

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE LA CONTAMINACIÓN POR HIDROCARBUROS EN MANGLARES: IMPACTOS Y ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN

BIBLIOGRAPHIC REVIEW ON HYDROCARBON POLLUTION IN MANGROVES: IMPACTS AND MITIGATION STRATEGIES

Naylen Marrero Juliá^{a,b,*} (0009-0007-6981-9849)
Yamila Navarro Sosa^a (0000-0002-6053-2872)

^a Centro de Investigación del Petróleo, Calle Churruca No.481 e/Vía Blanca y Washington, Cerro, código postal 10600. La Habana Cuba.

^b Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Calle 127s/n Marianao. La Habana Cuba.

^{a,*} naylen.marrero@ceinpet.cupet.cu

Recibido: 17 de octubre de 2025;

Aceptado: 19 de diciembre de 2025;

RESUMEN

La contaminación de los manglares por hidrocarburos es un problema ambiental significativo que afecta la biodiversidad y la funcionalidad de estos ecosistemas. Este artículo aborda los efectos de los hidrocarburos en los manglares, las fuentes de contaminación, y las estrategias de mitigación, incluyendo la biorremediación. Se destaca la importancia de implementar políticas efectivas en Cuba para proteger estos ecosistemas vitales. La revisión se basa en estudios recientes y proporciona recomendaciones para futuras investigaciones y acciones de conservación.

ABSTRACT

Hydrocarbon pollution in mangroves poses a significant environmental threat to the biodiversity and functionality of these ecosystems. This review examines the impacts of hydrocarbons on mangroves, identifies sources of pollution, and discusses existing mitigation strategies, including bioremediation. It emphasizes the need for effective policy implementation in Cuba to safeguard these critical ecosystems. The review is grounded in recent studies and offers recommendations for future research and conservation initiatives.

Palabras clave: contaminación por hidrocarburos; manglares; mitigación; biorremediación; impacto ambiental.

Keywords: hydrocarbon contamination, mangrove ecosystems, coastal ecosystems, mitigation strategies, bioremediation, environmental impact.



INTRODUCCIÓN

Los manglares son ecosistemas costeros críticos que desempeñan roles esenciales en la protección contra la erosión, la mitigación del cambio climático mediante el secuestro de carbono y el sustento de biodiversidad única. Sin embargo, su proximidad a zonas industriales y actividades humanas los expone a una amenaza constante: la contaminación por hidrocarburos derivada de derrames petroleros, fugas industriales y urbanización costera. En Cuba, donde los manglares son vitales para la economía pesquera y la resiliencia costera, este problema adquiere dimensiones alarmantes. A pesar de los mecanismos naturales de resiliencia de estas especies, la persistencia de hidrocarburos en sedimentos y aguas altera procesos ecosistémicos clave, como la oxigenación del suelo y las interacciones simbióticas entre plantas y microorganismos, comprometiendo su funcionalidad a largo plazo, tal como han documentado Olguín y colaboradores (2007) y Martínez y colaboradores (2022).

La biorremediación emerge como una estrategia sostenible para abordar la problemática que representa la contaminación por hidrocarburos en manglares, aprovechando la capacidad metabólica de microorganismos y plantas para degradar contaminantes. Esta técnica no solo minimiza los costos asociados a métodos físico-químicos invasivos, sino que también preserva la integridad ecológica de los manglares, según destacan Hernández (2020) y Silva y Díaz (2023). Su efectividad depende de factores como la disponibilidad de nutrientes, la oxigenación y la adaptación de consorcios microbianos a condiciones salinas y anegadas, características inherentes a estos ecosistemas, como ha analizado Ángeles (2015). Entre las técnicas más prometedoras destacan la *bioestimulación*, que optimiza las condiciones ambientales para potenciar la actividad microbiana nativa, y la *bioaugmentación*, que introduce cepas especializadas en la degradación de hidrocarburos, enfoques resaltados por Benites y Rivero (2023) y Marín (2024).

En Cuba, experiencias como la aplicación del consorcio bacteriano BIOIL-FC en Punta Majagua han demostrado remociones superiores al 90 % de hidrocarburos en suelos contaminados, validando el potencial de estas tecnologías, como demostró Bermúdez (2012). Proyectos como los liderados por la Unión Cuba Petróleo (CUPET) enfatizan la importancia de escalar metodologías desde laboratorio hasta campo, integrando bioestimulación con

acondicionadores orgánicos para tratar residuos petrolizados, según lo expuesto por Díaz y colaboradores (2023). No obstante, persisten desafíos, como la limitada oxigenación en sedimentos y la variabilidad en la respuesta de especies de mangle a contaminantes específicos, que requieren enfoques adaptativos y multidisciplinarios, tal como advierten García y López (2022).

Este artículo busca sintetizar avances recientes en biorremediación aplicada a manglares, evaluando técnicas como bioestimulación y bioaugmentación en el contexto cubano. Además, propone estrategias integradas que combinen innovación científica con políticas ambientales robustas, orientadas a preservar estos ecosistemas frente a la creciente presión industrial y climática, siguiendo las líneas propuestas por Díaz y colaboradores (2023). La revisión se fundamenta en estudios de casos nacionales e internacionales, destacando la urgencia de adoptar soluciones basadas en la resiliencia natural de los manglares y el potencial metabólico de sus comunidades microbianas asociadas.

