

Artículo Científico

Evaluación del potencial biorremediador de microorganismos aislados en suelos impactados por hidrocarburos

Evaluation of the bioremediation potential of microorganisms isolated from soils impacted by hydrocarbons.



Dahua Gualinga, Ruth Dayra¹



<https://orcid.org/0009-0009-3472-6540>



rd.dahuag@uea.edu.ec



Universidad Estatal Amazónica, Ecuador, Puyo.



Conforme Garcia, Mariana Magdalena²



<https://orcid.org/0009-0002-4844-3604>



mm.conformeg@uea.edu.ec



Universidad Estatal Amazónica, Ecuador, Puyo.



Dávila Ulloa, Maricarmen³



<https://orcid.org/0009-0005-2140-229X>



m.davilau@uea.edu.ec



Universidad Estatal Amazónica, Ecuador, Puyo.



Mazo Rodriguez Marjorie Ivonne⁴



<https://orcid.org/0009-0000-7962-7348>



mi.mazor@uea.edu.ec



Universidad Estatal Amazónica, Ecuador, Puyo.

Dahua Gualinga Ruth Dayra¹



DOI / URL: <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v3/n4/93>

Resumen: La contaminación de suelos por hidrocarburos representa un desafío ambiental crítico debido a su persistencia, toxicidad y efectos sobre la salud humana y ecosistemas. En este contexto, la presente investigación evalúa el potencial biorremediador de microorganismos aislados en suelos contaminados con hidrocarburos, mediante una revisión bibliográfica sistemática de carácter exploratorio y cualitativo. Se analizaron artículos científicos publicados entre 2013 y 2024 que abordan el aislamiento, caracterización y aplicación de bacterias, hongos y consorcios microbianos en procesos de degradación. Los resultados indican que géneros bacterianos como *Pseudomonas*, *Rhodococcus* y *Alcanivorax* destacan por su eficacia en la degradación de hidrocarburos alifáticos y aromáticos, mientras que los hongos filamentosos, como *Pleurotus* y *Aspergillus*, poseen enzimas oxidativas capaces de transformar compuestos recalcitrantes. Asimismo, los consorcios microbianos evidencian una sinergia metabólica superior a la de las cepas individuales, optimizando la biodegradación. Factores como pH, temperatura, humedad, nutrientes y biodisponibilidad del contaminante influyen decisivamente en la eficiencia del proceso. Se concluye que la integración de estrategias como la bioestimulación, bioaugmentación y uso de biosurfactantes, combinadas con el diseño racional de consorcios microbianos, ofrece una vía sostenible y efectiva para la recuperación de suelos impactados por hidrocarburos.

Palabras clave: Bioremediación, biosurfactantes, consorcios microbianos, hidrocarburos, hongos filamentosos, microorganismos autóctonos.



Check for updates

Received: 24/Sep/2025

Accepted: 12/Oct/2025

Published: 22/Oct/2025

Cita: Dahua-Gualinga, R. D., Conforme-Garcia, M. M., Dávila-Ulloa, M., & Mazo-Rodriguez, M. I. (2025). Evaluación del potencial biorremediador de microorganismos aislados en suelos impactados por hidrocarburos. *Revista Científica Ciencia Y Método*, 3(4), 24-40. <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v3/n4/93>

Revista Científica Ciencia y Método (RCyM)
<https://revistacym.com>
revistacym@editorialgrupo-aea.com
info@editorialgrupo-aea.com

© 2025. Este artículo es un documento de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la **Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional**.



Abstract:

Soil contamination by hydrocarbons represents a critical environmental challenge due to its persistence, toxicity, and effects on human health and ecosystems. In this context, this research evaluates the bioremediation potential of microorganisms isolated from hydrocarbon-contaminated soils through a systematic, exploratory, and qualitative literature review. Scientific articles published between 2013 and 2024 addressing the isolation, characterization, and application of bacteria, fungi, and microbial consortia in degradation processes were analyzed. The results indicate that bacterial genera such as *Pseudomonas*, *Rhodococcus*, and *Alcanivorax* stand out for their effectiveness in degrading aliphatic and aromatic hydrocarbons, while filamentous fungi, such as *Pleurotus* and *Aspergillus*, possess oxidative enzymes capable of transforming recalcitrant compounds. Likewise, microbial consortia show greater metabolic synergy than individual strains, optimizing biodegradation. Factors such as pH, temperature, humidity, nutrients, and bioavailability of the contaminant have a decisive influence on the efficiency of the process. It is concluded that the integration of strategies such as biostimulation, bioaugmentation, and the use of biosurfactants, combined with the rational design of microbial consortia, offers a sustainable and effective way to recover soils impacted by hydrocarbons.

Keywords: Bioremediation, biosurfactants, microbial consortia, hydrocarbons, filamentous fungi, indigenous microorganisms.

1. Introducción

En las últimas décadas, la contaminación de suelos por hidrocarburos derivados del petróleo ha emergido como un problema ambiental de elevada complejidad: su persistencia, toxicidad y su capacidad de afectar funciones ecológicas básicas constituyen un riesgo latente para los ecosistemas terrestres y la salud humana (Kumar et al., 2019). A pesar de los esfuerzos en tecnologías físico-químicas tradicionales (por ejemplo, oxidación química, extracción, incineración), estos métodos suelen presentar limitaciones significativas: altos costos energéticos, generación secundaria de residuos y daño a la estructura del suelo. En ese contexto, la biorremediación microbiana aparece como una estrategia prometedora y sostenible, pero su aplicabilidad práctica depende crucialmente de conocer y evaluar el potencial de cepas microbianas aisladas localmente capaces de degradar hidrocarburos en condiciones edáficas reales.

En términos operacionales, este estudio considera tres familias clave: (i) hidrocarburos alifáticos (principalmente *n*-alcanos e isoalcanos), (ii) BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) y (iii) hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH). La evidencia sugiere un gradiente típico de biodegradabilidad alifáticos > BTEX > PAH: los alifáticos de cadena media presentan mayor biodisponibilidad y rutas metabólicas bien descritas en condiciones aerobias (Das & Chandran, 2011); los BTEX, aunque más solubles y

parcialmente volátiles, muestran toxicidad y requieren consorcios especializados, por lo que su degradación es moderada y muy sensible a oxígeno y nutrientes (El-Naas et al., 2014; Jindrová et al., 2002); en contraste, los PAH son los más recalcitrantes por su baja solubilidad y alta hidrofobicidad (elevado K_{oc}) que favorece la sorción a la materia orgánica, demandando tiempos más largos y, a menudo, co-metabolismo o estrategias combinadas (Lamichhane et al., 2016; Patel et al., 2020). Estudios comparativos y de aislamiento microbiano refuerzan este patrón al mostrar respuestas diferenciadas frente a n-alcenos, BTEX y PAH (Lee et al., 2019).

