



Análisis bibliométrico global sobre bacterias degradadoras de hidrocarburos en suelos entre 2018 y 2025: tendencias taxonómicas, eficiencia de biorremediación y dinámicas ecológicas

Global bibliometric analysis of hydrocarbon-degrading bacteria in soils between 2018 and 2025: taxonomic trends, bioremediation efficiency, and ecological dynamics

Chavez-Cayo, Emmir Oswaldo^{1*}

¹Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú

Recibido: 02 Dic. 2025 | Aceptado: 18 Ene. 2026 | Publicado: 20 Ene. 2026

Autor de correspondencia*: echavezc@unjbg.edu.pe

Como citar este artículo: Chavez-Cayo, E. O. (2026). Análisis bibliométrico global sobre bacterias degradadoras de hidrocarburos en suelos entre 2018 y 2025: tendencias taxonómicas, eficiencia de biorremediación y dinámicas ecológicas. *Revista Amazónica de Ciencias Ambientales y Ecológicas*, 5(1), e1342. <https://doi.org/10.51252/reacae.v5i1.e1342>

RESUMEN

La creciente necesidad de estrategias sostenibles para tratar suelos contaminados por hidrocarburos justificó la realización de esta revisión, cuyo objetivo fue analizar bibliométricamente la producción científica global sobre bacterias degradadoras de hidrocarburos en suelos durante el periodo 2018–2025. Se aplicó una metodología de revisión sistemática-documental basada en la recopilación, depuración y normalización de cien artículos indexados en Scopus y Web of Science, cuyos metadatos fueron procesados mediante VOSviewer para evaluar patrones de colaboración, coocurrencia de palabras clave y tendencias temáticas. El análisis mostró que la investigación incrementó su producción a partir de 2020, destacándose líneas relacionadas con la bioaugmentación, el uso de consorcios autóctonos, biosurfactantes y biochar para mejorar la degradación de TPH y fracción diésel. Asimismo, géneros como *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhodococcus* y *Sphingomonas* presentaron las mayores frecuencias y conexiones temáticas. Los resultados también revelaron brechas vinculadas a la escasa estandarización de ensayos cinéticos y a la limitada validación en campo. En conclusión, la revisión permitió identificar tendencias, vacíos de conocimiento y oportunidades de investigación, confirmando la importancia de integrar enfoques microbianos, ecológicos y tecnológicos para optimizar la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos.

Palabras clave: bioaugmentación; biosurfactantes; consorcios microbianos; hidrocarburos del petróleo; suelos degradados

ABSTRACT

The growing need for sustainable strategies to treat hydrocarbon-contaminated soils justified this review, whose objective was to bibliometrically analyze the global scientific production on hydrocarbon-degrading bacteria in soils during the 2018–2025 period. A systematic and documentary review methodology was applied, based on the retrieval, depuration, and normalization of one hundred articles indexed in Scopus and Web of Science, whose metadata were processed using VOSviewer to evaluate collaboration patterns, keyword co-occurrence, and thematic trends. The analysis showed that research activity increased notably after 2020, highlighting lines focused on bioaugmentation, the use of autochthonous microbial consortia, biosurfactants, and biochar to enhance the degradation of TPH and diesel-range fractions. Likewise, genera such as *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhodococcus*, and *Sphingomonas* exhibited the highest frequencies and thematic linkages. The results also revealed research gaps related to the limited standardization of kinetic assays and the scarce validation of field-scale studies. In conclusion, this review identified trends, knowledge gaps, and research opportunities, confirming the relevance of integrating microbial, ecological, and technological approaches to optimize the bioremediation of hydrocarbon-contaminated soils.

Keywords: bioaugmentation; biosurfactants; microbial consortia; petroleum hydrocarbons; degraded soils



1. INTRODUCCIÓN

La contaminación de suelos por hidrocarburos derivados del petróleo constituye uno de los problemas ambientales más persistentes a escala global. La expansión de las actividades extractivas, el transporte y la manipulación de combustibles incrementa la acumulación de compuestos recalcitrantes en los ecosistemas terrestres, afectando su estructura fisicoquímica y biológica (Chen et al., 2024; Huang et al., 2024; Martirosyan et al., 2025). Estos contaminantes, que incluyen fracciones de hidrocarburos totales del petróleo (TPH) y diésel range organics (DRO), reducen la fertilidad del suelo, alteran las comunidades microbianas nativas y representan riesgos directos para la salud humana y la biota (Odion et al., 2025; Wang et al., 2025).

Frente a esta problemática, la biorremediación microbiana se posiciona como una estrategia eficaz, económica y ambientalmente compatible para la degradación de hidrocarburos. Esta tecnología aprovecha el potencial metabólico de bacterias autóctonas y consorcios microbianos que oxidan compuestos alifáticos y aromáticos, transformándolos en productos menos tóxicos (Zhu et al., 2025; Jaafar, 2025). Géneros como *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhodococcus* y *Sphingomonas* destacan por su versatilidad metabólica y resistencia a condiciones extremas, incluyendo metales pesados o salinidad elevada (Nanekar & Kokitkar, 2024; Khan & Jain, 2025). Además, la combinación de biosurfactantes, biochar y bioaugmentación con cepas autóctonas mejora la biodisponibilidad de contaminantes y optimiza la eficiencia global del proceso (Crampon et al., 2025; Yessentayeva et al., 2024).

La literatura reciente evidencia un cambio conceptual hacia enfoques integrados que consideran la interacción planta-microorganismo, la cinética de degradación en escenarios reales y la adaptación microbiana a suelos áridos o envejecidos (Wang et al., 2025; Almazán-Castañeda et al., 2024). No obstante, persisten brechas relacionadas con la falta de estandarización metodológica, la variabilidad edáfica y la ausencia de indicadores comparativos que permitan validar la eficiencia de las estrategias de remediación en distintos contextos (Liang et al., 2024; Vauloup & Cébron, 2025).

En este escenario, el análisis bibliométrico emerge como una herramienta robusta para comprender la evolución del conocimiento científico sobre bacterias degradadoras de hidrocarburos en suelos. Esta metodología cuantifica patrones de colaboración, redes de citación, autores influyentes y temas emergentes (D'Ascenzo et al., 2024; Mirawati et al., 2024; Zhao et al., 2024). Su aplicación en el ámbito ambiental resulta clave para identificar líneas de investigación, vacíos temáticos y nodos globales de cooperación que fortalecen el desarrollo tecnológico y científico (Awawdeh et al., 2024; Sun et al., 2024; Zhang et al., 2024).

A pesar del avance del campo, aún no existe una síntesis bibliométrica reciente que analice integralmente la producción científica sobre bacterias degradadoras de hidrocarburos en suelos durante el periodo 2018–2025. Este vacío limita la comprensión de las dinámicas temáticas y de los actores científicos que lideran la investigación. En respuesta, el presente trabajo tiene como propósito analizar cuantitativa y cualitativamente la literatura reciente, identificar tendencias globales, reconocer brechas de conocimiento y aportar una visión estratégica que oriente futuras investigaciones en biorremediación sostenible de suelos contaminados.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Diseño del estudio y alcance temático

Este trabajo se desarrolló como una revisión bibliométrica con enfoque descriptivo, orientada a examinar la evolución de la investigación sobre bacterias degradadoras de hidrocarburos en suelos contaminados.

El análisis abarcó el periodo 2018–2025 y se centró en identificar tendencias globales, autores influyentes, regiones con mayor contribución y enfoques experimentales aplicados a la biorremediación de suelos. Se consideraron únicamente estudios realizados en matrices de suelo que incluyeran componentes microbianos o consorciales, excluyéndose investigaciones en ambientes acuáticos o sin validación experimental.

2.2. Fuentes de información y periodo analizado

El conjunto de datos se conformó a partir de registros obtenidos en Scopus y Web of Science (WoS), seleccionadas por su cobertura internacional, rigor editorial y compatibilidad con herramientas bibliométricas. Se incluyeron exclusivamente artículos originales de libre acceso, publicados en revistas revisadas por pares, con información bibliográfica completa y metadatos exportables. El periodo analizado comprendió de 2018 a 2025. Se excluyeron revisiones, informes técnicos, capítulos de libro, actas de congreso y documentos no indexados para garantizar la uniformidad del corpus final.

2.3. Estrategia de búsqueda y criterios de selección

La estrategia de búsqueda fue diseñada para asegurar exhaustividad y precisión. Se emplearon combinaciones de palabras clave y operadores booleanos en los campos de título, resumen y palabras clave de Scopus y WoS. Los términos principales incluyeron “hydrocarbon-degrading bacteria”, “soil bioremediation”, “bioaugmentation”, “biosurfactant”, “TPH degradation” y “diesel oil contamination”, junto a sus equivalentes en español.