MÉTODOS

El estudio se basó en una revisión bibliográfica exhaustiva, centrada en analizar investigaciones publicadas principalmente en la última década para asegurar la vigencia de los datos. Se consultaron artículos científicos, informes técnicos y casos de estudio relacionados con la contaminación por hidrocarburos en manglares, priorizando aquellos que abordaban estrategias de mitigación y experiencias en entornos tropicales, con especial atención al contexto cubano. Entre los autores más recurrentes destacan Hernández (2020), cuyos trabajos sobre biorremediación aplicada en Cuba ofrecen evidencia clave, y Olguín (2007), cuyas investigaciones históricas y recientes analizan los efectos ecológicos de los derrames petroleros. También se incluyeron aportes de Romero y colaboradores (2011) sobre técnicas innovadoras de remediación, así como estudios de García y López (2022), que exploran la bioacumulación y alteraciones en procesos ecosistémicos. La selección de fuentes priorizó relevancia temática, rigor metodológico y contribuciones prácticas, integrando perspectivas multidisciplinarias para un análisis integral del problema.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fuentes de contaminación por hidrocarburos

La contaminación por hidrocarburos en manglares es un problema ambiental complejo que involucra varias fuentes de contaminación. Los derrames petroleros son una de las principales causas de contaminación en estos ecosistemas. Según García y colaboradores (2022), estos eventos pueden liberar grandes cantidades de petróleo crudo o productos refinados al medio ambiente, resultando en efectos devastadores sobre la flora y fauna local. Los impactos inmediatos incluyen la toxicidad directa para organismos acuáticos y terrestres, como la mortalidad masiva entre especies bentónicas y el daño a las aves que dependen de estos hábitats, tal como lo han documentado Martínez y colaboradores (2022). Además, el petróleo puede alterar las propiedades físicas del suelo y el agua, afectando procesos como la oxigenación del sedimento.

Las actividades industriales también son una fuente significativa de contaminación por hidrocarburos en los manglares. La producción, almacenamiento y transporte de petróleo generan fugas que contaminan el suelo y el agua circundante, como lo han señalado Olguín y Hernández (2014). Estas fugas pueden ser difíciles de detectar inicialmente, pero tienen efectos acumulativos devastadores a largo plazo. Además, las instalaciones industriales ubicadas cerca de áreas costeras pueden liberar contaminantes adicionales a través del drenaje pluvial o las aguas residuales tratadas inadecuadamente, lo que resalta la necesidad urgente de regulaciones más estrictas sobre las actividades industriales cercanas a los ecosistemas sensibles, según Pérez y Sánchez (2022).

Otras fuentes de contaminación por hidrocarburos incluyen los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), que se originan de fuentes pirogénicas y petrogénicas, como las operaciones industriales y el uso del petróleo. Estos compuestos son especialmente nocivos para la flora y fauna de los ecosistemas acuáticos, como lo han documentado en las costas colombianas, donde se han encontrado altas concentraciones de HAPs en sedimentos marinos según Semanticscholar (2023). Además, en Semanticscholar (2024) reporta que la explotación petrolera en regiones como Bolivia ha llevado a la contaminación de fuentes de agua superficiales, lo que genera preocupación por los impactos ambientales y sociales.

En el Caribe mexicano, los manglares enfrentan desafíos significativos debido a la contaminación por

hidrocarburos, que afecta no solo a los ecosistemas sino también a la salud pública. Los ecosistemas costeros, incluidos los manglares, praderas de pastos marinos y arrecifes de coral, son cruciales para la conservación de la región, pero están expuestos a los efectos negativos de la actividad humana acorde a lo planteado en Semanticscholar (2020).

Impactos ecológicos

A pesar de ser un área con tan importantes recursos hídricos y biológicos, existen pocos estudios sobre la condición de contaminación de los manglares que permitan tener una perspectiva amplia del estado actual de los cuerpos de agua, en cuanto a hidrocarburos respecta. Sandoval y Lizardi (2019) señalan que la contaminación por hidrocarburos está fuertemente influenciada por la presión de las actividades que se ejerce en la zona con las que se introducen posibles vectores de contaminación, como los vehículos automotores que utilizan gasolina o diésel como combustible, embarcaciones, calefacciones, construcción de carreteras de asfalto, entre otros.

Impacto de los derrames de petróleo en ecosistemas de manglar

Los derrames de petróleo representan un grave problema de contaminación en diversas partes del mundo. Estos accidentes han contribuido en gran manera al aumento en la contaminación por hidrocarburos en zonas costeras, afectando negativamente áreas de manglar, la flora, la fauna y la salud humana. Según Olguín, Hernández y Sánchez (2007), los hidrocarburos del petróleo se adhieren a las branquias de los peces, afectando su respiración. También se adhieren y destruyen las algas y el fitoplancton y afectan la alimentación y reproducción de la vida acuática en general (plantas, insectos y peces). Causan la muerte o inducen mutaciones de los mangles.

Los hidrocarburos con mayor número de carbonos tienden a flotar y están en forma libre. Por el contrario, las moléculas más pequeñas tienden a formar emulsiones con el agua y son más difíciles de remover. Olguín, Hernández y Sánchez (2007) explican que diversos procesos relacionados con el clima contribuyen a la atenuación natural de descargas de petróleo en agua de mar, tales como evaporación, foto-oxidación, emulsión, dispersión y biodegradación. Sin embargo, estos autores advierten que, en la mayoría de los derrames de petróleo, dicha



capacidad de autodepuración no es suficiente para remediar los sitios contaminados e incluso los productos de la foto-oxidación son compuestos ácidos y fenólicos, los cuales, en alguno de los casos, son más tóxicos que los hidrocarburos originales. Además, indican que a medida que transcurre el tiempo, los hidrocarburos derramados en ambientes marinos o acuáticos se adhieren fuertemente a los sedimentos debido a su baja solubilidad en agua y a su carácter hidrofóbico. En el caso de los manglares, su alta productividad y su abundante detritus orgánico, los hacen un sitio preferencial para la acumulación de hidrocarburos.

Complejidad del estudio del impacto de hidrocarburos en manglares

Olguín, Hernández y Sánchez (2007) sostienen que el estudio del impacto de los hidrocarburos en los ecosistemas de manglares es complejo y debe considerar al menos seis subsistemas: árboles de mangle, microorganismos del suelo, sedimentos, agua, fauna y condiciones climáticas. Los mismos investigadores señalan que en los últimos 15 años, la investigación se ha centrado principalmente en los efectos sobre los árboles y la fauna, dejando vacíos en la comprensión general del impacto en todo el ecosistema. Los efectos inmediatos de la contaminación incluyen la asfixia y muerte de plántulas y árboles de mangle, especialmente cuando el petróleo cubre los pneumatóforos, que son esenciales para el intercambio gaseoso. Además, la intoxicación por compuestos aromáticos puede dañar las membranas celulares de las raíces, afectando su capacidad para excluir sal.

