



HONGOS Y BACTERIAS PARA LA RESTAURACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS CON PETRÓLEO

M. C. Ana Cecilia Alcalá Hernández

Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas

Dr. Benjamín Abraham Ayíl Gutiérrez

CONACYT, Centro de Biotecnología Genómica, Instituto Politécnico Nacional

Dr. José Alberto López Santillán

Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas

Dr. Benigno Estrada Drouaillet

Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas

Dra. Diana Laura Peraza Liñan

Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas

Dr. Wilberth Alfredo Poot Poot

Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas

Abstract

Oil is the most widely used fuel source in the world and is composed of a mixture of hydrocarbons, substances formed primarily by carbon and hydrogen. Despite its importance as an energy resource, its handling poses a significant environmental risk. In Mexico, during 2023, Petróleos Mexicanos (PEMEX) reported 1,211 leak and spill events, representing a 3.8% increase compared to 2022, with the Gulf of Mexico being one of the most affected regions. These incidents can severely disrupt ecosystems by damaging flora, fauna, and the quality of water and soil. To mitigate these impacts, physical, chemical, and biological environmental restoration methods have been developed. Among them, bioremediation stands out because it uses microorganisms, such as bacteria and fungi, capable of naturally degrading hydrocarbons. Although this alternative is more environmentally friendly, it still faces challenges related to its efficiency and the time required for its application.

Key words: bioremediation, hydrocarbons, microorganisms, oil contamination.

Resumen

El petróleo es la fuente de combustible más utilizada en el mundo y está compuesto por una mezcla de hidrocarburos, sustancias formadas principalmente por carbono e hidrógeno. A pesar de su importancia energética, su manejo representa un riesgo ambiental significativo. En México, durante 2023, Petróleos Mexicanos (PEMEX) reportó 1211 eventos de fugas y derrames, un 3.8% más que en 2022, siendo el Golfo de México una de las regiones más afectadas. Estos incidentes pueden alterar gravemente los ecosistemas, dañando la flora, la

fauna, la calidad del agua y del suelo. Para mitigar estos efectos, se han desarrollado métodos físicos, químicos y biológicos de restauración ambiental. Entre ellos, la biorremediación destaca por utilizar microorganismos, como bacterias y hongos, capaces de degradar hidrocarburos de manera natural. Aunque esta alternativa es más amigable con el ambiente, aún enfrenta desafíos relacionados con su eficiencia y tiempo de aplicación.

Palabras clave: biorremediación, hidrocarburos, microorganismos, contaminación con petróleo.

Introducción

El petróleo o crudo es el combustible más utilizado como fuente de energía a nivel mundial. Este es una mezcla compleja de compuestos químicos a base de carbono e hidrogeno, denominados hidrocarburos, los cuales pueden ser de estructura lineal, ramificados, o de estructura cíclica como los aromáticos entre los que se incluyen al benceno, tolueno, xileno y los hidrocarburos aromáticos policíclicos. Además de los hidrocarburos, el crudo contiene metales pesados como el vanadio (V), níquel (Ni) y plomo (Pb), y no metales como azufre (S), y nitrógeno (N), que se han sido relacionados con efectos tóxicos y cancerígenos en humanos y otros organismos.

De acuerdo con datos del programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, existe la posibilidad de que ocurran anualmente más de 1000 derrames, mucho de ellos con consecuencias ecológicas graves. En México en el 2023, PEMEX reportó que el número total de fugas y derrames ascendió a 1,211 eventos, lo que representa un aumento del 3.8% en comparación con los 1,167 eventos

registrados hasta el 2022, siendo el Golfo de México una de las zonas más vulnerables. Esta situación ha impulsado la necesidad de contar con estrategias más efectivas para la restauración de los sitios contaminados.

Cuando el petróleo entra en contacto con el ambiente debido a derrames durante su extracción, refinamiento, almacenamiento o transporte, ocasiona severos daños a los ecosistemas. La contaminación del suelo, cuerpos de agua y aire se traduce en pérdida de biodiversidad, afectación de la salud humana y alteraciones ecológicas a largo plazo. Por ejemplo, se ha reportado que los derrames de petróleo provocan la muerte de aves marinas, peces, mamíferos, así como la destrucción de hábitats naturales y la pérdida de cobertura vegetal.