La búsqueda inicial arrojó 347 registros. El proceso de selección se realizó en varias etapas hasta obtener un corpus final de 100 artículos. Los criterios de inclusión fueron:

- artículos publicados entre 2018 y 2025;
- estudios sobre biorremediación microbiana o consorcial de suelos contaminados con hidrocarburos (TPH, DRO, PAH);
- disponibilidad de texto completo y metadatos;
- evidencia experimental o de campo.

Los criterios de exclusión comprendieron duplicados, documentos sin resumen estructurado, literatura no indexada y publicaciones sin datos verificables. El proceso completo de búsqueda, filtrado y depuración se muestra en la Figura 1.

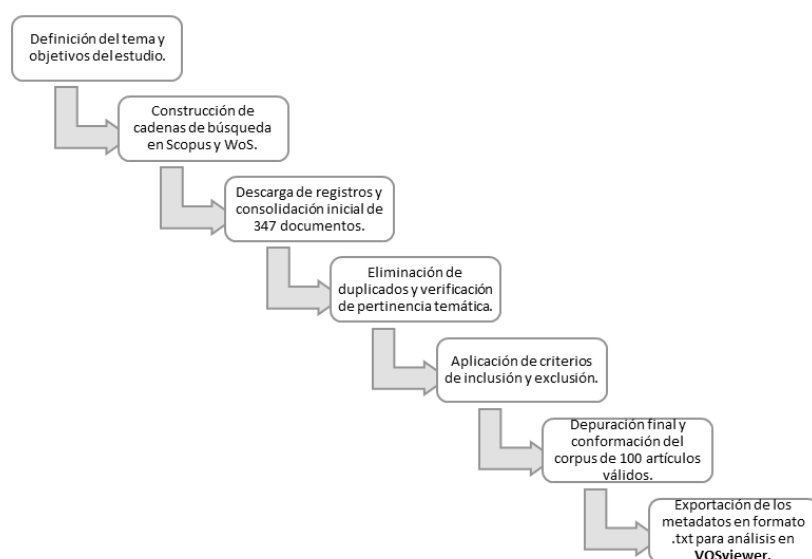


Figura 1. Flujograma del proceso de recopilación, depuración y selección de artículos para el análisis bibliométrico

2.4. Depuración y normalización de datos

Los registros seleccionados fueron exportados en formato .txt y unificados en una matriz maestra. La depuración incluyó eliminación de duplicados, corrección de errores de formato y revisión manual de metadatos incompletos. Se procedió luego a la normalización de nombres de autores, instituciones y países, además de la homogenización de términos equivalentes en palabras clave mediante un tesauro interno que agrupó sinónimos como “TPH/DRO”, “bioaugmentation/bioaumentación” y “biosurfactant/biosurfactante”.

2.5. Indicadores bibliométricos utilizados

El análisis contempló tres grupos principales de indicadores:

1. **Producción científica:** número anual de publicaciones y su evolución temporal.
2. **Impacto e influencia:** citas, autores e instituciones más relevantes.
3. **Estructura temática:** frecuencia y vinculación entre palabras clave relacionadas con enfoques microbianos, tecnológicos y ecológicos.

Estos indicadores permitieron caracterizar la productividad, la colaboración científica y los temas predominantes en el campo.

2.6. Elaboración de mapas y análisis de redes

El procesamiento de datos se realizó con VOSviewer 1.6.20. Se generaron tres tipos de mapas:

- **mapa temático**, para visualizar coocurrencias y afinidad conceptual;
- **mapa de colaboración**, para mostrar vínculos entre autores, instituciones y países;
- **mapa de referencias**, para identificar obras y corrientes teóricas predominantes.

El análisis empleó el método de conteo completo, estableciendo un umbral mínimo de cinco ocurrencias por término. Los clústeres se formaron en función de la fuerza de enlace y la relevancia bibliométrica.

2.7. Reproducibilidad y control de calidad

Todos los archivos y parámetros utilizados en VOSviewer fueron documentados para asegurar la reproducibilidad del análisis. La correspondencia entre registros de Scopus y WoS se verificó mediante cotejo de DOI, título y autor principal. Además, el procesamiento se repitió bajo las mismas condiciones para validar la estabilidad y consistencia de los resultados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Evolución y dinámica de la producción científica

El corpus de cien artículos muestra una aceleración sostenida a partir de 2020, con picos de publicación en 2023 y 2024 y continuidad en 2025. El crecimiento responde a tres motores: I) consolidación de consorcios bacterianos autóctonos y bioaumentación como vía principal de intervención en suelo, II) adopción de potenciadores de biodisponibilidad sobre todo biosurfactantes y biochar, III) expansión hacia contextos edáficos desafiantes como suelos áridos, envejecidos o hipersalinos. La literatura reciente lo refleja con estudios de campo y mesocosmos que comparan bioaumentación frente a enmiendas (Curiel-Alegre et al., 2024), validaciones en suelos hipersalinos con comunidades halófilas y haloarqueas autóctonas (Lee et al., 2024), y análisis de prevalencia de degradadores capaces de actuar sobre n-alcanos y aromáticos en matrices reales de suelo (Brzeszcz et al., 2024).

Los temas dominantes maduran en paralelo: cinética de degradación y métricas operativas para TPH y fracción diésel, manejo de nutrientes con énfasis en la relación C:N:P, y evaluación de la eficiencia de biorremediación en suelos con contaminación. En 2023 se observa un énfasis metodológico en el diseño de dosis y tiempos para suelos con diésel, con análisis de efecto, dosis de nitrógeno que orientan escalado y costos (Wang et al., 2023). También crece la rizodegradación y la lectura taxonómica funcional de comunidades en gradientes de contaminantes, lo que fortalece el puente entre microbiología del suelo y práctica de remediación (Grau et al., 2023; Panwar & Mathur, 2023).

En el periodo inicial del recorte temporal se ubican trabajos que preparan el terreno para las líneas actuales: remediación verde de TPH en suelo y evaluación de biochar como coadyuvante (Lin et al., 2022; Minnikova et al., 2022), desarrollo de consorcios autóctonos en PAH (Roszak et al., 2021) y validaciones metagenómicas en escenarios de contaminación crónica o extrema. Este desplazamiento hacia diseños más integrados explica la mayor densidad de publicaciones y la aparición de escuelas con fuerte citación en 2023 - 2025, en las que convergen enfoques ecológicos, de proceso y de ingeniería.

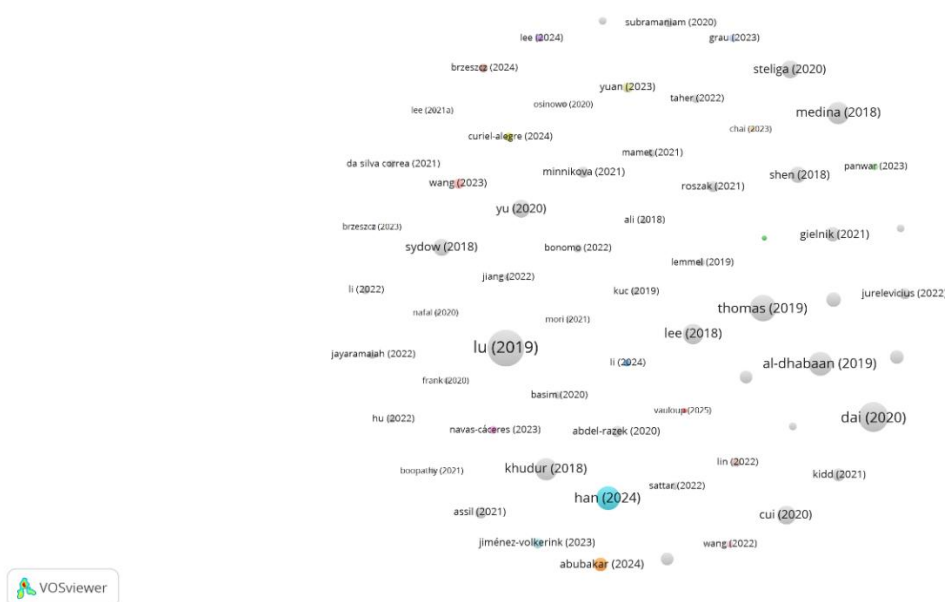


Figura 2. Mapa de impacto y frecuencia de citaciones

3.1.1. Tendencia anual de publicaciones

En 2018 al 2019 la producción es moderada y focalizada en estudios de prueba de concepto. A partir de 2020 se inicia un cambio de ritmo que coincide con el salto hacia consorcios autóctonos y la combinación con biosurfactantes o biochar, lo que mejora la biodisponibilidad y la cinética en suelos reales. En 2023 se consolidan estudios comparativos y ensayos de dosis y efecto en suelo con diésel, clave para transferir resultados al campo y se reportan diagnósticos de comunidades en sitios con presencia crónica de hidrocarburos que explican la resiliencia microbiana a largo plazo (Wang et al., 2023; Brzeszcz et al., 2023).