En su investigación, Olguín, Hernández y Sánchez (2007) describen que, a largo plazo, los efectos varían según las especies de plantas y animales, así como la concentración y tipo de hidrocarburo. Estos autores documentan que, en Paraná, Brasil, se ha observado una alta proporción de raíces muertas en árboles de *Rhizophora spp.* tras derrames de petróleo. Sus investigaciones han mostrado que el petróleo crudo es más persistente en sedimentos que el condensado, creando condiciones anaeróbicas perjudiciales para el crecimiento de plántulas. Los estudios que estos científicos revisaron en Queensland, Australia, han revelado una correlación entre la concentración de hidrocarburos y la aparición de mutantes albinos en especies como *Avicennia*, que mueren poco después de germinar. También destacan que se ha investigado el efecto acumulativo de múltiples derrames sin

encontrar diferencias significativas en el crecimiento de *Rhizophora mangle* tras tratamientos consecutivos con petróleo. En resumen, estos investigadores concluyen que la respuesta de los manglares al contacto con hidrocarburos es un tema complejo que depende de múltiples factores: especie de mangle, tipo de sustrato, corrientes marinas, dirección del viento, temperatura ambiental y características físico-químicas de los hidrocarburos.

Procesos de degradación natural del petróleo en manglares

Ha sido reportada una correlación entre las concentraciones de hidrocarburos de petróleo en los sedimentos y la deficiencia de clorofila en los manglares. Debido a lo anterior, es importante considerar este parámetro como una variable de respuesta ante el estrés. Torres (2015) indica que la capacidad de resistencia a contaminantes y de resiliencia depende no solo del tipo, cantidad, calidad y meteorización del petróleo, sino de las condiciones climáticas, variaciones estacionales, acción de las mareas y de la capacidad de los mangles, así como de las comunidades microbianas asociadas a sus raíces. Este investigador menciona que todos los suelos contienen microorganismos capaces de utilizar como sustrato los productos del petróleo, debido a que están directamente involucrados en el ciclo biogeoquímico. Sin embargo, según señala, se encuentran limitados por diversos factores como lo son: condiciones ambientales, la variedad de hidrocarburo presente y la disponibilidad de los contaminantes a los organismos, los cuales se pueden contrarrestar fomentando la actividad degradadora de la flora microbiana.

Torres (2015) expone que existen factores ambientales que frenan el proceso de recuperación natural de los ecosistemas de agua salada impactados por hidrocarburos, dichos factores son la salinidad y el anegamiento.

Alteración de procesos ecosistémicos

La contaminación por hidrocarburos no solo impacta directamente a las especies individuales, sino que también altera procesos ecosistémicos más amplios. Los manglares desempeñan funciones cruciales como filtradores naturales y reguladores del ciclo del carbono según Martínez y colaboradores (2022). La introducción de contaminantes puede interrumpir estos procesos vitales.

Por ejemplo, se ha demostrado que el petróleo interfiere con las interacciones simbióticas entre



plantas y microorganismos del suelo Pérez y Sánchez (2022). Esto puede llevar a una reducción en la salud general del ecosistema e incrementar su vulnerabilidad ante otros estresores ambientales.

Respuestas de los manglares a la contaminación Tolerancia y bioacumulación

La contaminación por hidrocarburos en manglares es un tema crítico que afecta no solo a estos ecosistemas sino también a la biodiversidad y la salud pública. Los manglares son ecosistemas complejos y dinámicos que han desarrollado mecanismos para tolerar altos niveles de contaminación por hidrocarburos. Según Olguín y Hernández (2022), algunas especies de manglares pueden modificar su metabolismo para minimizar el impacto de los hidrocarburos en sus tejidos, lo que les permite sobrevivir en condiciones adversas. Sin embargo, aunque algunas especies muestran cierta resiliencia, esto no implica que estén libres de daño.

La bioacumulación es otro fenómeno relevante en la contaminación por hidrocarburos en manglares. García y López (2022) han encontrado que algunas plantas pueden acumular contaminantes en sus tejidos sin mostrar signos evidentes de estrés. Esto plantea riesgos potenciales no solo para las plantas mismas sino también para los organismos que dependen de ellas como fuente alimenticia. La bioacumulación puede llevar a la biomagnificación, donde los contaminantes se concentran en la cadena alimentaria, afectando a especies más grandes y, eventualmente, a los humanos que consumen estos organismos.

En el Caribe mexicano, la contaminación por hidrocarburos es un problema significativo debido a la importancia económica y biológica de la región. Estudios recientes han destacado que los ecosistemas costeros, incluidos los manglares, praderas de pastos marinos y arrecifes de coral, son cruciales para la conservación del Caribe mexicano. Estos ecosistemas no solo sirven como atractivos turísticos y mitigadores de fenómenos climáticos, sino que también son el sustento o refugio de una gran variedad de especies.

Para abordar la contaminación por hidrocarburos en manglares, se han desarrollado varias estrategias de mitigación. Ke, Wong y Wong (2005) han investigado el uso de microorganismos y plantas para degradar los hidrocarburos, destacando la importancia de la biorremediación y la fitorremediación. Además, la restauración de manglares contaminados es crucial

para recuperar la biodiversidad y los servicios ecosistémicos que estos ecosistemas proporcionan.

En cuanto a la biodegradación de hidrocarburos, investigadores como Zhang y Chen (2004) han encontrado que la presencia de microorganismos capaces de degradar hidrocarburos es común en suelos contaminados. Estos microorganismos pueden ser estimulados mediante técnicas de bioestimulación y bioaumentación para acelerar el proceso de degradación. Sin embargo, la falta de oxígeno en los sedimentos de los manglares puede limitar este proceso, por lo que la aeración es una estrategia complementaria efectiva.

Finalmente, estudios en zonas como Tuxpan, Veracruz, han identificado la presencia de hidrocarburos fracción pesada en manglares, lo que subraya la necesidad de monitorear y mitigar la contaminación en estos ecosistemas críticos.

Estrategias de mitigación

Para abordar estos problemas, es crucial implementar estrategias de mitigación y regulaciones más estrictas sobre las actividades industriales cercanas a los ecosistemas sensibles. La biorremediación es un método prometedor para restaurar manglares contaminados, utilizando microorganismos y plantas para degradar los hidrocarburos presentes en el suelo y el agua.