Para reducir el impacto de la contaminación por petróleo se han desarrollado técnicas para recuperar estos ambientes, categorizándose en física, química y biológicas. Las técnicas físicas, consisten en remover los contaminantes mediante la absorción por bombeo o por el uso de barreras para retirar el petróleo visible, pero la eficiencia de la eliminación del contaminante no es en su totalidad. En las técnicas químicas se usan dispersantes o agentes oxidantes, que aceleran la descomposición del crudo, sin embargo, pueden generar compuestos tóxicos secundarios y su uso excesivo puede alterar el equilibrio ecológico del sitio (Jia-Qi *et al.*, 2020).

Mientras que las técnicas biológicas o biorremediación son una alternativa sostenible, que utiliza microorganismos como bacterias y hongos para degradar los hidrocarburos y son más amigables con el medio ambiente (Peraza-Liñan

et al., 2025). ¿Cómo es posible esto?, esto es debido a que las bacterias son microorganismos que tienen en su genoma y en algunos casos en su ADN extracromosomal (plásmidos) genes que codifican enzimas relacionadas con el metabolismo de los hidrocarburos. La biorremediación ha cobrado relevancia como una estrategia eficaz, económica y amigable con el ambiente, lo que ha motivado el aislamiento, evaluación y selección de microorganismos (hongos y bacterias) con potencial degradativo de hidrocarburos. Asimismo, el potencial de las bacterias y hongos se han mejorado por la combinación de estos para dar lugar a la elaboración de los consorcios microbianos. El alcance de este trabajo es dar a conocer la importancia de los microorganismos en la degradación de hidrocarburos presentes en el petróleo para la recuperación de sitios contaminados.

Degradación de hidrocarburos por hongos y bacterias

Los microorganismos como hongo y bacterias son capaces de utilizar los hidrocarburos del petróleo como fuente de energía. Esto es debido a la capacidad que tiene para sintetizar enzimas especializadas que son codificadas por genes presentes en su genoma o en plásmidos (bacterias), dentro de este grupo de enzimas se encuentran las peroxidasas y las monooxigenasas, alcanohidroxilasas, citocromo P450, deshidrogenasas, epóxido hidrolasas y lacasas etc., las cuales se encargan de romper los enlaces químicos de los hidrocarburos para formar moléculas menos tóxicas como dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y la producción de biomasa. A pesar de que estos microorganismos comparten ciertas características como la síntesis de enzimas intracelulares (actúan dentro

de las células) y extracelulares (actúan fuera de la célula), presentan diferencias en la degradación de hidrocarburos. Por ejemplo, las bacterias producen enzimas que actúan sobre los alcanos y compuestos aromáticos simples, mientras que los hongos producen enzimas más eficientes para degradar hidrocarburos policíclicos aromáticos (Figura 1; Cuadro 1).

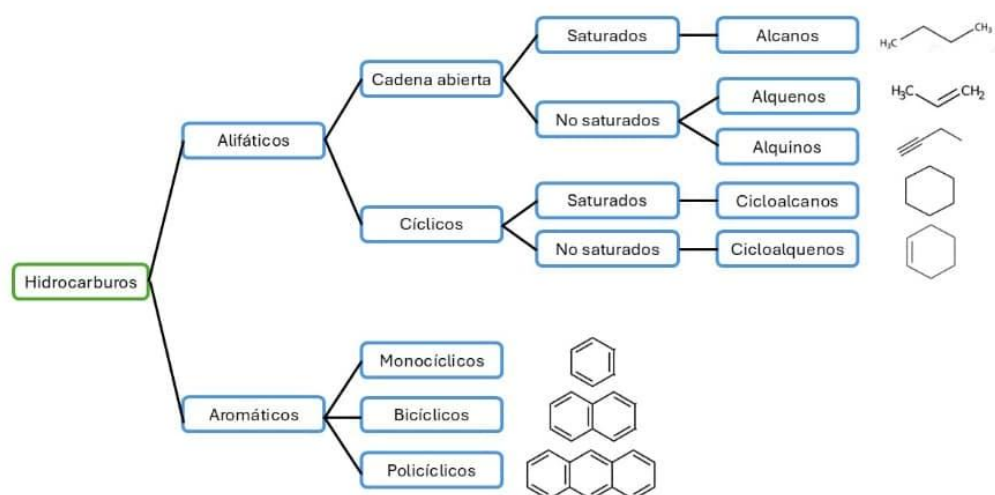


Figura 1: Clasificación de los hidrocarburos de acuerdo con su estructura química.

