environment*, 919, 170762. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170762>
- Sun, L., Zhu, G. y Liao, X. (2021).** «Rhizosphere interactions between PAH-degrading bacteria and *Pteris vittata* L. on arsenic and phenanthrene dynamics and transformation». *Chemosphere*, 285, 131415. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131415>
- Tang, J., Lu, X., Sun, Q., y Zhu, W. (2012).** «Aging effect of petroleum hydrocarbons in soil under different attenuation conditions». *Agriculture, Ecosystems & Environment*, pp. 149, 109-117. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.12.020>
- Tang, L., Sun, Y., Lu, W., Chen, X., Mosa, A., Minkina, T., Gao, Y. y Ling, W. (2024).** «A novel remediation strategy of mixed calcium peroxide and degrading bacteria for polycyclic aromatic hydrocarbon contaminated water». *Journal of Hazardous Materials*, 470, 134122. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134122>
- Terrisse, F., Cravo, C., Noel, C., Cagnon, C., Dumbrell, A., McGenity, T. y Duran, R. (2017).** «Variation of oxygenation conditions on a hydrocarbonoclastic microbial community reveals *Alcanivorax* and *Cycloclasticus* ecotypes». *Front Microbiol*, 8. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01549>
- Tripathi, V., Gaur, V. K., Thakur, R. S., Patel, D. K. y Manickam, N. (2023).** «Assessing the half-life and degradation kinetics of aliphatic and aromatic hydrocarbons by bacteria isolated from crude oil contaminated soil». *Chemosphere*, 337, 139264. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139264>
- Ubani, O., Atagana, H. I., Selvarajan, R. y Ogola, H. J. (2022).** «Unravelling the genetic and functional diversity of dominant bacterial communities involved in manure co-composting bioremediation of complex crude oil waste sludge». *Heliyon*, 8(2), e08945. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08945>
- Ugaz-Hoyos, J., Vega-Cruz, H., Iglesias-Osores, S. y Carreño-Farfan, C. (2020).** «Biosurfactantes en la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos». *SciELO Preprints*. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/scielopreprints.642>

- Valdivia-Rivera, S., Herrera-Pool, I., Ayora-Talavera, T., Cuevas-Bernardino, J. C., García-Cruz, U., Pacheco, N. y Lizardi-Jiménez, M. (2024).** «Novel use of agro-industrial waste and residues for bioencapsulation and its application in petroleum hydrocarbons bioremediation». *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 57, 103099. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103099>
- Vale, K. D. V., Soares, D. W. F., Da Silva, A. L. B., Da Silva Abreu, F. o. M., De Oliveira Almeida, J. L. I., Oliveira, M. R. F., Reck, L., Melo, V. M. M., Alves, D. R. y Alves, C. R. (2023).** «Biosurfactant production by isolated bacteria from petroleum industry's effluent targeting bioremediation». *Results In Chemistry*, 6, 101038. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.101038>
- Varjani, S. J. (2017).** «Microbial degradation of petroleum hydrocarbons». *Bioresource Technology*, 223, pp. 277-286. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852416314432>
- Vinothini, C., Sudhakar, S., y Ravikumar, R. (2015).** «Biodegradation of petroleum and crude oil by *Pseudomonas putida* and *Bacillus cereus*». *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 4(1), pp. 318-329. Disponible en: <https://sirptsciencecollege.org/wp-content/uploads/2024/08/C.Vinothini-et-al.pdf>
- Vizúete-García, R. A., Pascual-Barrera, A. E., Taco-Taco, C. W. y Morales-Padilla, M. M. (2020).** «Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos a base de bacterias utilizadas como bioproductos». *Revista Lasallista de Investigación*, 17(1), pp. 177-187. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rlsi/v17n1/1794-4449-rlsi-17-01-177.pdf>
- Wang, W., Gao, Y., Du, J., Zheng, L., Kong, X., Wang, H., Yang, X., Duan, L., Zhao, Q., Liu, Y. y Naidu, R. (2023).** «Dose-effect of nitrogen regulation on the bioremediation of diesel contaminated soil». *Environmental Technology & Innovation*, 32, 103245. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103245>
- Widdel, F. y Rabus, R. (2001).** «Anaerobic biodegradation of saturated and aromatic hydrocarbons». *Current Opinion in Biotechnology*, 12(3), pp. 259-276. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11404104/>