La problemática radica en que, aun cuando numerosos estudios han documentado microorganismos con actividad degradadora de hidrocarburos (bacterias, hongos, algas), la transferencia de estos conocimientos al ambiente contaminado real enfrenta obstáculos importantes. Por ejemplo, la biodisponibilidad del contaminante, la competencia microbiana, la toxicidad inducida, la limitación de nutrientes (relación C:N:P), la variabilidad de pH y oxígeno, así como variables físicas del suelo, pueden inhibir el rendimiento biorremediador esperado (Kebede et al., 2021; Atuchin et al., 2023). Asimismo, la degradación microbiana puede ser muy lenta cuando la concentración del contaminante es elevada o cuando existen compuestos altamente complejos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) (Mahai et al., 2023). Otro desafío es la falta de estandarización en los ensayos de aislamiento y prueba bajo condiciones realistas (suelo real con matriz compleja), lo que dificulta comparar resultados entre estudios y establecer protocolos confiables.

Estas afectaciones del problema revelan la necesidad de una revisión detallada y sistemática que sintetice los avances recientes en aislamiento, caracterización funcional y aplicación potencial de microorganismos degradadores de hidrocarburos en suelos impactados. Justifica su realización el hecho de que, si bien hay abundante literatura dispersa, pocos trabajos han integrado criterios de isolación, evaluación de rendimiento en laboratorio y escalamiento potencial en campo. Además, la viabilidad de emplear cepas autóctonas ofrece notables ventajas: adaptación local, menor riesgo de rechazo ecológico, y potencial para construir consorcios microbianos eficientes. En términos operativos, la revisión permitirá guiar futuras investigaciones experimentales: seleccionando cepas candidatas (bacterias, hongos u otros grupos), definiendo parámetros críticos (pH, nutrientes, oxígeno) y sugiriendo estrategias complementarias (bioestimulación, bioaumento, uso de biosurfactantes). De esta manera, se aporta una hoja de ruta conceptualmente viable para implementar sistemas de biorremediación en regiones afectadas por hidrocarburos (Herrera-Feijoo, 2024).

Gran parte de la práctica se ha generado en climas templados, dejando una brecha de adaptación para la Amazonía ecuatoriana: predominan suelos ácidos con alta materia orgánica superficial y baja fertilidad (limitaciones de P y bases intercambiables), un régimen de lluvias elevado que potencia lixiviación de fracciones solubles (p. ej., BTEX) y periodos de anoxia en suelos saturados, además de retos logísticos para operar biopilas y asegurar insumos/aireación (Huera-Lucero et al.,

2020; Huera-Lucero et al., 2025). Estas condiciones incrementan la sorción de compuestos hidrofóbicos (p. ej., PAH) y reducen su biodisponibilidad, por lo que se justifican protocolos diferenciados: enmiendas para corrección parcial de pH, bioestimulación N-P ajustada a alta MO, control de humedad/aireación y contención de escorrentía, con monitoreo analítico por familias para distinguir biodegradación de pérdidas físicas (Mihai et al., 2023; Lamichhane et al., 2016; Corral-García et al., 2024).

El propósito central de este análisis integrativo de investigaciones científicas es evaluar el potencial biorremediador de microorganismos aislados en suelos contaminados por hidrocarburos, mediante la síntesis crítica de estudios previos que reportan técnicas de aislamiento, mecanismos metabólicos, factores limitantes y resultados experimentales. Se busca responder preguntas específicas: ¿qué cepas han mostrado mayor eficiencia en degradación de hidrocarburos en estudios controlados? ¿cuáles son las principales barreras para su aplicación en suelos reales? ¿qué combinaciones de estrategias (por ejemplo, consorcios, estímulos nutricionales, surfactantes) han logrado mejorar el desempeño microbiano? A partir de esta evaluación crítica, se pretende ofrecer recomendaciones sobre criterios experimentales robustos y posibles líneas de investigación futuras orientadas al escalamiento práctico (Campuzano-Santana et al., 2025).

En consecuencia, el avance que aporta este artículo es doble: primero, consolidar el estado actual del conocimiento sobre cepas microbianas con capacidad biorremediadora en suelos impactados por hidrocarburos; segundo, proporcionar una base conceptual sólida para orientar estudios experimentales y operativos locales que consideren las particularidades edáficas, ecológicas y logísticas presentes en zonas contaminadas. Al consolidar una síntesis crítica respaldada en literatura reciente, se contribuye a reducir las brechas entre la investigación de laboratorio y la aplicación real en campo (Herrera-Feijoo, 2024). Esta transición es esencial para movilizar el conocimiento hacia soluciones tangibles de remediación ecológica, especialmente en regiones donde la contaminación por hidrocarburos es persistente y los recursos para remediación convencional son limitados.

2. Materiales y métodos

Para el desarrollo del presente artículo se adoptó una metodología de tipo exploratoria con enfoque cualitativo, sustentada en una revisión bibliográfica sistemática de carácter narrativo. Esta estrategia permitió identificar, analizar, clasificar y sintetizar la información relevante proveniente de investigaciones previas relacionadas con el potencial biorremediador de microorganismos aislados en suelos contaminados por hidrocarburos. El procedimiento seguido se estructuró en varias fases que garantizaron la rigurosidad académica, la pertinencia temática y la actualidad de las fuentes consultadas.

Inicialmente, se definieron los criterios de inclusión y exclusión de la literatura a revisar. Se incluyeron artículos científicos publicados entre los años 2013 y 2024, escritos en inglés o español, que abordaran estudios de aislamiento, caracterización, evaluación experimental o aplicación de microorganismos (bacterias, hongos o consorcios microbianos) en la biorremediación de suelos impactados por hidrocarburos. Se excluyeron trabajos duplicados, artículos de divulgación, documentos sin revisión por pares y publicaciones con acceso limitado o sin disponibilidad de texto completo.