Género	Tipo microbiano	Compuestos degradados	Referencias
<i>Pseudomonas</i>	Bacteria	Alcanos y compuestos aromáticos	Wu <i>et al.</i> , 2018
<i>Bacillus</i>	Bacteria	Alifáticos lineales y ramificados, cicloalcanos y aromáticos	Nurulhuda <i>et al.</i> , 2018
<i>Acinetobacter</i>	Bacteria	Alifáticos y aromáticos	Bao <i>et al.</i> , 2013
<i>Penicillium</i>	Hongo	Alifáticos, aromáticos e hidrocarburos policíclicos aromáticos	Wolski, 2022
<i>Aspergillus</i>	Hongo	Alifáticos, aromáticos e hidrocarburos policíclicos aromáticos	Al-Dossary <i>et al.</i> , 2020
<i>Fusarium</i>	Hongo	Alifáticos, aromáticos e hidrocarburos policíclicos aromáticos	Barnes <i>et al.</i> , 2023

Cuadro 1: Hongo y bacterias que degradan hidrocarburos del petróleo.

Una de las rutas más estudiadas en bacterias es la degradación de naftaleno por *Pseudomonas* sp., esta vía está formada por genes del plásmido pNAH7, que codifican para las enzimas naftaleno dioxigenasa, enzima encargada de introducir dos átomos de oxígeno en el anillo aromático para formar cis-dihidrodiol de naftaleno. Luego, mediante una serie de reacciones

catalizadas por las deshidrogenasas y dioxigenasas, el compuesto es convertido en salicilaldehído y posteriormente en catecol, que puede ser degradado por la escisión del anillo. Esto permite que los productos finales como piruvato o acetil-CoA entren al ciclo de Krebs, integrando el carbono del contaminante al metabolismo celular (Figura 2).

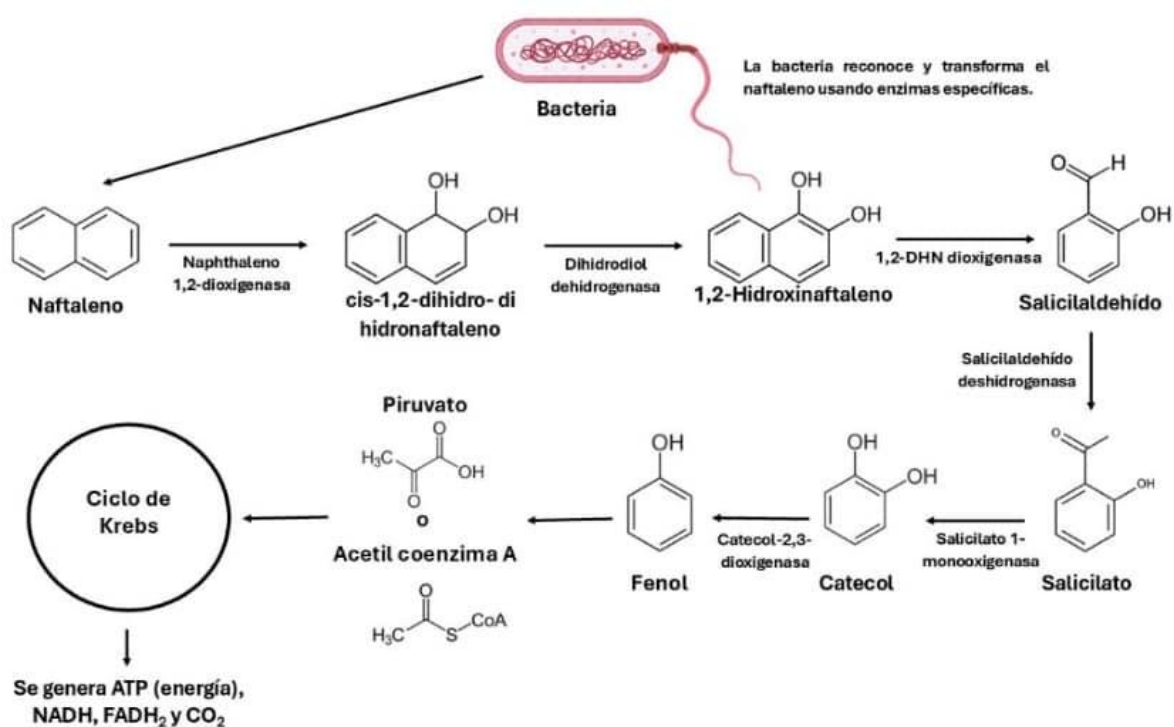


Figura 2: Ruta metabólica de degradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos por *Pseudomonas* sp.