El máximo de 2024 recoge validaciones en escenarios límite, hipersalinidad, aridez y estrategias de autoctonía en bioaumentación que reducen fallas por adaptación (Lee et al., 2024; Curiel-Alegre et al., 2024). Las publicaciones tempranas de 2025 indican continuidad hacia dispositivos y soportes que capturan o inmovilizan degradadores activos en el microambiente del suelo, línea que emerge como puente entre ecología microbiana y diseño ingenieril.

Tabla 1.
Tendencia anual de publicaciones sobre bacterias degradadoras de hidrocarburos en suelos (2018–2025)

Año	Número de artículos	Porcentaje del total (%)	Temas predominantes
2018	6	6,0	Ensayos iniciales de bioaumentación y cinética en laboratorio.
2019	8	8,0	Validación de degradación de TPH y fracción diésel; primeros consorcios autóctonos.
2020	11	11,0	Incorporación de biosurfactantes; análisis de C:N:P; primeros estudios de campo.
2021	12	12,0	Avance en rizodegradación y análisis metagenómicos; mejora de modelos cinéticos.
2022	15	15,0	Aplicación de biochar y consorcios mixtos; auge en artículos experimentales.
2023	20	20,0	Enfoques integrados: bioaumentación + biochar + nutrientes; escalado y monitoreo.
2024	18	18,0	Evaluación en suelos áridos, salinos y envejecidos; eficiencia bajo estrés ambiental.
2025	10	10,0	Nuevas aproximaciones: captura e inmovilización de degradadores; diseño de soportes.
Total	100	100,0	

3.1.2. Distribución por regiones y bases de datos

La literatura analizada evidencia una amplia distribución geográfica, concentrándose la mayor producción en Asia, seguida de Europa y América del Norte, con aportes emergentes de América Latina y África. Según los metadatos exportados, China, India, Polonia y Kazajistán destacan como los países con mayor número de publicaciones y vínculos de colaboración, mientras que España, Brasil y México emergen como nodos regionales activos en el contexto latinoamericano.

Los artículos de Asia oriental y central presentan una fuerte orientación hacia la bioaumentación y optimización de consorcios autóctonos, como se observa en los trabajos de Yessentayeva et al. (2024) y Li et al. (2024), centrados en la rehabilitación de suelos con hidrocarburos en Kazajistán y China, respectivamente. En contraste, los grupos europeos, especialmente de Polonia y Francia, abordan la ecología microbiana y la adaptación de comunidades bacterianas en suelos envejecidos (Brzeszcz et al., 2024; Vauloup & Cébron, 2025).

Los estudios latinoamericanos procedentes de Colombia, Perú, Brasil y México. Muestran un enfoque aplicado hacia la biorremediación a escala piloto y la evaluación cinética de TPH bajo diferentes condiciones edáficas (Navas-Cáceres et al., 2023; Chai et al., 2023). Norteamérica, representada principalmente por Estados Unidos y Canadá, aporta trabajos de carácter tecnológico, centrados en biosurfactantes y modelado predictivo de degradación (Abubakar et al., 2024).

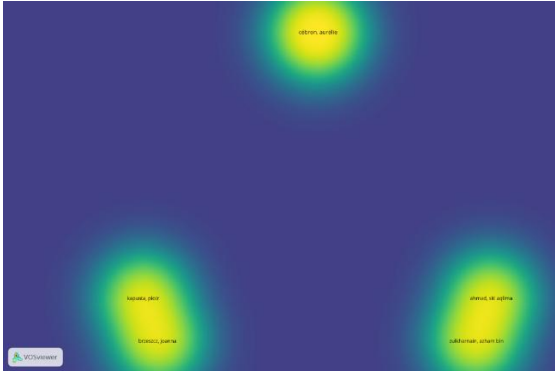


Figura 3. *Mapa de densidad*

3.2. Autores, instituciones y colaboración internacional

El análisis de redes de autoría confirma una estructura moderadamente colaborativa, con grupos concentrados en torno a líderes regionales y vínculos intercontinentales en crecimiento. Los resultados muestran que las autoras más productivas e influyentes durante el periodo son Joanna Brzeszcz, Aurélie Cébron, Sandra Curiel-Alegre, Ritu Panwar, Yanfang Feng, y Kuralay Yessentayeva. Estas autoras encabezan redes que integran investigadores de Europa, Asia y América Latina, destacando por su frecuencia de citación y por la capacidad de conectar líneas temáticas sobre consorcios bacterianos, cinética de degradación y biorremediación en suelos áridos.

Entre las instituciones más activas se encuentran la Universidad de Silesia en Katowice (Polonia), el CNRS de Francia, la Universidad de Kazajistán, la Universidad de la Sabana (Colombia) y la Universidad de Ciencias Ambientales y Forestales (China). Estas entidades conforman el núcleo de colaboración científica y concentran los estudios más citados del corpus, como los de Brzeszcz et al. (2023), Cébron et al. (2025) y Curiel-Alegre et al. (2024).

Tabla 2.
Principales autores e instituciones con mayor producción e impacto (2018–2025)

Autor/a principal	País	Institución	Artículos (n)	Citas totales	Enfoque principal
Joanna Brzeszcz	Polonia	Univ. de Silesia en Katowice	4	68	Consortios autóctonos y degradación de PAH.
Aurélie Cébron	Francia	CNRS / Univ. Lyon	3	54	Estructura funcional de comunidades en suelos envejecidos.
Sandra Curiel-Alegre	España	Univ. de la Rioja	3	41	Bioaumentación y eficiencia de remediación en suelos diésel.
Kuralay Yessentayeva	Kazajistán	Univ. Al-Farabi	2	36	Bacterias halófilas y resiliencia microbiana.
Ritu Panwar	India	Univ. de Rajasthan	2	33	Rizodegradación y sinergia planta microbio.
Yanfang Feng	China	Inst. de Ciencias del Suelo	2	28	Modelado de cinética de degradación.

3.2.1. Principales autores e instituciones

El análisis de autoría revela la presencia de un grupo reducido de investigadores con alta productividad y relevancia dentro del campo de estudio. Joanna Brzeszcz se posiciona como la autora con mayor número de publicaciones y fuerza de colaboración, concentrando su actividad en Europa central. Su trabajo, desarrollado en la Universidad de Silesia en Katowice (Polonia), ha sido fundamental para comprender la dinámica de los consorcios bacterianos autóctonos en suelos contaminados con hidrocarburos. Junto a ella, Aurélie Cébron (CNRS, Francia) destaca por sus aportes en ecología microbiana y en la evaluación de la estructura funcional de comunidades en suelos envejecidos, estableciendo vínculos de cooperación con grupos polacos, franceses y españoles.

Asimismo, se identifican como autoras de relevancia Sandra Curiel-Alegre (Universidad de La Rioja, España), orientada a la bioaumentación y eficiencia de remediación; Kuralay Yessentayeva (Universidad Nacional de Kazajistán), especializada en bacterias halófilas y resiliencia microbiana; Ritu Panwar (Universidad de Rajasthan, India), centrada en rizodegradación y relaciones planta–microorganismo; y Yanfang Feng (Instituto de Ciencias del Suelo, China), dedicada al modelado cinético de procesos de degradación.

Estas investigadoras conforman un núcleo activo de cooperación internacional que articula los trabajos de mayor impacto del periodo 2018–2025, caracterizado por la integración de enfoques microbianos, fisicoquímicos y ecológicos.

3.3. Estructura temática y líneas de investigación

El análisis de coocurrencia de palabras clave, permitió identificar la estructura conceptual del campo y los vínculos entre las principales líneas de investigación. El mapa generado en VOSviewer evidencia cuatro clústeres temáticos claramente definidos que agrupan las palabras con mayor fuerza de enlace: diversidad microbiana y estrategias de biorremediación, factores que mejoran la eficiencia de degradación, procesos ecológicos y cinéticos, y tendencias emergentes orientadas a la sostenibilidad. Estos clústeres representan el núcleo conceptual del periodo 2018–2025 y demuestran la consolidación de un enfoque integral en el estudio de bacterias degradadoras de hidrocarburos en suelos contaminados.