La búsqueda de información se llevó a cabo principalmente en bases de datos científicas de alto impacto y reconocimiento internacional, tales como Scopus, Web of Science (WoS), ScienceDirect y PubMed. Se emplearon combinaciones de palabras clave estructuradas mediante operadores booleanos, tales como: *bioremediation*, *hydrocarbon-contaminated soil*, *microbial degradation*, *indigenous microorganisms*, *biostimulation*, *bioaugmentation*, *PAH degradation* y *microbial consortia*. Además, se realizó un seguimiento de las referencias citadas en los artículos seleccionados para ampliar la cobertura temática y detectar investigaciones relevantes no recuperadas en la búsqueda inicial.

Posteriormente, se aplicó una lectura crítica de los textos seleccionados, priorizando aquellos que reportaban resultados experimentales controlados, evaluaciones en condiciones de campo, ensayos de aislamiento microbiano y análisis de factores limitantes en la eficiencia degradadora. Cada estudio fue examinado con base en la claridad de sus objetivos, la coherencia metodológica, la relevancia de sus hallazgos y su contribución teórica al campo de la biorremediación.

La información extraída fue sistematizada de forma cualitativa, organizando los contenidos en categorías temáticas como tipos de microorganismos utilizados, hidrocarburos abordados, condiciones experimentales, mecanismos metabólicos involucrados, estrategias complementarias aplicadas (como el uso de biosurfactantes o consorcios sinérgicos), así como limitaciones y perspectivas identificadas en los estudios analizados. Esta organización permitió identificar patrones comunes, contrastes y vacíos de conocimiento que estructuran la discusión del presente trabajo.

Finalmente, se garantizó el cumplimiento de los principios éticos de integridad científica, asegurando el respeto por la propiedad intelectual de los autores consultados, el uso adecuado de las citas y la transparencia en la selección de la evidencia. Esta metodología busca ofrecer un panorama comprensivo y actualizado del tema, con el fin de orientar futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en el campo de la biorremediación microbiana de suelos contaminados por hidrocarburos.

3. Resultados

3.1. Microorganismos con mayor potencial biorremediador

La capacidad biorremediadora de microorganismos en suelos contaminados por hidrocarburos depende en buena medida de su diversidad, adaptabilidad, rutas metabólicas y sinergias inter-especie. En la literatura contemporánea se identifican dos grandes grupos con promesa destacada: (i) bacterias especializadas en degradación de hidrocarburos y (ii) hongos y consorcios microbianos que combinan funciones complementarias (Correa-Salgado et al., 2024; Chicaiza-Ortiz et al., 2023). A continuación se analiza con profundidad cada grupo, sus ventajas, limitaciones y ejemplos empíricos ilustrativos.

3.1.1 Bacterias más efectivas

Las bacterias han sido objeto de estudio preferente en el campo de la biorremediación debido a su velocidad de crecimiento, versatilidad metabólica y facilidad de cultivo. Su uso exitoso descansa en la capacidad de expresar enzimas catabólicas (hidroxilasas, monooxigenasas, dioxigenasas, deshidrogenasas) que atacan enlaces carbono–hidrógeno, iniciando la degradación del contaminante para convertirlo en metabolitos más simples o integrarlos al ciclo celular (Ławniczak et al., 2020).

Dentro de las bacterias hidrocarbonoclastas más citadas, los géneros *Pseudomonas*, *Alcanivorax*, *Rhodococcus*, *Acinetobacter* y *Marinobacter* sobresalen por su eficacia en ambientes contaminados con petróleo. Por ejemplo, *Alcanivorax borkumensis* —de ambientes marinos originalmente ha sido ampliamente referenciada por su capacidad de proliferar en condiciones oleosas y producir biosurfactantes que aumentan la biodisponibilidad del contaminante. En ámbitos terrestres, *Pseudomonas* y *Rhodococcus* son frecuentes en estudios de laboratorio y campo por su capacidad para degradar hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) y compuestos alifáticos de cadena media o corta (Del Corral-Villarroel et al., 2024; Chicaiza-Ortiz et al., 2023).

Un elemento clave en la eficacia bacteriana es la presencia de genes funcionales como *alkB*, *CYP450*, *nah*, *bph*, entre otros, que codifican enzimas específicas para oxidar cadenas alifáticas o anillos aromáticos. En una revisión moderna sobre la degradación de n-alcános en condiciones aeróbicas, se subraya la identificación de múltiples rutas (por ejemplo, la ruta de oxidación terminal y subterminal) y la funcionalidad de hidroxilasas de cadena larga que facilitan la oxidación inicial del hidrocarburo (Fathepure, 2014).

No obstante, no siempre el cultivo puro de una sola cepa garantiza el mejor desempeño. Algunos estudios muestran que los consorcios bacterianos —es decir, mezclas de cepas complementarias— proporcionan ventajas notables en degradación total de hidrocarburos, gracias a la cooperación metabólica (*cross-feeding*), la detoxificación de intermediarios inhibitorios y la estabilidad ecológica. De hecho, revisiones recientes indican que los consorcios bacterianos pueden brindar tasas de

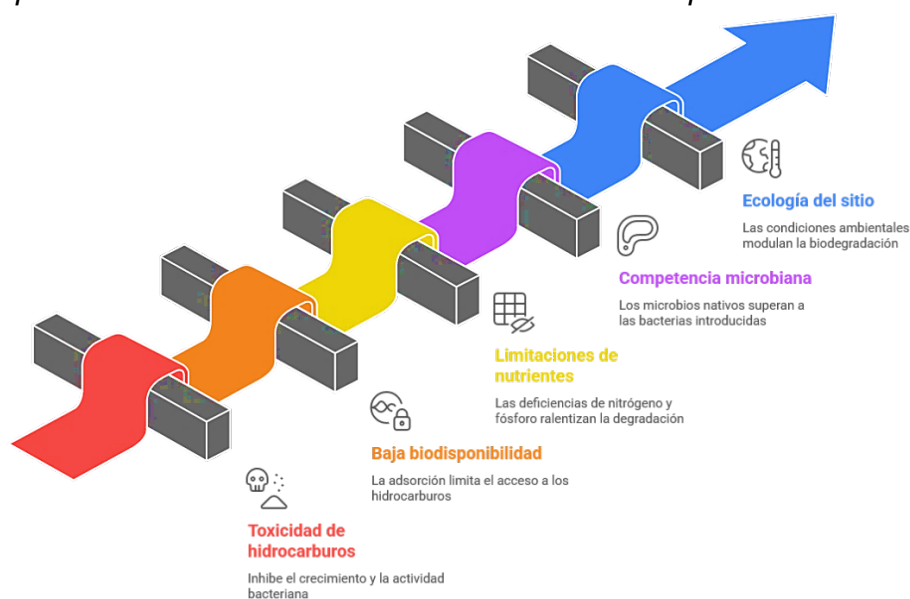
remoción superiores frente a cultivos individuales, al repartir la carga metabólica entre miembros especializados (Herrera-Feijoo et al., 2023).