En el caso de los hongos filamentosos como *Phanerochaete chrysosporium*, la degradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos involucra enzimas extracelulares como lignina peroxidasa, manganeso peroxidasa y lacasa, codificadas en su genoma.

Estas enzimas permiten romper enlaces difíciles de oxidar y transformar compuestos tóxicos en moléculas más sencillas como quinonas, ftalatos y finalmente CO₂ (Figura 3).

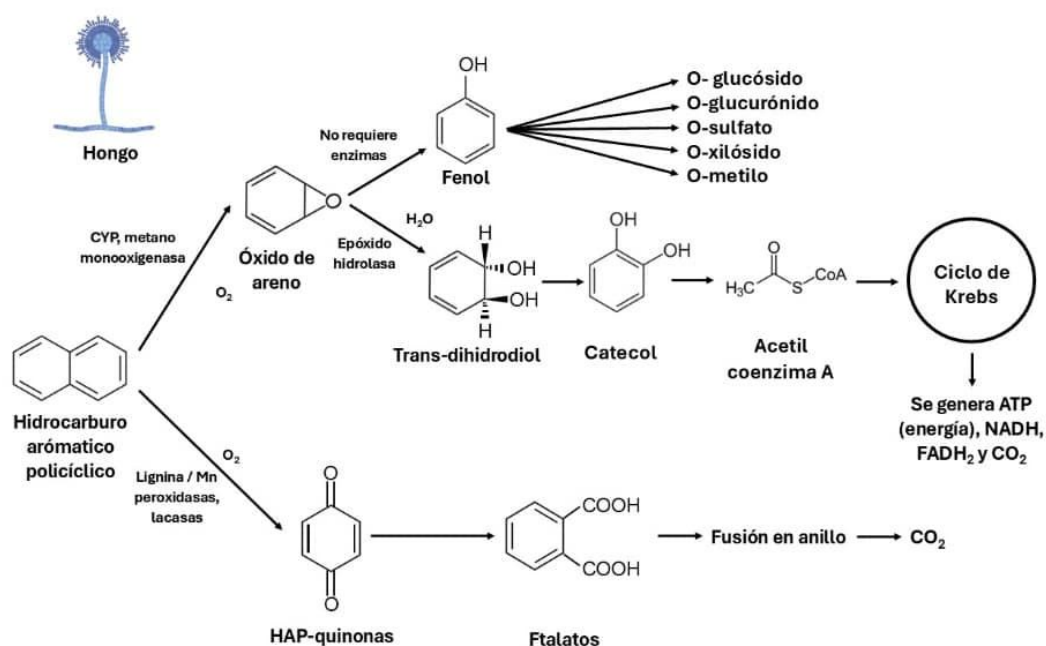


Figura 3: Ruta metabólica de degradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos por hongos.

Los microorganismos (bacteria y hongos) además de biosintetizar enzimas, pueden producir biosurfactantes, los cuales son moléculas con propiedades anfílicas, es decir poseen un extremo con alta afinidad al agua (hidrofílica) y otra con afinidad a grasas, aceites o hidrocarburos (hidrofóbica). Estas moléculas disminuyen la tensión entre el agua y los hidrocarburos del petróleo, permitiendo que estos sean más accesibles para la degradación por los microorganismos (Figura 4).