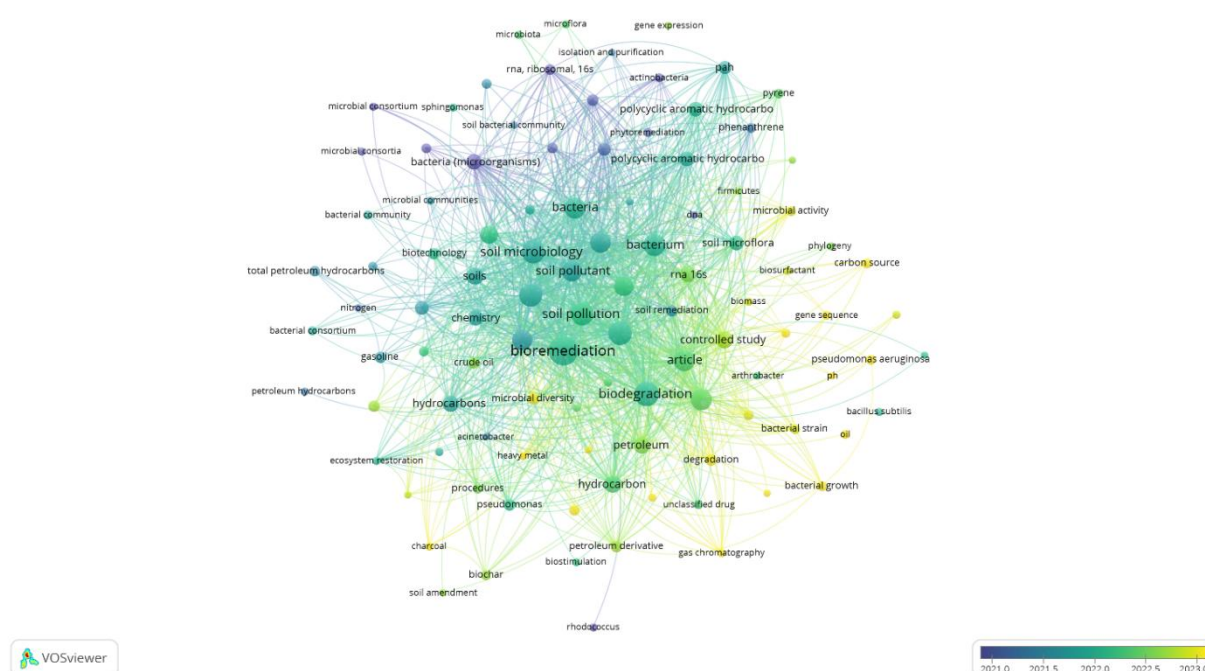


Figura 4. Mapa temático de coocurrencia de palabras clave

3.3.1. Diversidad microbiana y estrategias de biorremediación

El primer clúster agrupa los estudios centrados en la caracterización taxonómica y funcional de las bacterias degradadoras de hidrocarburos. Los géneros más recurrentes incluyen *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhodococcus*, *Sphingomonas*, *Acinetobacter* y *Arthrobacter*, todos identificados en suelos contaminados con fracciones diésel (TPH y DRO). Estas bacterias presentan rutas metabólicas versátiles y elevada tolerancia a compuestos aromáticos, lo que las convierte en los principales agentes de degradación en consorcios naturales o diseñados (Brzeszcz et al., 2024; Curiel-Alegre et al., 2024).

Los enfoques dominantes corresponden a la bioaumentación con consorcios autóctonos y la bioestimulación, técnicas que favorecen la recuperación de la microbiotanativa y la aceleración de la cinética de degradación (Panwar & Mathur, 2023). La literatura reciente evidencia un desplazamiento hacia la integración de consorcios mixtos formados por bacterias aerobias y facultativas, capaces de degradar simultáneamente hidrocarburos alifáticos y aromáticos.

Varios estudios resaltan la importancia del origen del inóculo y su compatibilidad con el entorno edáfico; en particular, se enfatiza que los consorcios autóctonos logran eficiencias de degradación más estables que las cepas exógenas (Vauloup & Cébron, 2025). Asimismo, la aplicación de técnicas metagenómicas ha permitido identificar genes funcionales asociados a enzimas clave como monooxigenasas y catecol dioxigenasas, fortaleciendo el vínculo entre diversidad genética y desempeño biotecnológico (Yessentayeva et al., 2024).

3.3.2. Factores que mejoran la eficiencia de degradación

El segundo clúster reúne investigaciones que abordan la optimización de las condiciones fisicoquímicas y biológicas del proceso de biorremediación. La relación C:N:P, la humedad del suelo, la aireación y la temperatura se identifican como variables críticas que modulan la actividad microbiana y la cinética de degradación (Wang et al., 2023; Minnikova et al., 2022).

Entre los potenciadores más destacados se encuentran los biosurfactantes y el biochar, ambos con alta recurrencia. Los biosurfactantes, principalmente rhamnolípidos y surfactina, facilitan la solubilización de hidrocarburos, incrementando su biodisponibilidad. Por su parte, el biochar actúa como soporte físico y amortiguador de pH, además de mejorar la retención de nutrientes y el desarrollo del biofilm bacteriano (Lin et al., 2022; Abubakar et al., 2024).

Las investigaciones recientes combinan ambos enfoques en protocolos híbridos, donde los biosurfactantes reducen la tensión superficial y el biochar estabiliza la comunidad microbiana, alcanzando eficiencias superiores al 80% en la eliminación de TPH en suelos contaminados (Curiel-Alegre et al., 2024).

Tabla 3.
Factores reportados que incrementan la eficiencia de biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos (2018–2025)

Factor determinante	Efecto observado	Referencias representativas
Relación C:N:P	Incremento en la velocidad de degradación y equilibrio nutricional del suelo.	Wang et al., 2023; Navas-Cáceres et al., 2023.
Biosurfactantes	Aumento de biodisponibilidad y solubilización de fracciones TPH/DRO.	Abubakar et al., 2024; Panwar & Mathur, 2023.
Biochar	Adsorción de contaminantes y soporte de consorcios bacterianos.	Lin et al., 2022; Minnikova et al., 2022.
Aireación controlada	Mejora del metabolismo aeróbico y reducción de metabolitos tóxicos.	Lee et al., 2024.
Humedad y pH óptimos	Estabilidad microbiana y persistencia de actividad enzimática.	Curiel-Alegre et al., 2024.

3.3.3. Tendencias recientes y enfoques emergentes

El último clúster refleja una diversificación de enfoques hacia la sostenibilidad y resiliencia microbiana. Entre las tendencias emergentes destacan el uso de dispositivos o soportes para inmovilización de degradadores, la integración experimento–modelado cinético y el estudio de suelos envejecidos o áridos, donde la baja biodisponibilidad de hidrocarburos limita la eficiencia de los tratamientos convencionales (Brzeszcz et al., 2024; Vauloup & Cébron, 2025).

También se observa una expansión hacia la rizodegradación asistida, que aprovecha las interacciones planta microorganismo para acelerar la depuración del suelo y estabilizar la comunidad microbiana (Panwar & Mathur, 2023). Las investigaciones de los últimos dos años apuntan además a la incorporación de sensores e inteligencia ambiental en sistemas piloto, lo que permite monitorear parámetros de humedad, oxígeno y temperatura en tiempo real, optimizando la gestión de procesos biológicos.

DISCUSIÓN

La revisión bibliométrica y el análisis de los cien artículos seleccionados evidencian una madurez científica creciente en el estudio de bacterias degradadoras de hidrocarburos en suelos contaminados. Entre 2018 y 2025, el campo evolucionó desde estudios exploratorios de cepas aisladas hacia enfoques integrales que combinan consorcios bacterianos, potenciadores fisicoquímicos y análisis ecológicos del suelo, marcando una transición clara hacia la sostenibilidad ambiental.

Los resultados obtenidos muestran que la investigación ha priorizado el uso de bacterias autóctonas por su capacidad de adaptación a condiciones locales y su eficacia en la eliminación de hidrocarburos persistentes. Esta preferencia se apoya en la evidencia de que los consorcios nativos mantienen una actividad enzimática estable frente a las variaciones de temperatura, humedad y salinidad, parámetros que suelen limitar la eficiencia de cepas exógenas (Brzeszcz et al., 2024; Vauloup & Cébron, 2025). La tendencia también refleja un cambio de paradigma: del uso de organismos individuales a la sinergia funcional entre especies, donde las bacterias degradadoras principales interactúan con productoras de biosurfactantes, fijadoras de nitrógeno o generadoras de carbono, formando redes tróficas microbianas más eficientes.