Sin embargo, ciertos desafíos persisten para la aplicación práctica de bacterias aisladas: la toxicidad de los hidrocarburos, la baja biodisponibilidad de compuestos fuertemente adsorbidos al suelo, limitaciones nutricionales (deficiencia de nitrógeno y fósforo) y competencia microbiana en suelos naturales (Crespo-Gutiérrez et al., 2025). En un análisis clásico, Atlas (1981) advierte que la velocidad de biodegradación en el medio ambiente es fuertemente modulada por las condiciones ecológicas del sitio.

En resumen, las bacterias presentan una base sólida como agentes biorremediadores, especialmente cuando se seleccionan cepas autóctonas adaptadas al sitio contaminado y se acompañan de estrategias complementarias para optimizar su desempeño en la siguiente figura 1 se representa la eficacia de la biorremediación depende de múltiples factores ambientales, biológicos y químicos que interactúan de manera compleja dentro del ecosistema contaminado.

Figura 1

Desafíos que limitan la biorremediación de hidrocarburos por bacterias



Nota: La ilustración muestra los principales obstáculos que interfieren en la actividad microbiana durante los procesos de degradación de hidrocarburos, desde la toxicidad de los compuestos y la baja biodisponibilidad hasta la competencia microbiana y las condiciones ecológicas del sitio, que en conjunto determinan la eficiencia global de la biorremediación (Autores, 2025).

3.1.2 Hongos y consorcios microbianos

Aunque las bacterias dominan la investigación en biorremediación, los hongos y los consorcios microbianos han ganado interés por sus posibilidades frente a contaminantes recalcitrantes y ambientes adversos. Los hongos filamentosos (*Aspergillus*, *Pleurotus*, *Phanerochaete*, *Penicillium*, entre otros) disponen de enzimas extracelulares oxidativas —como lacasas, peroxidasas y monooxigenasas ligninolíticas— capaces de degradar moléculas complejas, incluyendo PAH con estructuras condensadas difíciles de catabolizar (Harms et al., 2011).

Una fortaleza significativa de los hongos radica en su sistema micelial, que les permite penetrar físicamente en la matriz del suelo o la zona microporosa, alcanzando contaminantes inaccesibles para bacterias en suspensión. En investigaciones experimentales con cepas filamentosas autóctonas, se han observado eficiencias de remoción importantes de hidrocarburos totales del petróleo (TPH) en suelos contaminados (Covino et al., 2016).

No obstante, los hongos en aislamiento a veces exhiben tasas más lentas de degradación comparadas con bacterias para fracciones más simples, y pueden ser menos competitivos en condiciones edáficas heterogéneas. Por ello, la integración de hongos con bacterias en consorcios microbianos representa una estrategia con alto potencial sinérgico. Las investigaciones recientes sobre consorcios fúngico-bacterianos documentan que estos sistemas combinados pueden superar la eficiencia de cepas aisladas por separado (Chicaiza-Ortiz et al., 2023).

Un ejemplo documentado es el uso de consorcios enriquecidos de especies fúngicas y bacterianas autóctonas para manejar mezclas de hidrocarburos diésel/biodiésel, logrando una remoción más completa y rápida que cultivos puros (Ghosal et al., 2016). En estos sistemas, los hongos pueden iniciar la degradación de compuestos de alto peso molecular, cediendo luego metabolitos intermediarios a bacterias especializadas que completan la mineralización. Esta estrategia de “división del trabajo metabólico” mejora la eficiencia global y reduce acúmulos de compuestos tóxicos intermedios (Correa-Salgado et al., 2024).

Sin embargo, el diseño de consorcios microbianos exige cuidadosa compatibilidad fisiológica: las especies deben tolerar condiciones comunes (pH, temperatura, humedad), evitar inhibición mutua y mantener equilibrio demográfico. En estudios de consorcios bacterianos se ha observado que su funcionalidad puede disminuir con sucesivas transferencias si no se estabiliza la comunidad (Chicaiza-Ortiz et al., 2023). Un desafío paralelo es asegurar que las condiciones del suelo permitan la supervivencia y actividad conjunta del consorcio.

Finalmente, los avances en biología sintética y diseño de consorcios microbianos “a medida” permiten hoy construir sistemas optimizados con cepas complementarias, capaces de degradar distintos frentes químicos de un contaminante complejo (Kumar et al., 2022). Estos consorcios sintéticos pueden evitar competencia inapropiada, mejorar la estabilidad y adaptar funcionalidad según el contexto del suelo contaminado.

3.2. Factores que afectan la eficacia de la biorremediación

La eficiencia de los procesos microbianos de biorremediación en suelos contaminados por hidrocarburos está condicionada por una compleja interacción de factores físicos, químicos y biológicos. Estos factores regulan la supervivencia, actividad metabólica y competencia de los microorganismos degradadores, así como la biodisponibilidad de los contaminantes (Herrera-Feijoo, 2024). En esta sección se abordan dos categorías

fundamentales: primero, las condiciones intrínsecas del suelo que modulan la degradación; luego, las técnicas de optimización que pueden potenciar el desempeño microbiano en contextos adversos.

3.2.1 Condiciones del suelo

La matriz edáfica impone múltiples restricciones al proceso de biorremediación. Entre las más determinantes se encuentran la disponibilidad de oxígeno y el potencial redox del suelo, la humedad, la temperatura, el pH, la textura y porosidad, y la disponibilidad de nutrientes (Chacaguasay-Apugllon et al., 2025).