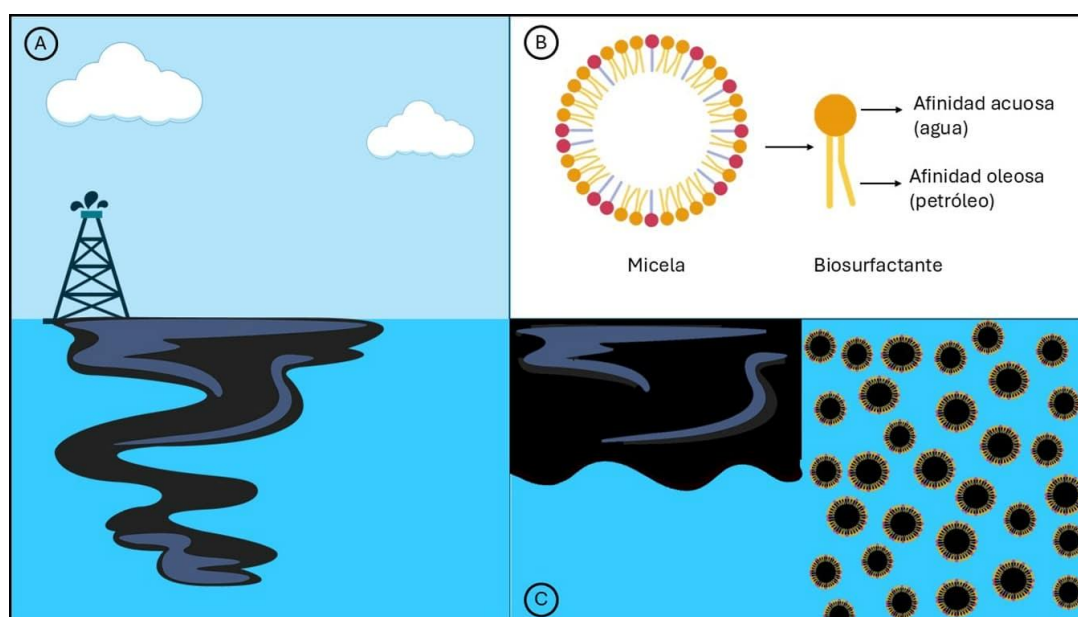


Figura 4: Mecanismo de acción de los biosurfactantes en la disminución de la tensión superficial. A. Derrame de petróleo en ecosistemas acuáticos. B. Estructura de los biosurfactantes. C. Ruptura de la tensión superficial entre la fase acuosa y oleosa (permitiendo la formación de emulsiones).

Factor ambiental	Hongos	Bacterias
pH	Ácido a neutro (4-7)	Neutro a alcalino (6-8)
Temperatura	20 a 35 °C	20 a 40 °C
Aeración	Aerobios	Aerobias y anaerobias, en condiciones anaerobias son hasta 5 veces más lentas.
Disponibilidad de agua	Necesaria	Necesaria
Nutrientes	Nitrógeno, fósforo y potasio.	Nitrógeno, fósforo y potasio.

Cuadro 2: Condiciones ambientales óptimas para el crecimiento de hongos y bacterias para la degradación de hidrocarburos.

A pesar de que la degradación de los hidrocarburos puede realizarse por hongos y bacterias de manera individual, los estudios indican que son más efectivos los consorcios microbianos (Cuadro 3), es decir, mezclas coordinadas de múltiples bacterias, hongos o de ambas, que actúan sobre distintos componentes del petróleo de manera simultánea. Estos consorcios trabajan como un equipo, unas cepas inician la degradación de moléculas grandes mientras que otras metabolizan los fragmentos intermedios y algunas eliminan los residuos finales, lo que maximiza la eficiencia del proceso. Por ejemplo, el consorcio formado por las bacterias *Pseudoxanthomonas* sp., *Bacillus* sp., *Dietzia* sp. y *Acinetobacter* sp., aisladas de suelos salinos, fue capaz de degradar más del 97% de los hidrocarburos totales en 10 días (Chen *et al.*, 2024, p. 9).

Aplicaciones y desafíos de la biorremediación microbiana

La biorremediación mediante hongos y

bacterias ha demostrado ser muy eficaz para limpiar ambientes contaminados con hidrocarburos del petróleo. Por lo que el diseño y uso de consorcios cada día es más común (Cuadro 3), dentro de este contexto se puede ver como la eficiencia de degradación es mejorada con la combinación de cepas fúngicas y bacterianas, entre estas combinaciones se encuentran los hongos *Trichoderma koningiopsis* y *Penicillium janthinellum*, con las bacterias *Serratia marcescens* y *Burkholderia cepacia*, las cuales fueron capaces de eliminar el 91% de los hidrocarburos totales del petróleo (Silva *et al.*, 2024, p. 20). A pesar de esta alta eficiencia, la aplicación de microorganismos en el sitio enfrenta varios desafíos técnicos y regulatorios. Las cepas deben estar adaptadas al sitio contaminado, considerando los factores como pH, humedad del suelo, salinidad y el tipo de suelo. Además, el tiempo necesario puede ser largo en comparación con técnicas fisicoquímicas, que son más rápidas, aunque menos sostenibles.