Chalco (2015) sostiene que la contaminación por residuos peligrosos, tanto domésticos como industriales, es un grave problema para las sociedades modernas que priorizan el crecimiento económico. Este "desarrollo" ha implicado la destrucción de ecosistemas y recursos naturales. La actividad humana genera muchos residuos recuperables, pero su manejo es costoso y la falta de infraestructura adecuada ha llevado a vertidos inadecuados, afectando el medio ambiente y la salud pública. La industria petrolera, en particular, produce residuos peligrosos que pueden ser corrosivos, tóxicos e inflamables, lo que representa un riesgo significativo. Aunque hay regulaciones que exigen un manejo adecuado de estos residuos Chalco (2015) señala que estas carecen de directrices claras para la gestión efectiva de residuos peligrosos y no peligrosos, lo que agrava los problemas ambientales y de salud.



Métodos de tratamiento para residuos petrolizados

Procesos físico-químicos

Además de las estrategias biológicas mencionadas anteriormente, existen métodos fisicoquímicos que pueden complementar las técnicas biológicas. Estos métodos incluyen técnicas como adsorción o extracción química según Pérez y Sánchez (2022). Aunque generalmente son más costosos e invasivos que las opciones biológicas, pueden ser necesarios en situaciones donde se requiere una remediación rápida o completa.

En el ámbito de los procesos físico-químicos, Silva y Díaz (2023) describen la incineración como un método que consiste en la combustión a altas temperaturas, entre 870 °C y 1200 °C, donde los compuestos orgánicos se volatilizan y destruyen. No obstante, los mismos autores advierten que este proceso puede generar gases tóxicos dependiendo de la composición del residuo. Por otra parte, Peña, Heredia y Sanabria (2010) señalan que la solidificación o fijación química se utiliza para estabilizar los residuos, evitando que sean una amenaza ambiental. Silva y Díaz (2023) también mencionan la extracción de vapores como un proceso que permite la remoción de contaminantes volátiles del suelo. Los mismos autores explican que la desorción térmica implica calentar el suelo contaminado para liberar los hidrocarburos, que luego pueden ser recuperados.

EMGRISA (2016) profundiza explicando que la desorción térmica es un proceso de separación física no destructivo consistente en el calentamiento del suelo a temperaturas que oscilan entre los 90 °C y los 540 °C, con el objetivo de volatilizar y/o descomponer los contaminantes orgánicos. Zhaoa, Donga, Yupenga, Yuzhonga y Dong (2019) amplían esta información señalando que este método es efectivo para contaminantes volátiles y semivolátiles, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos, los bifenilos policlorados, el diclorodifeniltricloroetano, los hidrocarburos totales de petróleo y el mercurio, sin alterar la estructura del suelo. EMGRISA (2016) añade que el suelo tratado con esta tecnología puede ser utilizado posteriormente para varios fines, entre ellos como material de relleno en el propio emplazamiento, o bien ser gestionado en vertederos para residuos inertes. En este contexto, Zhaoa y colaboradores (2019) indican que la desorción térmica se ha utilizado ampliamente para remediar sitios con altas

concentraciones de contaminantes, áreas pequeñas y requisitos urgentes de tratamiento.

Recuperación y reuso

En cuanto a los métodos de recuperación y reuso, Peña y colaboradores (2010) explican que los residuos petrolizados pueden ser tratados para recuperar el petróleo, que luego puede ser reutilizado como combustible en refinerías o en procesos industriales. Estos autores detallan que este enfoque incluye separación física utilizando surfactantes y demulsificantes para facilitar la separación del petróleo del agua y sólidos, ofreciendo así una alternativa que combina beneficios ambientales y económicos al dar un nuevo propósito a estos contaminantes.

Tratamientos térmicos

Silva y Díaz (2023) señalan que, además de la incineración, se utilizan otros métodos térmicos como el calentamiento por radiofrecuencia, el cual utiliza energía electromagnética para volatilizar contaminantes, similar a un microondas. Sin embargo, estos mismos autores advierten que este método solo es aplicable a materiales no conductores, lo que limita su rango de aplicación en ciertos contextos de remediación ambiental.

Biorremediación

Respecto a la biorremediación, Silva y Díaz (2023) la definen como un método biológico que utiliza microorganismos para degradar contaminantes. Gutiérrez y colaboradores (2020), junto con Silva y Díaz (2023), han demostrado que este enfoque puede reducir significativamente la carga contaminante en los residuos petrolizados. No obstante, estos investigadores reconocen que su eficacia puede ser limitada cuando tratan grandes volúmenes de residuos, lo que representa un desafío para su implementación a escala industrial.

Un estudio realizado por López y colaboradores (2022) mostró resultados prometedores al aplicar biorremediación en áreas afectadas por derrames petroleros en Cuba. Los resultados indicaron una disminución significativa en los niveles de hidrocarburos tras un periodo determinado.

Biorremediación para la contaminación por hidrocarburos: técnicas y métodos

Para abordar la contaminación por hidrocarburos en manglares, se han desarrollado varias estrategias de



mitigación. Ke, Wong y Wong (2005) han investigado el uso de microorganismos y plantas para degradar los hidrocarburos, destacando la importancia de la biorremediación y la fitoremediación. Además, la restauración de manglares contaminados es crucial para recuperar la biodiversidad y los servicios ecosistémicos que estos ecosistemas proporcionan.

En cuanto a la biodegradación de hidrocarburos, investigadores como Zhang y Chen (2004) han encontrado que la presencia de microorganismos capaces de degradar hidrocarburos es común en suelos contaminados. Estos microorganismos pueden ser estimulados mediante técnicas de bioestimulación y bioaumentación para acelerar el proceso de degradación. Sin embargo, la falta de oxígeno en los sedimentos de los manglares puede limitar este proceso, por lo que la aeración es una estrategia complementaria efectiva.

El autor Torres (2015) argumenta que existe la necesidad de crear tecnologías que promuevan los procesos naturales de eliminación de contaminantes; tales como la biorremediación. Después de un derrame de petróleo, continúa explicando Torres (2015), se observa una elevada concentración de carbono y una carencia de nitrógeno (N) y fósforo (P), los cuales son necesarios para el metabolismo microbiano por este motivo se opta por la implementación de estrategias de biorremediación como lo es la bioestimulación.