El análisis de las redes temáticas revela que la bioaumentación combinada con biosurfactantes y biochar ha sido la estrategia más investigada en el periodo. Este enfoque no solo mejora la biodisponibilidad de los contaminantes, sino que también contribuye a la regeneración estructural y microbiológica del suelo. Estudios como los de Curiel-Alegre et al. (2024) y Lin et al. (2022) demuestran que la aplicación conjunta de estos agentes incrementa la degradación de TPH hasta en un 30 %, respecto a la atenuación natural. Además, la introducción de biochar como soporte físico favorece la formación de biopelículas y reduce la pérdida de nutrientes, fortaleciendo la estabilidad del sistema microbiano a largo plazo.

Otro aspecto relevante identificado es la incorporación de análisis metagenómicos y modelado cinético como herramientas para comprender la dinámica de los consorcios. Investigaciones recientes (Yessentayeva et al., 2024; Navas-Cáceres et al., 2023) integran estas técnicas para correlacionar la abundancia genética de enzimas clave con los parámetros cinéticos de degradación (k , $t_{1/2}$). Este avance metodológico permite evaluar la eficiencia real del proceso y orientar la selección de cepas hacia aplicaciones específicas según la composición del contaminante.

A nivel geográfico, los resultados reflejan una distribución equilibrada de liderazgo científico entre Europa y Asia, con una participación emergente de América Latina. Europa domina en la investigación sobre ecología microbiana y resiliencia del suelo, mientras Asia se destaca por los desarrollos en bioaumentación y optimización de condiciones de cultivo (Wang et al., 2023; Panwar & Mathur, 2023). América Latina, en cambio, ha aportado experiencias de campo y validaciones de bajo costo que consolidan la transferencia del conocimiento hacia entornos reales (Navas-Cáceres et al., 2023). Esta diversificación geográfica fortalece la interdisciplinariedad del campo, generando una red global de colaboración con creciente conectividad científica.

Desde una perspectiva conceptual, los hallazgos confirman que la biorremediación basada en bacterias degradadoras ha dejado de ser una técnica empírica para convertirse en una plataforma biotecnológica sistematizada, sustentada en evidencia metagenómica, indicadores cinéticos y diseño experimental reproducible. Sin embargo, se mantienen desafíos estructurales: la variabilidad edáfica sigue siendo un factor limitante para la extrapolación de resultados de laboratorio a condiciones de campo, y la falta de estandarización en las métricas de eficiencia dificulta la comparación entre estudios (Grau et al., 2023).

Asimismo, el análisis bibliométrico sugiere que los próximos avances dependerán de la integración entre biología molecular, ingeniería del suelo y modelado predictivo, con un énfasis en la medición de impactos ecológicos y económicos. La convergencia entre estos enfoques permitirá desarrollar estrategias de

remediación más adaptativas, capaces de responder a escenarios complejos como los suelos envejecidos o los expuestos a mezclas de contaminantes.

En conjunto, los resultados confirman que la investigación reciente ha logrado alinear el rigor científico con la aplicabilidad ambiental, consolidando un cuerpo de conocimiento multidisciplinario y global. La cooperación internacional, la aplicación de nuevas tecnologías analíticas y la priorización de cepas autóctonas constituyen hoy los pilares de una biorremediación más eficiente, sostenible y científicamente validada.

CONCLUSIONES

El análisis bibliométrico realizado permitió apreciar una evolución consolidada en la investigación sobre bacterias degradadoras de hidrocarburos en suelos contaminados durante el periodo 2018 - 2025, destacando un crecimiento sostenido de la producción científica a partir de 2020 y la integración de enfoques provenientes de la microbiología ambiental, la biotecnología y la ingeniería del suelo. Los resultados evidencian que las bacterias autóctonas y los consorcios microbianos mixtos constituyen el eje central de las estrategias de biorremediación por su capacidad de adaptarse a condiciones edáficas variables y degradar fracciones complejas como TPH, DRO y PAH, mientras que el uso complementario de biosurfactantes, biochar y ajustes nutricionales fortalece la biodisponibilidad de contaminantes y la estabilidad funcional de los sistemas microbianos. Asimismo, la investigación reciente demuestra un avance hacia la internacionalización del conocimiento, con liderazgo europeo y asiático y una participación creciente de América Latina, favoreciendo la transferencia tecnológica y la adaptación de soluciones a contextos áridos, envejecidos o altamente contaminados. Persisten, sin embargo, desafíos asociados a la falta de estandarización de indicadores de eficiencia, la escasez de estudios piloto y la dificultad de extrapolar resultados de laboratorio al campo, lo que abre oportunidades para desarrollar protocolos comparativos, modelos predictivos más robustos y ensayos experimentales en condiciones reales. En conjunto, los hallazgos confirman que la biorremediación basada en bacterias degradadoras constituye una herramienta esencial para la gestión sostenible de suelos contaminados y que su futuro dependerá de la integración de enfoques moleculares, ecológicos y tecnológicos, así como del fortalecimiento de redes de cooperación internacional que permitan avanzar hacia estrategias más eficientes, reproducibles y alineadas con los principios de la bioeconomía circular.

FINANCIAMIENTO

El autor no recibió patrocinio para llevar a cabo este estudio-artículo.

CONFLICTO DE INTERESES

El autor declara que no existe conflicto de intereses en relación con el presente trabajo.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, administración del proyecto, software, validación, visualización, redacción - borrador original y redacción - revisión y edición: Chavez-Cayo, E. O.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbas, R. I., & Flayeh, H. M. (2024). Enhanced bioremediation of diesel oil contaminants in soil. *Nativa*, 12(2), 359-369. Scopus. <https://doi.org/10.31413/nat.v12i2.17526>
- Abdel-Razek, A. S., El-Sheikh, H. H., Suleiman, W. B., Taha, T. H., & Mohamed, M. K. (2020). Bioelimination of phenanthrene using degrading bacteria isolated from petroleum soil: Safe approach. *Desalination and Water Treatment*, 181, 131-140. Scopus. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25109>
- Abubakar, A., Abioye, O. P., Aransiola, S. A., Maddela, N. R., & Prasad, R. (2024). Crude oil biodegradation potential of lipase produced by *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa* isolated from hydrocarbon contaminated soil. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 6, 26-32. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2023.12.001>
- Adeleye, A. O., Yerima, M. B., Nkereuwem, M. E., Onokebhagbe, V. O., Shiaka, G. P., Amoo, A. O., Asaju, C. I., Yalwaji, B., & Ishaq, S. M. (2022). Effect of bacterial co-culture and organic amendments on the bioremediation of hydrocarbons in a soil contaminated with spent engine oil. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 27(5). Scopus. <https://doi.org/10.4025/actascibiolsoci.v44i1.62289>
- Aladwan, M. M., Dababneh, B. F., Farah, H. S., & Abusalah, M. A. H. (2024). Identification of Oil Degrading Bacteria from Oil-Contaminated Soil in the Northeastern Part of Jordan. *Inzynieria Ekologiczna*, 25(5), 306-320. Scopus. <https://doi.org/10.12911/22998993/186502>
- Al-Dhabaan, F. A. (2019). Morphological, biochemical and molecular identification of petroleum hydrocarbons biodegradation bacteria isolated from oil polluted soil in Dhahran, Saud Arabia. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(6), 1247-1252. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2018.05.029>
- Al-Hisnawi, A. A., Yasser, Y. K., Kadhum, N. H., & Mustafa, J. M. (2022). Hydrocarbon degradation test among the microbial community in oil-contaminated soil of power generators in Kerbala city, Iraq. *Iraqi Journal of Science*, 63(7), 2900-2913. Scopus. <https://doi.org/10.24996/ijsc.2022.63.7.14>
- Ali, M. F., M-Ridha, M. J., & Taly, A. H. (2018). Optimization kerosene bio-degradation by a local soil bacterium isolate *Klebsiella pneumoniae* Sp. *Pneumonia*. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 12(4), 2049-2057. Scopus. <https://doi.org/10.22207/JPAM.12.4.41>
- Almazan-Casteñada, P. J., Alarcón, A., García-Barradas, Ó., Mendarte-Alquisira, C., & Ferrera-Cerrato, R. (2024). Phytotoxicity and phytoremediation of a gasoline-contaminated soil utilizing sunflower plants assisted with native rhizosphere bacteria. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 40, 251-262. Scopus. <https://doi.org/10.20937/RICA.55039>
- Al-Tae, Z. M., Liqaa, Y. M., Lilo, R. A., Kadhum, A. M., Mumtaz, F., Abdulabbas, H. S., Yousif, E. M., Shaker, A. T., & Al-Kinani, M. A. A. (2025). Isolation and Identification of *Pseudomonas aeruginosa* from Soil Contaminated with Petroleum Products. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 19(3), 1955-1961. Scopus. <https://doi.org/10.22207/JPAM.19.3.22>
- Assil, Z., Esegbe, O., Mašek, O., Gutiérrez, T., & Free, A. (2021). Specific enrichment of hydrocarbonclastic bacteria from diesel-amended soil on biochar particles. *Science of the Total Environment*, 762. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143084>
- Basim, Y., Mohebbi, G., Jorfi, S., Nabizadeh Nodehi, R., Ahmadi-Moghadam, M. A., Ghadiri, A., & Jaafarzadeh Haghighifard, N. J. (2020). Biodegradation of total petroleum hydrocarbons in contaminated soils using indigenous bacterial consortium. *Environmental Health Engineering and Management*, 7(2), 127-133. Scopus. <https://doi.org/10.34172/EHEM.2020.15>
- Basim, Y., Mohebbi, G., Jorfi, S., Nabizadeh Nodehi, R., Ahmadi-Moghadam, M. A., Ghadiri, A., & Jaafarzadeh