Consorcio	Microorganismos	Compuestos degradados	Degradación	Referencia
ENZ-G1	Bacterias <i>Chryseobacterium</i> , <i>Acinetobacter</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Stenotrophomonas</i> , <i>Alcaligenes</i> y <i>Gordonia</i> Hongo <i>Trametes gibbosa</i>	Parafinas lineales n-C ₁₀ y n-C ₂₄ presentes en diésel	90.8 %	Zanaroli <i>et al.</i> , 2010
<i>Bacillus thuringiensis</i> , <i>B. velezensis</i> y <i>Stenotrophomonas</i>	Bacterias <i>Bacillus thuringiensis</i> , <i>B. velezensis</i> y <i>Stenotrophomonas</i>	Hidrocarburos totales de petróleo (HTP)	99.7%	Okorhi-Dimasa y Tudararo-Aherobo, 2023
<i>T. koningiopsis</i> , <i>S. marcescens</i> y <i>B. cepacia</i>	Hongo <i>Trichoderma koningiopsis</i> Bacterias <i>Serratia marcescens</i> y <i>Burkholderia cepacia</i>	Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) e HTP presentes en diésel	93.6 % HAP y 93.5 % HTP	Silva <i>et al.</i> , 2024

Cuadro 3: Consorcios microbianos utilizados en la degradación de hidrocarburos de petróleo.

El uso de la biorremediación en la restauración de sitios contaminados se debe a su compatibilidad con el medio ambiente, los bajos costos en comparación con los métodos tradicionales la hacen sustentable, además de promover la regeneración del ecosistema, sin producir residuos secundarios tóxicos. Sin embargo, para su correcto funcionamiento, la biorremediación requiere de la suplementación con nutrientes y oxígeno (bioestimulación), así como de la inoculación de microorganismos capaces de degradar compuestos (bioaumentación). Esta técnica puede emplearse como una solución ecológica y efectiva para la limpieza de áreas contaminadas con hidrocarburos, además de ser rentable y con menos efectos perjudiciales, por lo que su uso puede ser una alternativa al empleo de métodos físicos o químicos convencionales o funcionar en sinergia para mejorar la limpieza de los sitios contaminados.

Por otra parte, el avance en áreas de la ingeniería genética ha permitido el desarrollo de consorcios microbianos especializados y de sistemas de monitoreo ambiental en tiempo real, lo que abren nuevas posibilidades para optimizar la degradación de los hidrocarburos. En conjunto con tecnologías limpias, la biorremediación tiene el potencial de convertirse en una pieza clave para la recuperación ambiental y la transición hacia una gestión más responsable de los recursos naturales.

Conclusión

Debido a la creciente demanda energética, la contaminación por hidrocarburos representa un problema serio para la salud y el bienestar de los seres vivos. En este sentido, debido a su capacidad para degradar compuestos tóxicos y transformarlos a menos dañinos, la biorremediación microbiana representa una alternativa eficaz, sostenible y respetuosa con el

medio ambiente. A pesar de sus ventajas, aún enfrenta retos como la adaptación de los microorganismos a las condiciones específicas del sitio y de los tiempos prolongados durante su aplicación.

Referencias

- [1] Peraza-Liñan, D. L., Ayil-Gutiérrez, B. A., Urías-Salazar, A. A., López-Santillán, J. A., Estrada-Drouaillet, B., Segura-Martínez, M. T. J. y Poot-Poot, W. A., Biodegradation of crude oil by *Aspergillus tubingensis*: biosurfactant-producing strain. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 24[1], pp.1–11, 2025.
- [2] Silva M., J. P., Da Silva, A. F., Delgado D., R. T. y Giachini A. J., Explorong novel fungal-bacterial consortia for enhanced petroleum hydrocarbon degradation. *Toxics*, 12[913], pp.1–26, 2024.
- [3] Wu, T., Xu, J., Xie, W., Yao, Z., Yang, H., Sun, Ch. and Li, X., *Pseudomonas aeruginosa* L10: A hydrocarbon-degrading, biosurfactant-producing, and Plant-Growth-Promoting endophytic bacterium isolated from a reed (*Phragmites australis*). *Frontiers in Microbiology*, 9, pp.1–12, 2018.
- [4] Chen, W., Sun, J., Min, R., Wang, L., Zhang, J., Qiao, H. y Cheng, S., Crude oil biodegradation by a biosurfactant-producing bacterial consortium in high-salinity soil. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12, pp.1–17, 2024.
- [5] Obayori, O. S. y Salam, L. B., Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons: Role of plasmids. *Scientific Research and Essays*, 5[25], pp.4093–4106, 2010.