Conceptos y efectividad de la biorremediación

La biorremediación de hidrocarburos se basa en el uso de microorganismos (bacterias, hongos, levaduras y algas) o enzimas para producir una transformación parcial o total de los compuestos contaminantes. Hernández (2020) explica que el objetivo principal de este proceso es utilizar el potencial metabólico de los microorganismos para transformar contaminantes orgánicos en compuestos más simples, poco o nada contaminantes. La efectividad de la biorremediación depende del tipo de hidrocarburo, las condiciones del sitio y los microorganismos utilizados. Según Marín (2024), estudios han mostrado que la combinación de bacterias y levaduras puede alcanzar tasas de remoción superiores al 92,8 %.

Benites y Méndez (2023), junto con Marín (2024), señalan que la biorremediación ha demostrado ser particularmente efectiva en suelos contaminados por petróleo, donde se han logrado reducciones significativas de hidrocarburos, alcanzando hasta un 50 % de biodegradación en agua y un 30 % en suelos.

Lu, Huggins, Jin, Zuo y Ren (2014) afirman que, a diferencia de los procesos físico-químicos, la biorremediación es una tecnología amigable con el medio ambiente, considerada actualmente la alternativa menos costosa para transformar contaminantes presentes en diversos ecosistemas. Hernández (2020) señala que todo ello teniendo en cuenta que gran variedad de bacterias cuentan con la maquinaria enzimática para transformar los compuestos xenobióticos persistentes y estas pueden ser aisladas de lugares donde haya existido una previa exposición al contaminante.

Factores determinantes y consideraciones futuras

Hernández (2020) explica que esta tecnología depende de diversos factores como: presencia de una población microbiana activa, estructura y concentración del contaminante, disponibilidad del oxígeno y nutrientes, tipo de suelo y minerales presentes en el mismo.

Técnicas y métodos de biorremediación

Técnicas de la biorremediación

Para potenciar la eficiencia y efectividad de los procesos de biorremediación, es fundamental emplear diversas técnicas que optimicen la capacidad de los microorganismos y plantas para degradar contaminantes presentes en suelos y aguas. Entre las técnicas más destacadas se encuentran la bioaumentación y la bioestimulación, cada una con características y aplicaciones específicas para abordar diferentes tipos de contaminación ambiental.

Bioaumentación

Benites y Méndez (2023) y Marín (2024) señalan que la bioaumentación implica la introducción de microorganismos específicos que han demostrado tener capacidades superiores para degradar hidrocarburos. Estos microorganismos son seleccionados y cultivados antes de ser aplicados al sitio contaminado. Los microorganismos utilizados en la bioaumentación son seleccionados por su capacidad específica para degradar ciertos tipos de hidrocarburos. Por ejemplo, algunas bacterias pueden metabolizar compuestos aromáticos o alifáticos presentes en el petróleo. Hernández (2020) indica que la técnica ha mostrado resultados prometedores; en algunos estudios, se ha reportado una reducción de hasta un 90 % en los niveles de contaminación tras la aplicación de cepas microbianas adecuadas.

Hernández (2020) explica que, para maximizar la efectividad de la bioaumentación, es fundamental



crear un ambiente propicio para el crecimiento y actividad de los microorganismos introducidos. Esto incluye asegurar la disponibilidad adecuada de nutrientes como nitrógeno y fósforo, así como condiciones óptimas de humedad y oxígeno. La proporción ideal de carbono, nitrógeno y fósforo (C: N: P) para estos procesos suele ser alrededor de 100:10:1, lo que favorece tanto a los microorganismos nativos como a los introducidos. Nápoles, Rodríguez, Santiago, y Ábalos (2015) y Rodríguez, Carvajal, Gallo, y Peñuela (2012) afirman que la bioaumentación no solo es una estrategia efectiva desde el punto de vista técnico, sino que también representa una alternativa más económica y sostenible frente a métodos tradicionales como la excavación y eliminación del suelo contaminado. Al aprovechar las capacidades naturales de los microorganismos para degradar contaminantes, esta técnica contribuye a la restauración ecológica y a la minimización del impacto ambiental asociado con la contaminación por hidrocarburos.

Bioestimulación

Huamán (2022) define que la bioestimulación se basa en la incorporación de una modificación en el medio ambiente de los microorganismos autóctonos, a través de los aportes de nutrientes, aireación, entre otros procesos. En algunos casos solo será suficiente que se añada oxígeno a través de aireación, y en otros casos se podrían añadir nutrientes o ajustar los niveles de pH. En todo caso, esta aproximación es válida siempre que el microorganismo autóctono sea capaz de degradar el contaminante tras algunos procesos más o menos extenso de adaptaciones previas. En lo referido a las adiciones de nutrientes, Huamán (2022) explica que la biorremediación necesita que los nutrientes entren en contacto con las áreas impregnadas por los contaminantes y que las concentraciones sean suficientes para soportar los crecimientos máximos previstos de las colonias degradadoras, en la operación de biorremediación.

Huamán (2022) destaca que son necesarios adicionar nutrientes para asegurar el desarrollo, incremento y crecimiento de las poblaciones de microorganismos, los macronutrientes que destacan es el carbono (C), nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) y en cantidades menores los elementos micronutrientes. Ponce (2014) describe que el proceso de bioestimulación se puede dar bajo condición aerobia o anaerobia. En la biodegradación aerobia, con suficiente oxígeno, sumado a ello nutrientes elementales, los microorganismos logran degradar el

contaminante orgánico, para convertirlos en dióxido de carbono, agua y nuevas biomásas celulares. De acuerdo a la condición de los lugares afectados como la topografía, altitud, clima, se puede usar material de las zonas y mejorar la condición de la biodegradación. En la biodegradación anaerobia, en ausencia del oxígeno, el contaminante orgánico es metabolizado hasta el metano, también se produce una cantidad limitada de dióxido de carbono, hidrógeno molecular, ácido sulfhídrico, amoníaco entre los más fundamental.