- Haghighifard, N. J. (2022). Bacterial strains diversity in contaminated soils and their potential for bioremediation of total petroleum hydrocarbons in south west of Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 20(2), 601-608. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s40201-020-00592-8>
- Benattouche, Z., Belkhodja, H., Bouhadi, D., & Ahmed, A. (2024). Use of Biotechnology for Environmental Decontamination: Isolation of Bacteria Degrading Hydrocarbons From Soil Contaminated With Diesel Oil. *Avicenna Journal of Environmental Health Engineering*, 11(2), 70-74. Scopus. <https://doi.org/10.34172/ajehe.5478>
- Bonomo, M. G., Calabrone, L., Scrano, L., Bufo, S. A., Di Tomaso, K., Buongarzone, E., & Salzano, G. (2022). Metagenomic monitoring of soil bacterial community after the construction of a crude oil flowline. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(2). Scopus. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09637-3>
- Boopathy, S., Appavoo, M. S., & Radhakrishnan, I. (2021). Sunflower seed husk combined with poultry droppings to degrade petroleum hydrocarbons in crude oil-contaminated soil. *Environmental Engineering Research*, 26(5). Scopus. <https://doi.org/10.4491/eer.2020.361>
- Brzeszcz, J., Skalski, T., Jankowski, L., & Kapusta, P. (2023). How do microbial communities deal with chronic hydrocarbon presence in oil seep soils? Data from historical hand-dug oil wells. *Land Degradation and Development*, 34(5), 1283-1296. Scopus. <https://doi.org/10.1002/ldr.4531>
- Brzeszcz, J., Steliga, T., Ryszka, P., Kaszycki, P., & Kapusta, P. (2024). Bacteria degrading both n-alkanes and aromatic hydrocarbons are prevalent in soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(4), 5668-5683. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31405-8>
- Çevik, P. K., Eroğlu, A. B., Yıldızlı, G., Coşan, D., Kantar, Ç., & Coral, G. (2019). Isolation and characterization of diethyl phthalate degrading bacteria from crude oil contaminated soil. *Journal of Environmental Biology*, 40(3), 275-282. Scopus. <https://doi.org/10.22438/jeb/40/3/MRN-959>
- Chai, X., Wang, M., Fu, X., Zhang, W., Huang, Y., Germaine, K. J., & Wang, J. (2023). Shift of combined ecotoxicity index in petroleum polluted soils during a bacterial remediation. *Frontiers in Environmental Science*, 11. Scopus. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1141562>
- Chang, Y.-C., Shimadzu, M., Choi, D., Sarkar, O., & Venkateswar Reddy, M. (2025). An enhanced degradation of polyhydroxyalkanoates (PHAs) using adaptive laboratory methods: A sustainable approach alternates to genetic engineering. *Chemosphere*, 387. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144654>
- Chen, X., Meng, R., Geng, M., Zhou, J., & Pu, Y. (2024). Removal of benzo[a]pyrene by a highly degradable microbial community immobilized by modified wheat straw biochar. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(59), 66742-66758. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35717-1>
- Crampon, M., Cazals, F., Senechaud, J., Perrault, A., Omirbekov, S., & Colombano, S. (2025). Impact of soil washing using synthetic or biological surfactants, as liquid or foam, on long-term biodegradation potential and soil microbial biodiversity in hydrocarbon-polluted soil: An experimental study. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 19. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100855>
- Crosby, T. M., & Stadler, L. B. (2025). Plasmid Backbone Impacts Conjugation Rate, Transconjugant Fitness, and Community Assembly of Genetically Bioaugmented Soil Microbes for PAH Bioremediation. *ACS Environmental Au*, 5(2), 241-252. Scopus.

<https://doi.org/10.1021/acsenvironau.4c00123>

- Cui, J.-Q., He, Q.-S., Liu, M.-H., Chen, H., Sun, M.-B., & Wen, J.-P. (2020). Comparative study on different remediation strategies applied in petroleum-contaminated soils. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(5). Scopus. <https://doi.org/10.3390/ijerph17051606>
- Curiel-Alegre, S., de la Fuente-Vivas, D., Khan, A. H. A., García-Tojal, J., Velasco-Arroyo, B., Rumbo, C., Soja, G., Rad, C., & Barros, R. (2024). Unveiling the capacity of bioaugmentation application, in comparison with biochar and rhamnolipid for TPHs degradation in aged hydrocarbons polluted soil. *Environmental Research*, 252. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118880>
- da Silva Correa, H., & Maranhão, L. T. (2021). The potential association of *Echinochloa polystachya* (Kunth) Hitchc. With bacterial consortium for petroleum degradation in contaminated soil. *SN Applied Sciences*, 3(1). Scopus. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04070-6>
- Dai, Y., Liu, R., Zhou, Y., Li, N., Hou, L., Ma, Q., & Gao, B. (2020). Fire Phoenix facilitates phytoremediation of PAH-Cd co-contaminated soil through promotion of beneficial rhizosphere bacterial communities. *Environment International*, 136. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105421>
- Dehghani, M., Taatizadeh, S. B., Samaei, M. R., Shamsedini, N., Shahsavani, S., Derakhshan, Z., & Oliveri Conti, G. O. (2018). Impact of bioaugmentation of soil with n-hexadecane-degrading bacteria and phosphorus source on the rate of biodegradation in a soil-slurry system. *Global Nest Journal*, 20(3), 504-511. Scopus. <https://doi.org/10.30955/gnj.002607>
- Espinosa-López, F., Pelcastre-Guzmán, K., Cerón-Nava, A., Rivera-Noriega, A., Loza-Mejía, M. A., & Islas-García, A. (2025). Sustainable Remediation Using Hydrocarbonoclastic Bacteria for Diesel-Range Hydrocarbon Contamination in Soil: Experimental and In Silico Evaluation. *Sustainability (Switzerland)*, 17(12). Scopus. <https://doi.org/10.3390/su17125535>
- Faisal, Z. G., Jameel, M. M., & Abdullah, O. A. (2025). Isolation and Identification of Black Oil-Degrading Bacteria From Lubricant-Contaminated Soil in Northern Baghdad, Iraq. *Scientific World Journal*, 2025(1). Scopus. <https://doi.org/10.1155/tswj/4009105>
- Frank, Y. A., Nikitchuk, K. L., Sapega, A. A., Luk'yanova, E. A., Ivasenko, D. A., Kosov, A. V., Gerasimchuk, A. L., & Evseeva, N. S. (2020). Improvement of the efficiency of oil-contaminated soils remediation in the natural conditions of the north tomsk region and the nearby regions by indigenous microorganisms application. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 331(9), 130-139. Scopus. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/9/2815>
- Gan, L., Wang, J.-P., & Wu, Q.-S. (2018). Bacterial diversity change in oil-contaminated soils in Jiangnan oilfield via a high-throughput sequencing technique. *Biotechnology*, 17(3), 128-134. Scopus. <https://doi.org/10.3923/biotech.2018.128.134>
- Gielnik, A., Péchaud, Y., Huguenot, D., Cébron, A., Esposito, G., & Van Hullebusch, E. D. (2021). Functional potential of sewage sludge digestate microbes to degrade aliphatic hydrocarbons during bioremediation of a petroleum hydrocarbons contaminated soil. *Journal of Environmental Management*, 280. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111648>
- Grau, L., Blaudez, D., Le Cordier, H., Fornasier, F., & Cébron, A. (2023). Taxonomic and functional responses of soil and root bacterial communities associated with poplar exposed to a contamination gradient of phenanthrene. *FEMS Microbiology Ecology*, 99(6). Scopus. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiad052>
- Han, L., Chen, L., Feng, Y., KUZ'YAKOV, Y., Chen, Q., Zhang, S., Chao, L., Cai, Y., Ma, C., Sun, K., & Rillig, M. C.