- Wojtowicz, K., Steliga, T., Kapusta, P. y Brzeszcz, J. (2023).** «Oil-contaminated soil remediation with biodegradation by autochthonous microorganisms and phytoremediation by maize (*Zea mays*). *Molecules Annual*, 28(16), pp. 6104-6104. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/molecules28166104>
- Yang, J., Gu, Y., Chen, Z., Song, Y., Sun, F., Liu, J. y Waigi, M. G. (2021).** «Colonization and performance of a pyrene-degrading bacterium *Mycolicibacterium* sp. Pyr9 on root surfaces of white clover». *Chemosphere*, 263, 127918. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127918>
- Yap, H. S., Khalid, F. E., Wong, R. R., Convey, P., Sabri, S., Khalil, K. A., Zulkharnain, A., Merican, F., Shaari, H. y Ahmad, S. A. (2024).** «Diesel-biodegradation and biosurfactant- production by *Janthinobacterium lividum* AQ5-29 and *Pseudomonas fildesensis* AQ5-41 isolated from Antarctic soil». *International Biodeterioration & Biodegradation*, 188, 105731. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2024.105731>
- Yessentayeva, K., Reinhard, A., Berzhanova, R., Mukasheva, T., Urich, T. y Mikolasch, A. (2024).** «Bacterial crude oil and polyaromatic hydrocarbon degraders from Kazakh oil fields as barley growth support». *Applied Microbiology and Biotechnology*, 108(1). Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00253-024-13010-y>
- Yuan, M., Chen, G., Xiao, Y., Qu, Y. y Ren, Y. (2024).** «Physiological effects and potential molecular mechanisms of *Yarrowia lipolytica* extracellular metabolites on trichloroethylene degradation by *Acinetobacter* LT1». *Environmental Research*, 255, 119193. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119193>
- Zeng, J., Wu, R., Peng, T., Li, Q., Wang, Q., Wu, Y., Song, X., y Lin, X. (2023).** «Low-temperature thermally enhanced bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated soil: Effects on fate, toxicity and bacterial communities». *Environmental Pollution*, 335. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122247>
- Zhang, N., Ren, X., Zhou, H., Deng, Z., Zhang, R., Zhou, X., Zhang, C. y Wei, X. (2024).** «Autochthonous bioaugmentation strategies for the successful bioremediation of high-salt petrochemical wastewater using a biosurfactant-producing *Enterobacter cloacae* Z11». *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(3), 112831. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112831>
- Zhang, S., Zhang, M., Han, F., Liu, Z., Zhao, C., Lei, J. y Zhou, W. (2023).** «Enhanced degradation of petroleum in saline soil by nitrogen stimulation and halophilic emulsifying bacteria *Bacillus* sp. Z-13». *Journal of Hazardous Materials*, 459, 132102. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132102>
- Zhang, X., Liu, X., Lin, S., Zhu, X., Zhang, Z., Shen, B. y Zhou, S. (2024).** «Fulvic acid enhancing pyrene biodegradation by immobilized *Stenotrophomonas maltophilia*: Effect and mechanism». *Bioresource Technology*, 130857. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130857>
- Zhang, X., Wu, M., Zhang, T., Gao, H., Ou, Y. y Li, M. (2024).** «Effects of biochar immobilization of *Serratia* sp. F4 OR414381 on bioremediation of petroleum contamination and bacterial community composition in loess soil». *Journal of Hazardous Materials*, 470, 134137. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134137>
- Zhao, S., Li, L., Wang, Y., Liu, Z., Yang, S., Gao, X., Zhang, C. y Yu, A. (2024).** «Remediation of petroleum-contaminated site soil by bioaugmentation with immobilized bacterial pellets stimulated by a controlled-release oxygen composite». *Environmental Pollution*, 356, 124253. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124253>
- Zhou, X., Sun, Y., Wang, T., Tang, L., Ling, W., Mosa, A., Wang, J. y Gao, Y. (2024).** «Remediation potential of an immobilized microbial consortium with corn straw as a carrier in polycyclic aromatic hydrocarbons contaminated soil». *Journal of Hazardous Materials*, 469, 134091. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134091>
- Zhou, X., Zhang, B., Meng, Q. y Li, L. (2024).** «Effects of graphene oxide on endophytic bacteria population characteristics in plants from soils contaminated by polycyclic aromatic hydrocarbons». *Molecules*, 29(10), 2342. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.scp.2019.100177>
- Zou, Y., Hu, Y., Li, S., Huang, X., Cheng, X. y Pan, W. (2024).** «Remediation of crude oil contaminated soil through an integrated biological-chemical-biological strategy». *Science of the Total Environment*, 919, 170756. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170756>