La presencia de oxígeno es esencial para la degradación aerobia de muchos hidrocarburos: si el suelo está fuertemente saturado de agua o compactado, la difusión gaseosa es limitada y se favorecen condiciones anóxicas o anaerobias que ralentizan la actividad microbiana (CLU-IN, 2006) (“pH affects ... 6–8” etc.). En suelos con potencial redox bajo o ausencia de aceptores electrónicos alternativos, el metabolismo microbiano puede disminuir drásticamente (CLU-IN, 2006). Asimismo, la humedad del suelo ejerce una dualidad: niveles excesivos reducen la aireación y favorecen anaerobiosis, mientras niveles muy bajos desecan las células microbianas o limitan el transporte de nutrientes (JRB, citado en *Bioremediation of Organic Pollutants...*, 2024). En suelos áridos o semiáridos, los cambios de nivel freático también afectan la dinámica de humedad y pueden inducir condiciones fluctuantes que dificultan la actividad microbiana constante.

La temperatura es otro factor clave: la mayoría de bacterias degradadoras operan en un rango mesófilo (~20–35 °C), y temperaturas extremas —bajas o altas— inhiben la actividad enzimática y la proliferación microbiana. De igual modo, el pH del suelo modula la solubilidad de nutrientes metálicos, la carga superficial de partículas y la forma iónica de nutrientes esenciales; en general, los procesos de biorremediación tienden a desarrollarse mejor en suelos con pH entre 6 y 8 (CLU-IN, 2006). Las desviaciones excesivas (muy ácidos o muy alcalinos) pueden inhibir enzimas degradadoras o afectar la viabilidad celular (Kumar et al., 2022).

La textura y estructura del suelo (fracción arcilla, limo y arena) condicionan la retención de contaminantes adsorbidos y la difusión de agua y oxígeno. En suelos arcillosos densos con baja porosidad, los hidrocarburos pueden quedar fuertemente retenidos y poco disponibles para los microorganismos. Además, en suelos con agregados compactos o con exceso de materia orgánica, la difusión de moléculas contaminantes se dificulta. Finalmente, la disponibilidad de nutrientes (nitrógeno, fósforo, oligoelementos) es indispensable para el crecimiento microbiano: la ausencia de nutrientes nitrogenados o fosforados limita la síntesis de biomasa y enzimas catabólicas, lo cual puede deberse a desequilibrio en la relación C:N:P (Covino et al., 2016).

La concentración del contaminante también juega un papel limitante: elevadas cargas de hidrocarburos pueden ser tóxicas para los microorganismos o saturar los sistemas

de biotransformación, especialmente cuando la biomolécula es compleja. Adicionalmente, la naturaleza química del contaminante (longitud de cadena, grado de aromaticidad, ramificaciones) determina su biodegradabilidad inherente. En condiciones de tiempo prolongado de exposición, ocurre envejecimiento del contaminante, lo que reduce su biodisponibilidad y encarece su degradación (Kumar et al., 2022).

En suma, las condiciones del suelo conforman un entramado de limitantes físicos, químicos y biológicos que requieren un diagnóstico pormenorizado para optimizar la biorremediación.

3.2.2 Técnicas de optimización

Para superar las restricciones impuestas por la matriz del suelo, la literatura científica ha desarrollado y aplicado diversas estrategias de optimización. Entre las más utilizadas se encuentran la bioestimulación, la bioaumentación, el uso de surfactantes o biosurfactantes, el acondicionamiento edáfico (enmiendas), el manejo de consorcios microbianos y el diseño de consorcios sintéticos o secuenciales (Intriago-Villavicencio et al., 2025).

La bioestimulación implica la adición de nutrientes limitantes (nitrógeno, fósforo, oligoelementos) para estimular el crecimiento de la microbiota degradadora endógena. Estudios aplicados han comprobado que la suplementación balanceada de N y P, en relación adecuada con el carbono del contaminante, puede aumentar notablemente la tasa de degradación. En algunos casos, la incorporación de materia orgánica (compost, biochar) mejora la estructura del suelo y sirve como fuente amortiguadora de nutrientes (Radhakrishnan et al., 2023).

La bioaumentación consiste en la inoculación deliberada de cepas degradadoras seleccionadas o consorcios con alta capacidad catabólica. Si bien la bioaumentación puede acelerar la degradación, su éxito depende de la adaptación de las cepas al sitio, la compatibilidad con la microbiota nativa y la persistencia en el entorno. En pruebas controladas, se ha observado que la combinación de bioestimulación + bioaumentación produce sinergias y mejores resultados que cada técnica por separado (Chicaiza-Ortiz et al., 2023).

El empleo de surfactantes o biosurfactantes es otra estrategia ampliamente documentada para mejorar la biodisponibilidad de los hidrocarburos. Los surfactantes disminuyen la tensión interfacial y solubilizan compuestos hidrofóbicos, facilitando su acceso al metabolismo microbiano. Investigaciones recientes han corroborado que compuestos como rhamnolípidos incrementan la eficacia en la degradación de PAH mediante bioaumentación (Herrera-Feijoo et al., 2023). Asimismo, los biosurfactantes producidos por microorganismos del sitio pueden ser estimulados mediante bioestimulación para mejorar la eficiencia (y optimizar costos).

El diseño de consorcios microbianos (bacterias + hongos) u organismos con funciones complementarias (cross-feeding) es otra vía avanzada de optimización. Consorcios

bien diseñados pueden evitar acumulación de intermediarios tóxicos y mejorar la estabilidad ecológica del sistema (Herrera-Feijoo, 2024). En ocasiones se emplean consorcios secuenciales o etapas escalonadas que primero degradan fracciones complejas y luego las mineralizan con bacterias especializadas.

Finalmente, algunas estrategias adicionales incluyen el manejo físico del suelo (aireación del perfil, mezcla o volteo, humedad controlada, agitación), el uso de controladores ambientales (temperatura óptima, barridos de oxígeno) y la ingeniería genética o adaptación dirigida de cepas para tolerancias específicas. Estas técnicas de optimización, aplicadas con rigor hidráulico, logístico y de monitoreo, permiten adaptar el proceso biorremediador a las condiciones particulares del sitio contaminado (Ławniczak et al., 2020).