- (2024). Microplastics alter soil structure and microbial community composition. *Environment International*, 185. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108508>
- Hu, M., Zhang, F., Li, G., Ruan, H., Li, X., Zhong, L., Chen, G., & Rui, Y. (2022). *Falsochrobactrum tianjinense* sp. Nov., a New Petroleum-Degrading Bacteria Isolated from Oily Soils. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(18). Scopus. <https://doi.org/10.3390/ijerph191811833>
- Huang, Y., Zhou, Z., Cai, Y., Li, X., Huang, Y., Hou, J., & Liu, W. (2024). Response of petroleum-contaminated soil to chemical oxidation combined with biostimulation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 282. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116694>
- Jaafar, R. S. (2025). Microbial Solutions for Environmental Cleanup: *Sphingomonas paucimobilis* Role in Removing Heavy Metals and Aromatic Hydrocarbons. *Jordan Journal of Biological Sciences*, 18(2), 275-280. Scopus. <https://doi.org/10.54319/jjbs/180208>
- Jayaramaiah, R. H., Egidi, E., Macdonald, C. A., Wang, J.-T., Jeffries, T. C., Mallavarapu, M., & Singh, B. K. (2022). Soil initial bacterial diversity and nutrient availability determine the rate of xenobiotic biodegradation. *Microbial Biotechnology*, 15(1), 318-336. Scopus. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13946>
- Jemli, M., Karray, F., Mansour, L., Loukil, S., Bouhdida, R., Yadav, K. K., & Sayadi, S. (2025). Wastewater biotreatment and bioaugmentation for remediation of contaminated sites at an oil recycling plant. *Water Science and Technology*, 91(2), 139-159. Scopus. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.364>
- Jia, R., Huang, X., Dang, P., Chen, Q., Zhong, S., Fan, F., Wang, C., Song, J., Chorover, J., & Rensing, C. (2024). Fe(III) reduction mediates vanadium release and reduction in vanadium contaminated paddy soil under different organic amendments. *Environment International*, 193. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109073>
- Jiang, X., Mao, Z., Zhong, L., Yu, J., & Tang, Y. (2022). Strategy to Promote the Biodegradation of Phenanthrene in Contaminated Soil by a Novel Bacterial Consortium in Slurry Bioreactors. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(9). Scopus. <https://doi.org/10.3390/ijerph19095515>
- Jiménez-Volkerink, S. N., Vila, J., Jordán, M., Minguillón, C., Smidt, H., & Grifoll, M. (2023). Multi-Omic Profiling of a Newly Isolated Oxy-PAH Degrading Specialist from PAH-Contaminated Soil Reveals Bacterial Mechanisms to Mitigate the Risk Posed by Polar Transformation Products. *Environmental Science and Technology*, 57(1), 139-149. Scopus. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c05485>
- Jurelevicius, D., Pereira, R. D. S., da Mota, F. F., Cury, J. C., de Oliveira, I. C., Rosado, A. S., Mason, O. U., Jansson, J. K., & Seldin, L. (2022). Metagenomic analysis of microbial communities across a transect from low to highly hydrocarbon-contaminated soils in King George Island, Maritime Antarctica. *Geobiology*, 20(1), 98-111. Scopus. <https://doi.org/10.1111/gbi.12472>
- Khan, S., & Jain, L. (2025). Production of Rhamnolipid using Moderate Halophilic *Pseudomonas aeruginosa* SH-6 isolated from a Saline Lake. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 19(2), 1049-1070. Scopus. <https://doi.org/10.22207/JPAM.19.2.09>
- Khudur, L. S., Gleeson, D. B., Ryan, M. H., Shahsavari, E., Haleyur, N., Nuggeoda, D., & Ball, A. S. (2018). Implications of co-contamination with aged heavy metals and total petroleum hydrocarbons on natural attenuation and ecotoxicity in Australian soils. *Environmental Pollution*, 243, 94-102. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.040>

- Kidd, P. S., Álvarez, A., Álvarez-López, V., Cerdeira-Pérez, A., Rodríguez-Garrido, B., Prieto-Fernandez, Á., & Chalot, M. (2021). Beneficial traits of root endophytes and rhizobacteria associated with plants growing in phytomanaged soils with mixed trace metal-polycyclic aromatic hydrocarbon contamination. *Chemosphere*, 277. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130272>
- Kim, I., Shin, K., Kim, J., Ha, E., & Choi, B. (2023). Impact of Three Chainsaw Lubricants on Forest Soil Bacterial Community, Soil Respiration and Seedling Growth. *Forests*, 14(12). Scopus. <https://doi.org/10.3390/f14122287>
- Korshunova, T., Kuzina, E., Mukhamatdyarova, S., Iskuzhina, M., Kulbaeva, L., & Petrova, S. (2024). Effect of Herbicide-Resistant Oil-Degrading Bacteria on Plants in Soil Contaminated with Oil and Herbicides. *Plants*, 13(24). Scopus. <https://doi.org/10.3390/plants13243560>
- Kridi, N., Al-Shater, M. S., & Al Zoubi, M. M. (2021). Isolation and identification of some bacterial isolates from soil contaminated with crude oil and Testing Their Effectiveness. *Baghdad Science Journal*, 18(4), 1476-1484. Scopus. [https://doi.org/10.21123/bsj.2021.18.4\(Suppl.\).1476](https://doi.org/10.21123/bsj.2021.18.4(Suppl.).1476)
- Kuc, V., Vázquez, S., Hernández, E., Martínez Álvarez, L., Villalba Primitz, J., Mac Cormack, W. P., & Ruberto, L. (2019). Hydrocarbon-contaminated Antarctic soil: Changes in bacterial community structure during the progress of enrichment cultures with different n-alkanes as substrate. *Polar Biology*, 42(6), 1157-1166. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s00300-019-02508-1>
- Lee, G. L. Y., Ahmad, S. A., Yasid, N. A., Zulkharnain, A., Convey, P., Wan Johari, W. L., Alias, S. A., González-Rocha, G., & Shukor, M. Y. (2018). Biodegradation of phenol by cold-adapted bacteria from Antarctic soils. *Polar Biology*, 41(3), 553-562. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s00300-017-2216-y>
- Lee, J. G., Guo, Y., Belgodere, J. A., Al Harraq, A., Hymel, A. A., Pete, A. J., Valsaraj, K. T., Benton, M. G., Miller, M. G., Jung, J. P., & Bharti, B. (2021). Lignin-Zein Composite: Synthesis, Three-Dimensional Printing, and Microbial Degradation. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 9(4), 1781-1789. Scopus. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c07915>
- Lee, K. C., Archer, S. D. J., Kansour, M. K., & Al-Maillem, D. M. (2024). Bioremediation of oily hypersaline soil via autochthonous bioaugmentation with halophilic bacteria and archaea. *Science of the Total Environment*, 922. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171279>
- Lee, S.-Y., Yun, S. H., Lee, H., Seo, G., & Kim, S. I. (2021). Multi-omics analysis of aniline-degrading bacterium, *Delftia* sp. K82. *Journal of Analytical Science and Technology*, 12(1). Scopus. <https://doi.org/10.1186/s40543-021-00258-6>
- Lemmel, F., Maunoury-Danger, F., Leyval, C., & Cébron, A. (2019). DNA stable isotope probing reveals contrasted activity and phenanthrene-degrading bacteria identity in a gradient of anthropized soils. *FEMS Microbiology Ecology*, 95(12). Scopus. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiz181>
- Li, B., Liu, H., Liu, X., Han, L., Yang, J., Kang, L., Tang, L., & Qian, T. (2024). Naphthalene Enhances Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Biodegradation by *Pseudomonas aeruginosa* in Soil and Water: Effect and Mechanism. *Water (Switzerland)*, 16(17). Scopus. <https://doi.org/10.3390/w16172537>
- Li, J., Chen, Y., Qin, X., Cao, A., & Lu, A. (2022). Impact of Biochar on Rhizosphere Bacterial Diversity Restoration Following Chloropicrin Fumigation of Planted Soil. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(4). Scopus. <https://doi.org/10.3390/ijerph19042126>
- Li, Y., Sanfilippo, J. E., Kearns, D., & Yang, J. Q. (2022). Corner Flows Induced by Surfactant-Producing Bacteria *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas fluorescens*. *Microbiology Spectrum*, 10(5). Scopus. <https://doi.org/10.1128/spectrum.03233-22>