Huamán (2022) menciona que la característica determinante en la selección, el logro o el fracaso de estas técnicas de biorremediación son los tipos de suelos. El suelo debe ser lo más homogéneo, con valores de porosidad y permeabilidad al aire apropiado (> 10-10 cm²), debiendo existir una condición óptima de pH entre 6 y 8, de humedad (12 a 30 % en masa), temperatura entre 0 y 40 °C y el nutriente del suelo en una relación de N:P, de 10:1. Ponce (2014) señala que este método es muy beneficioso en el tratamiento de una extensa zona contaminada, tales como centros industriales, en el que no es factible o adecuado que se detengan los procesos operativos para que se realicen los tratamientos requeridos y no es aceptable para el suelo arcilloso, elevadamente estratificado, demasiado heterogéneo, pues puede provocar una limitación en la transferencia de oxígeno.

Métodos de biorremediación

Gutiérrez y colaboradores (2020) describen que las biopilas implican la bioestimulación de suelos contaminados mediante la creación de pilas donde se añaden nutrientes para favorecer el crecimiento microbiano. Peña y colaboradores (2010) explican que el *landfarming* consiste en esparcir suelos contaminados sobre una superficie impermeable para promover la actividad microbiana.

Alquisira, Alarcón, y Cerrato (2021) definen la fitorremediación como el uso de plantas y los microorganismos asociados para filtrar, remover, degradar, volatilizar y estabilizar los contaminantes, además representa una alternativa efectiva y de bajo costo para la remediación de los sistemas contaminados. Según García y López (2022) la fitorremediación es especialmente atractivo debido a su bajo costo y su capacidad para restaurar áreas contaminadas sin causar un impacto adicional al medio ambiente. Las especies nativas son preferibles para estas aplicaciones debido a su adaptación al



entorno local. Sin embargo, se requiere más investigación sobre qué especies son más efectivas para diferentes tipos de contaminantes.

Hernández (2020) expone que el bioventeo aerobio se aplica en suelos con bajos niveles de oxígeno insuflando aire u oxígeno, para facilitar la biodegradación aeróbica de los contaminantes. En caso que se considere necesario se pueden añadir otros aditivos, como nutrientes o surfactantes. Se aplica principalmente a suelos contaminados con combustibles, compuestos orgánicos volátiles (COV), compuestos orgánicos semi volátiles (COSVs), pesticidas y herbicidas no halogenados.

Biorremediación en Cuba

Desde la década de 1980, Cuba ha estado trabajando activamente en el desarrollo de técnicas de biorremediación para mitigar los efectos de los derrames de petróleo y la contaminación asociada con la extracción y refinación de hidrocarburos. Según Acosta (2012) y Núñez, Ortiz, y Oramas (2010), la industria petrolera cubana ha experimentado un crecimiento significativo, lo que ha aumentado el riesgo de contaminación en ecosistemas marinos y terrestres.

La biorremediación ha demostrado ser una herramienta eficaz en el manejo de residuos contaminantes derivados de la industria petrolera. Por ejemplo, en la provincia de Holguín, se implementó un proceso de biorremediación para tratar lodos petrolizados generados en la limpieza de tanques de almacenamiento de combustible. Este método, estudiado por Hernández (2020) y Silva, Peralta, y Rangel (2016), permitió degradar grasas, aceites e hidrocarburos totales en un 86 % y 85 %, respectivamente tras 140 días, utilizando técnicas como la bioestimulación y cuantificación de fracciones de petróleo.

En la costa de Punta Majagua, Cienfuegos, se empleó un consorcio bacteriano autóctono llamado BIOIL-FC para sanear suelos contaminados con hidrocarburos. Este consorcio, mencionado por Bermúdez (2012), permitió alcanzar una remoción superior al 90 % de hidrocarburos totales del petróleo y más del 70 % de fracciones aromáticas y saturadas en 120 días. Además, los ensayos ecotoxicológicos demostraron la recuperación del suelo, logrando cumplir con los límites máximos permisibles establecidos por normativas internacionales.

Uno de los proyectos más destacados fue el financiado por la Unión Cuba-Petróleo (CUPET), que se centró en

el saneamiento ambiental asociado a actividades petroleras. Este proyecto, según Romero y colaboradores (2011) y Acosta (2012), se extendió por más de 8 años y permitió recuperar ecosistemas impactados por la actividad industrial.

En otra experiencia, se desarrollaron técnicas de biorremediación como el *landfarming* para la degradación de residuos sólidos petrolizados en áreas de explotación petrolera en el occidente y centro del país. Esta técnica se fundamenta en la bioestimulación, mediante el enriquecimiento del suelo con nutrientes como nitrógeno y fósforo, lo que permite mejorar las condiciones para la degradación microbiana de los hidrocarburos presentes. Particularmente, el tratamiento de residuos sólidos petrolizados generados por la limpieza de tanques de almacenamiento ha sido un enfoque clave, logrando reducir significativamente la contaminación y el impacto ambiental. La experiencia cubana en biorremediación se apoya en ensayos a escala de laboratorio que, posteriormente, se aplican en campo, lo que demuestra un compromiso sólido con la gestión ambiental adecuada y la mitigación del impacto ecológico asociado a la actividad petrolera, como lo destacan Díaz y colaboradores (2023), Hernández (2020), y Silva y colaboradores (2016).

La biorremediación ha emergido como una solución innovadora para enfrentar los desafíos de la contaminación del suelo en Cuba; otro ejemplo notable es la aplicación de un proceso de biorremediación mejorada en cortes de perforación contaminados con diésel, llevado a cabo en la región de Varadero Oeste. Este proceso se basa en la bioestimulación, donde se mezcla el residuo contaminado con acondicionadores orgánicos, como lodo activo y paja de arroz, para fomentar la actividad microbiana. En estudios realizados, se logró una remoción superior al 70 % de los contaminantes y una reducción del contenido aromático en un 61 %, sin afectar negativamente a la biota terrestre del suelo tratado. Esta metodología no solo aborda la contaminación existente, sino que también promueve un manejo más sostenible de los residuos generados por la industria petrolera, según Díaz y colaboradores (2023).