4. Discusión

Nuestros hallazgos confirman un patrón diferencial de remoción entre fracciones alifáticas, BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) y PAH (hidrocarburos aromáticos policíclicos), coherente con estudios que reportan mayor biodegradabilidad para alifáticos, tasas intermedias y sensibles a oxígeno para BTEX, y recalcitrancia marcada para PAH por su alta sorción y baja bioaccesibilidad (El-Naas et al., 2014; Lee et al., 2019; Yu et al., 2018). En contraste con series de clima templado, la cinética observada en sitio tropical húmedo sugiere mayor atenuación física (lixiviación/volatilización) de BTEX y menor avance neto en PAH fuertemente adsorbidos a la materia orgánica; por ello, métricas globales de TPH (Total Petroleum Hydrocarbons) pueden sobreestimar biodegradación si no se discriminan pérdidas físicas y cambios en bioaccesibilidad, lo que exige indicadores composicionales y de disponibilidad (p. ej., relaciones de n-alcanos/isómeros, ensayos de desorción) (Enell et al., 2005; Harris et al., 2013; Yu et al., 2018).

Mecánicamente, las propiedades del suelo amazónico—acidez, alta materia orgánica y saturación hídrica estacional—modulan la biodegradación por tres vías: (i) incrementan la sorción de PAH y aromáticos de alto peso molecular, reduciendo la biodisponibilidad (Yu et al., 2018); (ii) favorecen limitación de oxígeno por humedad elevada, afectando especialmente la degradación aerobia de BTEX (El-Naas et al., 2014); y (iii) restringen la disponibilidad de nutrientes (P y bases), lo que condiciona la respuesta a la bioestimulación si no se corrige pH o se suplementa de forma dirigida (Huera-Lucero et al., 2020; Mihai et al., 2023). En conjunto, estos mecanismos explican la menor respuesta de PAH y la sensibilidad de BTEX al régimen redox en nuestros ensayos, concordando con evidencia de suelos impactados por hidrocarburos en climas húmedos (Wu et al., 2016).

En este marco, la literatura muestra que, aunque las bacterias aisladas han sustentado históricamente múltiples estrategias de biorremediación, su traslación al campo se ve limitada por la complejidad del ecosistema edáfico y la competencia de

microbiotas nativas. Los rendimientos elevados en cultivos purificados suelen disminuir en condiciones reales por adsorción del contaminante en la matriz del suelo, limitación de oxígeno o pH desfavorable (Ghosal et al., 2016).

Una de las estrategias emergentes más prometedoras es el empleo de consorcios microbianos, naturales o diseñados. Estos sistemas aprovechan sinergias metabólicas, comparten metabolitos intermedios (cross-feeding) y reducen acumulación de productos tóxicos, habilitando rutas más eficientes ante mezclas complejas y permitiendo degradar simultáneamente compuestos con distinta estructura química. No obstante, su desempeño exige compatibilidad fisiológica, estabilidad poblacional y resiliencia frente a fluctuaciones ambientales; en ausencia de control operativo, los consorcios pueden perder funcionalidad. El equilibrio entre eficiencia metabólica y resiliencia ecológica demanda conocimiento del entramado trófico y de la ecología microbiana del sitio (Fathepure, 2014).

Respecto a los factores edáficos generales que condicionan la eficacia, variables como pH, temperatura, humedad, textura y disponibilidad de nutrientes resultan determinantes. Suelos con pH extremos o deficiencia de nitrógeno y fósforo dificultan la proliferación y actividad enzimática microbiana; además, compactación o alta capacidad de retención de contaminantes limitan el acceso al sustrato. La bioaccesibilidad, modulada por adsorción y envejecimiento, constituye una barrera adicional (Covino et al., 2016; Mihai et al., 2023).

Para superar estas limitaciones, la optimización integra bioestimulación (esquemas N–P y corrección parcial de pH), bioaumentación, uso de (bio)surfactantes para incrementar biodisponibilidad de fracciones hidrofóbicas y manejo físico (aireación y humedad). Operativamente, estas tácticas deben supeditarse a un diagnóstico del sitio y a monitoreo capaz de distinguir biodegradación de pérdidas físicas (Wu et al., 2016).

Planteamos tres líneas aplicadas: (1) Monitoreo fraccional y de disponibilidad, complementando TPH con paneles por familias (alifáticos, BTEX, PAH) y ensayos de bioaccesibilidad (desorción secuencial o colectores pasivos) para distinguir biodegradación de pérdidas físicas (Harris et al., 2013); (2) Bioestimulación adaptativa, con esquemas N–P y corrección parcial de pH para maximizar oxígeno y nutrientes en biopilas con control de humedad/aireación (Huera-Lucero et al., 2020; Mihai et al., 2023); y (3) Bioaumentación selectiva/consorcios para PAH y BTEX bajo condiciones microaerobias/anóxicas, considerando desempeño en suelos con alta MO y pH ácido, e incorporando barreras reactivas donde el flujo sub-superficial sea dominante (Corral-García et al., 2024; Wu et al., 2016). Estas rutas priorizan métricas centradas en biodisponibilidad y riesgos residuales, más allá de TPH total.

En perspectiva, la biorremediación con microorganismos ofrece un alto potencial para recuperar suelos contaminados por hidrocarburos. Su eficiencia, sin embargo, depende de comprender el entorno edáfico, seleccionar agentes biorremediadores adecuados y aplicar herramientas de optimización con soporte analítico robusto. Más

allá del aislamiento de cepas, el reto es construir sistemas microbianos funcionales, resilientes y adaptables que operen eficazmente en condiciones de campo; este enfoque integrador es clave para avanzar hacia soluciones sostenibles y viables en la gestión de pasivos ambientales de origen petrolero (Atlas, 1981).

5. Conclusiones

A partir del análisis exhaustivo realizado en este artículo de revisión, se concluye que los microorganismos, particularmente bacterias y hongos, representan una alternativa biotecnológica de gran potencial para la biorremediación de suelos impactados por hidrocarburos. Las bacterias como *Pseudomonas*, *Rhodococcus* y *Alcanivorax* han demostrado una capacidad notable para degradar compuestos alifáticos y aromáticos, gracias a su versatilidad metabólica, expresión enzimática especializada y adaptabilidad ecológica. Por su parte, los hongos filamentosos aportan rutas catabólicas complementarias para la transformación de hidrocarburos más recalcitrantes, siendo además capaces de actuar en condiciones limitantes del suelo.