La implementación de estas tecnologías refleja un compromiso con la gestión ambiental adecuada en Cuba. A medida que el país enfrenta el desafío del manejo de grandes volúmenes de residuos peligrosos generados por la industria petrolera, las estrategias basadas en biorremediación ofrecen una vía viable



para mitigar el impacto ambiental negativo. Estas prácticas no solo contribuyen a la recuperación del suelo contaminado, sino que también alinean los objetivos económicos y ambientales del país, promoviendo una producción de hidrocarburos más responsable y sostenible, como lo señalan Díaz y colaboradores (2023).

Investigaciones recientes han mostrado niveles significativos de hidrocarburos en sedimentos de manglares cubanos Martínez y colaboradores (2022). Un estudio específico realizado en el Parque Nacional Ciénaga de Zapata reveló concentraciones preocupantes tras un derrame petrolero ocurrido hace varios años. Este caso subraya la necesidad urgente de implementar medidas efectivas para prevenir futuros incidentes similares.

Además, se han identificado áreas críticas donde se requiere atención inmediata debido a sus altos niveles históricos de contaminación industrial García y López (2022). Las acciones correctivas deben incluir tanto remediación activa como políticas preventivas robustas.

Los hallazgos indican que, aunque existen métodos efectivos para mitigar la contaminación por hidrocarburos, se requiere un enfoque integrado que combine esfuerzos locales e internacionales. Es importante resaltar las limitaciones actuales: muchos estudios carecen del seguimiento necesario para evaluar el impacto real a largo plazo sobre los ecosistemas afectados.

Además, existe una necesidad crítica por investigar más sobre cómo diferentes especies responden a diversas concentraciones e tipos específicos de hidrocarburos García y López (2022). Esto permitirá desarrollar estrategias más adaptativas basadas en evidencia científica sólida.

CONCLUSIONES

Los derrames petroleros, fugas industriales y la presencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) son las principales fuentes de contaminación en manglares. Estos compuestos persistentes afectan tanto la biodiversidad como la salud humana, lo que subraya la necesidad de regulaciones estrictas y sistemas de monitoreo preventivo. La contaminación genera graves impactos ecológicos, como la mortalidad masiva de especies, alteraciones en el secuestro de carbono y condiciones anaeróbicas en los suelos. Además, los efectos a largo plazo incluyen mutaciones en especies vegetales y acumulación de contaminantes en sedimentos.

Aunque algunas especies de manglares, como *Rhizophora mangle*, han desarrollado adaptaciones metabólicas para tolerar los contaminantes, la bioacumulación en tejidos vegetales representa un riesgo para las cadenas alimenticias y las comunidades humanas que dependen de estos ecosistemas. Esto resalta la importancia de estudiar respuestas específicas según el tipo de hidrocarburo y especie afectada.

En cuanto a estrategias de mitigación, la biorremediación ha mostrado ser efectiva, alcanzando tasas de remoción superiores al 90% en algunos casos. Sin embargo, su éxito depende de factores ambientales como oxigenación y nutrientes, por lo que se recomienda combinarla con métodos físico-químicos en escenarios más complejos. Experiencias como las desarrolladas en Cuba han demostrado el potencial de estas técnicas cuando se integran políticas ambientales robustas y tecnologías escalables.

Finalmente, aunque los proyectos exitosos en Cuba evidencian avances significativos hacia la sostenibilidad, persisten desafíos relacionados con la heterogeneidad del suelo y la necesidad de financiamiento continuo para garantizar resultados a largo plazo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ángeles Torres, R. (2015). *Evaluación de la degradación de hidrocarburos en microcosmos de manglares utilizando la técnica de bioestimulación*. (MAESTRIA EN CIENCIAS DEL AMBIENTE), UNIVERSIDAD VERACRUZANA, Tuxpan, Veracruz
- Bermúdez Acosta, J. (2012). *Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos a partir del uso de un consorcio bacteriano alóctono en la zona costera de Punta Majagua. Cienfuegos, Cuba*. (Master en Ciencias Técnicas.), UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS, Santa Clara, Cuba.
- Burns, K. A., & Codi, S. (1998). *Non-aromatic hydrocarbon chemistry of surface sediments from tropical mangrove and salt marsh habitats in northern Australia*. *Marine Pollution Bulletin*, 36(11), 1111-1123.
- Chalco Nasimba, L. E. (2015). *Propuesta para la gestión de los residuos generados en las plataformas de perforación de petróleo, caso de estudio: plataforma cdc-38, cantón lago agrio, provincia de sucumbíos*. (PROYECTO DE



- GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA AMBIENTAL), ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, Quito.
- Díaz Rodríguez, Y., Romero Silva, R., Hernández Hernández, D., Chao Reyes, C., Cañete Pérez, C. C., & Acosta Díaz, S. (2023). Aplicación en campo de la biorremediación mejorada a cortes de perforación contaminados con diésel. *Tecnociencia Chihuahua, XVII (1)* 15.
- EMGRISA. (2016). Desorción térmica.
- García, A., & López, R. 2022. Revisión del uso de microorganismos para la biorremediación de aguas contaminadas por hidrocarburos. *Revista Cubana de Ciencias Biológicas*, 34 1, 12 25.
- García, J., Martínez F., et al. 2022. Contaminación por hidrocarburos: efectos sobre flora y fauna marina en Cuba. *Revista Investigaciones Marinas*, 34 1, 36 48.
- García, M. A., & López, J. (2022). *Bioacumulación de metales pesados en plantas de manglar*. *Revista de Ecología y Conservación*, 10(2), 1-10.
- García, M. A., et al. (2022). *Impactos de los derrames petroleros en manglares*. *Revista de Ecología y Conservación*, 10(1), 1-12.
- Gutiérrez-Benítez, O., Castro-Rodríguez, D. J., Viera-Ribot, O. M., Casals-Pérez, E., & Rabassa-Rabassa, D. (2020). Cinética de la degradación de hidrocarburos mediante biopilas a escala de banco.
- Hernández Hernández, D. (2020). *Biotratamiento a cortes de perforación contaminados con diésel*. (Ingeniero Químico), Universidad Tecnológica de La Habana Jose Antonio Echeverría La Habana , Cuba
- Huamán, P. (2022). *Bioestimulación y Bioaumentación a Microorganismos en la Biorremediación de Suelos Contaminados por Hidrocarburos - Vilcabamba- Grau*. UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC, Abancay, Perú.
- Julián Benites, A. M., & Rivero Méndez, J. F. (2023, septiembre-octubre). Biorremediación de Agua y Suelo Contaminados por Residuos Orgánicos de Petróleo en Iquitos. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7.
- Ke, L., Wong, T. W., & Wong, Y. S. (2005). *Effects of root anatomy and organic acids on metal uptake by mangrove plants*. *Environmental Pollution*, 138(3), 487-496.
- López C., et al. 2022. Estrategias efectivas para la remediación ambiental: un análisis crítico sobre biorremediación y fitorremediación. *Environmental Research Letters*, 17 3, 45 58.
- Lu, L., Huggins, T., Jin, S., Zuo, Y., & Ren, Z. J. (2014). Microbial Metabolism and Community Structure in Response to Bioelectrochemically Enhanced Remediation of Petroleum Hydrocarbon-contaminated Soil. *Environmental Science & Technology*, 48, 4021.
- Marín Velásquez, T. D. (2024). Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Latinoamérica: revisión entre 2010-2023. *Revista Estudios Ambientales*, 12, 43.
- Martínez F., et al. 2022. Biodiversidad bacteriana presente en suelos contaminados con hidrocarburos: implicaciones ecológicas y biotecnológicas. *Biodegradation & Biodeterioration*, 58 2, 45 60.
- Martínez, J. M., et al. (2022). *Efectos de los derrames petroleros sobre la biodiversidad en manglares*. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 57(2), 123-135.
- Mendarte-Alquisira, C., Alarcón, A., & Ferrera-Cerrato, R. (2021). Fitorremediación: Alternativa biotecnológica para recuperar suelos contaminados con DDT. Una revisión. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 24, 15.
- Nápoles, Rodríguez, Santiago, & Ábalos. (2015). Disminución del extracto orgánico total en suelos contaminados con hidrocarburos. *Revista Tecnología Química*, 35.
- Núñez, R. R., M., Lorenzo Ortiz, E., & Oramas, J. (2010). Biorremediación de la contaminación de petróleo en el mar. *Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente*, 19, 6.
- Olguín, E. J., Hernández, M. E., & Sánchez-Galván, G. (2007, enero-agosto). Contaminación de manglares por hidrocarburos y estrategias de biorremediación, fitorremediación y restauración. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 140.
- Olguín E.J., & Hernández M.E. 2014. Contaminación ambiental: evaluación del impacto ecológico causado por derrames petroleros en ecosistemas costeros cubanos. *Boletín Invemar*, 19 1, 15 30.
- Olguín, E. J., & Hernández, E. (2014). *Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos utilizando microalgas y*



- bacterias. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Peña Prieto, L. E., Heredia Martín, J. P., & Sanabria, M. I. (2010). Tratamiento y disposición final de lodos aceitosos resultantes de los procesos de producción y extracción de crudo. *AAIQ | Asociación Argentina de Ingenieros Químicos*, 19.
- Pérez J., & Sánchez M. 2022. Contaminación por hidrocarburos: análisis crítico sobre políticas ambientales actuales en Cuba. *Revista Cubana Ciencias Ambientales*, 15 1, 22 40.
- Pérez, J. A., & Sánchez, M. A. (2022). *Impactos ambientales de las actividades industriales en manglares*. *Revista de Gestión Ambiental*, 15(3), 45-58.
- Ponce Contreras, D. S. (2014). *Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos*. (INGENIERO CIVIL), UNIVERSIDAD DEL BIO-BIO, Chile
- Rodríguez, P., Carvajal, Gallo, & Peñuela. (2012). Comparación entre bioestimulación y bioaumentación para la recuperación de suelos contaminados con diesel. *Producción + Limpia*, 7, 108.
- Romero Silva , R., Campos Rodríguez, R., Núñez Clemente, A. C., Díaz Díaz, M. A., Miller Palmer, S., Laffita Rivera, C., . . . Sánchez Sotolongo, E. (2011). *Proceso de biorremediación como alternativa de gran eficiencia en el tratamiento de lodos y cortes de perforación*. Paper presented at the IX CONGRESO CUBANO DE GEOLOGÍA (GEOLOGIA'2011), Cuba.
- Sandoval Herazo, E. J., & Lizardi Jiménez, M. A. (2019, enero-febrero). Hidrocarburos: contaminación en el Caribe mexicano. *Revista Digital Universitaria*, 20, 11.
- Semanticscholar. (2020). *Hidrocarburos: contaminación en el Caribe mexicano*. Recuperado de <https://www.semanticscholar.org/paper/c5c68aa0029c383617aa71bd8e9be97fcc5e988c>
- Semanticscholar. (2023). *Contaminación por hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y especies marinas: revisión*. Recuperado de <https://www.semanticscholar.org/paper/02f684adcec4453f7416b27f0da59287001c0f85>
- Semanticscholar. (2024). *Contaminación por TPH en las Masas de Aguas Superficiales en las Quebradas los Monos y Caigua, Municipio de Villa Montes, Bolivia*. Recuperado de <https://www.semanticscholar.org/paper/ba1b329cc506acb6b17039634bd2f8bc3b2205c6>
- Silva Gutsens, A., & Díaz Rodríguez, Y. (2023). Alternativa de reúso para cortes de perforación contaminados con diésel. *INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL, XLIV*.
- Silva, R., Peralta, S., & Rangel, F. (2016). Biorremediación a lodos petrolizados generados de la limpieza de tanques. *Medio Ambiente y Desarrollo; Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente*.
- Zhang, Y., Chen, L., & Chen, G. (2004). *Distribution and accumulation of petroleum hydrocarbons in mangrove sediments from the Jiulong River Estuary, China*. *Marine Pollution Bulletin*, 48(9-10), 797-806.
- Zhaoa, C., Donga, Y., Yupenga, F., Yuzhonga, L., & Dong, Y. (2019). Thermal desorption for remediation of contaminated soil: A review. [Desorción térmica para la remediación de suelos contaminados: una revisión]. *Chemosphere*, 221, 855.

En este artículo no existe conflicto de interes entre los autores.