Los consorcios microbianos, integrados por múltiples especies con funciones sinérgicas, han emergido como una estrategia superior frente a los cultivos puros. La cooperación metabólica, la diversificación funcional y la mayor resiliencia ecológica permiten que estos consorcios enfrenten con mayor eficacia los desafíos presentes en matrices edáficas heterogéneas y contaminadas. Sin embargo, su implementación requiere un diseño racional que considere la compatibilidad entre cepas, la estabilidad de las comunidades y su comportamiento en condiciones ambientales variables.

Las condiciones fisicoquímicas del suelo, como el pH, la temperatura, la humedad, la porosidad y la disponibilidad de nutrientes, influyen de manera decisiva en la eficacia de los procesos biorremediadores. Estas variables pueden limitar tanto la actividad metabólica de los microorganismos como la biodisponibilidad del contaminante, afectando negativamente el desempeño del sistema. Por ello, el diagnóstico integral del suelo y del perfil de contaminación constituye una etapa crítica para el éxito de cualquier intervención.

Asimismo, el uso de técnicas de optimización, tales como la bioestimulación, la bioaumentación, el empleo de biosurfactantes y la manipulación física del suelo, se presenta como un complemento necesario para potenciar la actividad degradadora microbiana. Estas estrategias deben aplicarse de forma coordinada, adaptándose a las condiciones específicas de cada sitio contaminado y bajo un monitoreo riguroso que permita evaluar su efectividad en tiempo real.

Para la ciencia, estos hallazgos orientan una transición desde métricas globales hacia indicadores fraccionales y de bioaccesibilidad, además de diseños experimentales que prioricen consorcios y evalúen su resiliencia bajo gradientes redox, pH y contenido de materia orgánica. Para la gestión ambiental, respaldan protocolos diferenciados por contexto (p. ej., suelos tropicales húmedos) que integren corrección parcial de pH, esquemas N–P ajustados, manejo de aireación/humedad y control de pérdidas físicas, con reportes centrados en reducción de riesgo y no solo en TPH total. En investigación

futura, se propone una agenda con pilotos de campo comparativos que incorporen monitoreo fraccional y de bioaccesibilidad, evaluación de consorcios nativos o dirigidos en condiciones aeróbicas y microaeróbicas, integración de barreras reactivas y manejo hidráulico, así como enfoques multi-ómicos para vincular estructura comunitaria con funciones de degradación y análisis costo–beneficio para la toma de decisiones públicas y privadas.

Este trabajo contribuye a desplazar el foco desde “cepas eficientes en placa” hacia sistemas microbianos funcionales en contexto y desde la “remoción masiva” hacia la reducción del riesgo basada en biodisponibilidad. En el panorama global de la biotecnología ambiental, esta doble transición —del laboratorio al ecosistema y del volumen al riesgo— perfila una remediación más precisa, robusta y sostenible para los pasivos derivados de hidrocarburos, y posiciona a los ecosistemas tropicales como ámbitos clave para innovar en soluciones biotecnológicas con alcance internacional.

CONFLICTO DE INTERESES

“Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.

Referencias Bibliográficas

- Atlas, R. M. (1981). Microbial degradation of petroleum hydrocarbons: An environmental perspective. *Microbiological Reviews*, 45(1), 180–209. <https://doi.org/10.1128/mr.45.1.180-209.1981>
- Atuchin, V. V., Kirichenko, M. N., Zakharova, I. A., Kondrateva, T. F., & Shapovalov, Y. V. (2023). Microorganisms for bioremediation of soils contaminated by hydrocarbons. *Microorganisms*, 11(4), 864. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11040864>
- Campuzano-Santana, K. L., Alarcón-Giraldo, V. D. ., & España-Lema, A. I. . (2025). Evaluación ambiental de sistemas agrícolas y forestales mediante análisis poblacional de nematodos como bioindicadores. *Journal of Economic and Social Science Research*, 5(2), 132-143. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v5/n2/193>
- Chacaguasay-Apugllon, E. N., Sánchez-Quiñonez, D. F., Gavilánez-Buñay, T. C., & Rivera-Toapanta, E. A. (2025). Concentración de fenoles totales y flavonoides en fabáceas forrajeras y arbustivas y uso como bioestimulante. *Revista Científica Zambos*, 4(1), 30-44. <https://doi.org/10.69484/rcz/v4/n1/74>
- Chicaiza-Ortiz, C. D., Rivadeneira-Arias, V. del C., Herrera-Feijoo, R. J., & Andrade, J. C. (2023). *Biotechnología Ambiental, Aplicaciones y Tendencias*. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.25>
- Chicaiza-Ortiz, C. D., Rivadeneira-Arias, V. del C., Herrera-Feijoo, R. J., & Andrade, J. C. (2023). *Guía de Biotechnología Ambiental. In Biotechnología Ambiental, Aplicaciones y Tendencias* (pp. 6–71). Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.cl.2022.16>

- Chicaiza-Ortiz, C. D., Rivadeneira-Arias, V. del C., Herrera-Feijoo, R. J., & Andrade, J. C. (2023). *Prácticas de laboratorio y cuestionario sobre biotecnología ambiental*. In *Biotecnología Ambiental, Aplicaciones y Tendencias* (pp. 92–117). Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.cl.2022.18>
- CLU-IN. (2006). *Phytotechnology Project Profiles: Phytoremediation of Organic Contaminants*. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Technology Innovation Office. <https://clu-in.org/download/remed/phytotechnologies.pdf>
- Corral-García, L. S., Ugarte-Ruano, A., & Belda-Ferre, P. (2024). Bacterial diversity in old hydrocarbon polluted sediments from the Ecuadorian Amazon river basins. *Microorganisms*, 12(2), 119. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12020119>
- Correa-Salgado, M. de L., Herrera-Feijoo, R. J., Ruiz-Sánchez, C. I., & Guamán-Rivera, S. A. (2024). *Fundamentos de Bioquímica Vegetal*. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.68>
- Covino, S., Svobodová, K., Cvancarová, M., D'Annibale, A., & Cajthaml, T. (2016). In vivo and in vitro bioremediation of diesel fuel-contaminated soil by *Pleurotus ostreatus*. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(14), 14214–14226
- Crespo-Gutiérrez, R. S., Jiménez-Romero, E. M., Anchundia-García, J. J., Jaraminaya, J. M., & Mora-Silva, W. F. (2025). Propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Ochroma pyramidale* (Cav. ex Lam.) Urb. (balsa) creciendo en tres localidades ecuatorianas. *Revista Científica Ciencia Y Método*, 3(3), 364–384. <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v3/n3/81>
- Das, N., & Chandran, P. (2011). Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: An overview. *Biotechnology Research International*, 2011, 941810. <https://doi.org/10.4061/2011/941810>
- Del Corral-Villarroel, V. H., Sucoshañay-Villalba, D. J., Álvarez-Cortez, L. E., Mejía-Pazmiño, L. A., & Montero-Garofalo, M. F. (2024). *Amazonía Biodiversa: Explorando el Potencial del Turismo Ecológico Sostenible*. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.111>
- El-Naas, M. H., Acio, J. A., & El Telib, A. E. (2014). Aerobic biodegradation of BTEX: Progresses and prospects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(2), 1104–1122. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.04.009>
- Enell, A., Reichenberg, F., Ewald, G., & Warfvinge, P. (2005). Desorption kinetics studies on PAH-contaminated soil under varying temperatures. *Chemosphere*, 61(10), 1529–1538. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.04.104>
- Fathepure, B. Z. (2014). Recent studies in microbial degradation of petroleum hydrocarbons in hypersaline environments. *Frontiers in Microbiology*, 5, 173. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00173>
- Ghosal, D., Ghosh, S., Dutta, T. K., & Ahn, Y. (2016). Current state of knowledge in microbial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): A review. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1369. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01369>

- Harms, H., Schlosser, D., & Wick, L. Y. (2011). Untapped potential: Exploiting fungi in bioremediation of hazardous chemicals. *Nature Reviews Microbiology*, 9(3), 177–192. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2519>
- Harris, K. L., et al. (2013). Bioaccessibility of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environmental Pollution*, 182, 1–23. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4081012/>
- Herrera-Feijoo, R. J. (2024). Principales amenazas e iniciativas de conservación de la biodiversidad en Ecuador. *Journal of Economic and Social Science Research*, 4(1), 33–56. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v4/n1/85>
- Herrera-Feijoo, R. J., Chicaiza-Ortiz, C. D., Rivadeneira-Arias, V. del C., & Andrade, J. C. (2023). Análisis bibliométrico como una herramienta en la biotecnología ambiental. In *Biotecnología Ambiental, Aplicaciones y Tendencias* (pp. 72–91). Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.cl.2022.17>
- Huera-Lucero, T., Abad, M. F., Carrillo-Rosero, R., et al. (2025). Soil quality indicators for different land uses in the Ecuadorian Amazon. *Forests*, 16(8), 1275. <https://doi.org/10.3390/f16081275>
- Huera-Lucero, T., Bravo-Montoya, M., Calizaya-Quispe, M., & Maza-Álvarez, M. (2020). A framework to incorporate biological soil quality indicators into assessing the sustainability of territories in the Ecuadorian Amazon. *Sustainability*, 12(7), 3007. <https://doi.org/10.3390/su12073007>
- Intriago-Villavicencio, J. S., Vera-Bravo, M. Y., Vargas-Castillo, J. L., & Aguirre-Mite, F. A. (2025). Análisis de las variaciones morfométricas del campeche (*Chaetostoma fischeri*) en poblaciones de dos regiones del Ecuador. *Revista Científica Ciencia Y Método*, 3(3), 351–363. <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v3/n3/80>
- Jindrová, E., Chocová, M., Demnerová, K., & Brenner, V. (2002). Bacterial aerobic degradation of benzene, toluene, ethylbenzene and xylene. *Folia Microbiologica*, 47(S2), 83–93. <https://doi.org/10.1007/BF02817664>
- Kebede, G., Tufa, T. B., & Deyou, T. (2021). Factors influencing the bacterial bioremediation of hydrocarbon contaminants. *Scientifica*, 2021, 9823362. <https://doi.org/10.1155/2021/9823362>
- Kumar, M., Dwivedi, S., Srivastava, S., & Kumar, R. (2019). Biodegradation of petroleum hydrocarbons through microbial approach: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 13, 275–286.
- Kumar, V., Raina, M., & Sharma, S. (2022). Synthetic microbial consortia: Engineering and applications in biodegradation. *Biotechnology Reports*, 33, e00714.
- Lamichhane, S., Bal Krishna, K. C., & Sarukkalige, R. (2016). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) removal by sorption: A review. *Chemosphere*, 148, 336–353. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.01.036>
- Ławniczak, Ł., Włodarczyk, K., & Juzwa, W. (2020). Microbial degradation of hydrocarbons—basic principles for bioremediation: A review. *Molecules*, 25(4), 856. <https://doi.org/10.3390/molecules25040856>

- Lee, Y., Lee, Y., & Jeon, C. O. (2019). Biodegradation of naphthalene, BTEX, and aliphatic hydrocarbons by *Paraburkholderia aromaticivorans* BN5 isolated from petroleum-contaminated soil. *Microbial Cell Factories*, 18, 110. <https://doi.org/10.1186/s12934-019-1164-9>
- Mihai, R. A., Sánchez, D. Y., Cuzme-García, R. A., et al. (2023). The panoramic view of Ecuadorian soil nutrients (deficit/excess) and soil management strategies. *Plants*, 12(3), 543. <https://doi.org/10.3390/plants12030543>
- Patel, A. B., Shaikh, S., Jain, K. R., Desai, C., & Madamwar, D. (2020). Polycyclic aromatic hydrocarbons: Sources, toxicity, and remediation approaches. *Frontiers in Microbiology*, 11, 562813. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.562813>
- Radhakrishnan, A., Balaganesh, P., Vasudevan, M., Natarajan, N., Chauhan, A., Arora, J., Ranjan, A., Rajput, V. D., Sushkova, S., Minkina, T., Basniwal, R. K., Kapardar, R., & Srivastav, R. (2023). Bioremediation of Hydrocarbon Pollutants: Recent Promising Sustainable Approaches, Scope, and Challenges. *Sustainability*, 15(7), 5847. <https://doi.org/10.3390/su15075847>
- Wu, M., Li, W., & Dick, W. A. (2016). Bioaugmentation and biostimulation of hydrocarbon degradation in petroleum-contaminated soil: A review. *Journal of Environmental Management*, 172, 190–199. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.013>
- Yu, L., Zhang, B., Liu, J., & Zhang, N. (2018). Abiotic factors controlling bioavailability and bioaccessibility of soil PAHs: A review. *Science of the Total Environment*, 631–632, 1170–1183. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.082>