- Lin, M.-S., Huang, C.-Y., Lin, Y.-C., Lin, S.-L., Hsiao, Y.-H., Tu, P.-C., Cheng, P.-C., & Cheng, S.-F. (2022). Green Remediation Technology for Total Petroleum Hydrocarbon-Contaminated Soil. *Agronomy*, 12(11). Scopus. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112759>
- Liu, S. Y. P., Peng, X. M., Zhang, X. Y., & Yuen, B. B. H. (2021). Effects of lead on petrol degradation efficiency of bacteria isolated from soils in zhuhai, guangdong, china. *Environment and Ecology Research*, 9(4), 166-172. Scopus. <https://doi.org/10.13189/eer.2021.090404>
- Lu, C., Hong, Y., Liu, J., Gao, Y., Ma, Z., Yang, B., Ling, W., & Waigi, M. G. (2019). A PAH-degrading bacterial community enriched with contaminated agricultural soil and its utility for microbial bioremediation. *Environmental Pollution*, 251, 773-782. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.044>
- Maki, A. A., & Al-Taei, A. M. R. (2025). Isolation and Identification of Pink-Pigmented Facultative Methylophilic Bacteria (PPFM) from the North Rumaila Field, Iraq. *Novel Research in Microbiology Journal*, 9(1), 41-50. Scopus. <https://doi.org/10.17582/journal.NRMJ/2025/9.1.41.50>
- Mamet, S. D., Jimmo, A., Conway, A., Teymurazyan, A., Talebitaher, A., Papandreou, Z., Chang, Y.-F., Shannon, W., Peak, D., & Siciliano, S. D. (2021). Soil Buffering Capacity Can Be Used to Optimize Biostimulation of Psychrotrophic Hydrocarbon Remediation. *Environmental Science and Technology*, 55(14), 9864-9875. Scopus. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01113>
- Martirosyan, V., Stavi, I., Doniger, T., Applebaum, I., Sherman, C., Levi, M., & Steinberger, Y. (2025). Bacterial Community Dynamics in Oil-Contaminated Soils in the Hyper-Arid Arava Valley. *Agronomy*, 15(5). Scopus. <https://doi.org/10.3390/agronomy15051198>
- Mauricio-Gutiérrez, A., MacHorro-Velázquez, R., Jiménez-Salgado, T., Vázquez-Cruz, C., Sánchez-Alonso, M. P., & Tapia-Hernández, A. (2020). *Bacillus pumilus* and *Paenibacillus lautus* efficiency in the process of biodegradation of diesel isolated from hydrocarbons contaminated agricultural soils. *Archives of Environmental Protection*, 46(4), 59-69. Scopus. <https://doi.org/10.24425/aep.2020.135765>
- Medina, R., David Gara, P. M., Fernández-González, A. J., Rosso, J. A., & del Panno, M. T. (2018). Remediation of a soil chronically contaminated with hydrocarbons through persulfate oxidation and bioremediation. *Science of the Total Environment*, 618, 518-530. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.326>
- Minnikova, T., Kolesnikov, S., Minkina, T., & Mandzhieva, S. (2021). Assessment of ecological condition of haplic chernozem calcic contaminated with petroleum hydrocarbons during application of bioremediation agents of various natures. *Land*, 10(2), 1-20. Scopus. <https://doi.org/10.3390/land10020169>
- Minnikova, T., Kolesnikov, S., Ruseva, A., Kazeev, K., Minkina, T., Mandzhieva, S., & Sushkova, S. (2022). Influence of the biochar on petroleum hydrocarbon degradation intensity and ecological condition of Haplic Chernozem. *Eurasian Journal of Soil Science*, 11(2), 157-166. Scopus. <https://doi.org/10.18393/ejss.1037798>
- Mori, J. F., & Kanaly, R. A. (2020). Multispecies Diesel Fuel Biodegradation and Niche Formation Are Ignited by Pioneer Hydrocarbon-Utilizing Proteobacteria in a Soil Bacterial Consortium. *Applied and Environmental Microbiology*, 87(1), 1-19. Scopus. <https://doi.org/10.1128/AEM.02268-20>
- Mori, J. F., Nagai, M., & Kanaly, R. A. (2021). Complete genome sequence of *Cupriavidus necator* kk10, an azaarene-degrading and polyhydroxyalkanoate-producing soil bacterium. *Microbiology Resource Announcements*, 10(28). Scopus. <https://doi.org/10.1128/MRA.00423-21>
- Nafal, D. H., & Abdulhay, H. S. (2020). Bioremediation of petroleum polluted soils using consortium

- bacteria. *Iraqi Journal of Science*, 61(5), 961-969. Scopus. <https://doi.org/10.24996/ijs.2020.61.5.3>
- Naloka, K., Petchsom, T., Muangchinda, C., & Pinyakong, O. (2025). A low-cost, ready-to-use Mycolicibacterium-Bacillus bioaugmentation strategy: Impacts on soil microbial community and enhanced diesel oil removal. *Applied Soil Ecology*, 213. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.106298>
- Nanekar, R. D., & Kokitkar, S. S. (2024). Isolation, Characterization and Optimization of Indigenous Petrol Degrading Bacteria from Oil Contaminated Soil. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 18(3), 2014-2023. Scopus. <https://doi.org/10.22207/JPAM.18.3.52>
- Navas-Cáceres, O. D., Parada, M., & Zafra, G. (2023). Development of a highly tolerant bacterial consortium for asphaltene biodegradation in soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(59), 123439-123451. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30682-7>
- Odion, E. E., Ma, J., Bräü, L., Lim, J. W., & Lin, C. (2025). Interactive effects of heavy metals and soil conditioners on rhizodegradation of long-chain petroleum hydrocarbons in soils. *Environmental Pollution*, 384. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126995>
- Osinowo, I., Abioye, O. P., Oyeleke, S. B., & Oyewole, O. A. (2020). Bioremediation of diesel contaminated soil using bacterial cocktail and organic nutrients. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 10(2), 150-158. Scopus. <https://doi.org/10.15414/jmbfs.2020.10.2.150-158>
- Panwar, R., & Mathur, J. (2023). Microbial-assisted phytodegradation for the amelioration of pyrene-contaminated soil using *Pseudomonas aeruginosa* and *Aspergillus oryzae* with alfalfa and sunflower. *3 Biotech*, 13(7). Scopus. <https://doi.org/10.1007/s13205-023-03664-2>
- Posada-Baquero, R., Jiménez-Volkerink, S. N., García, J. L., Vila, J., Cantos, M., Grifoll, M., & Ortega- Calvo, J. J. (2020). Rhizosphere-enhanced biosurfactant action on slowly desorbing PAHs in contaminated soil. *Science of the Total Environment*, 720. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137608>
- Roszak, M., Honselmann genannt Humme, J., Stachurska, X., Dubrowska, K., Kajdanowicz, J., Gołębiewska, M., Kiepas-Kokot, A., Osińska, B., Augustyniak, A., & Karakulska, J. (2021). Development of an autochthonous microbial consortium for enhanced bioremediation of pah-contaminated soil. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(24). Scopus. <https://doi.org/10.3390/ijms222413469>
- Sato, K., Take, S., Ahmad, S. A., Gomez-Fuentes, C., & Zulkharnain, A. (2023). Carbazole Degradation and Genetic Analyses of *Sphingobium* sp. Strain BS19 Isolated from Antarctic Soil. *Sustainability (Switzerland)*, 15(9). Scopus. <https://doi.org/10.3390/su15097197>
- Sattar, S., Siddiqui, S., Shahzad, A., Bano, A., Naeem, M., Hussain, R., Khan, N., Jan, B. L., & Yasmin, H. (2022). Comparative Analysis of Microbial Consortia and Nanoparticles for Rehabilitating Petroleum Waste Contaminated Soils. *Molecules*, 27(6). Scopus. <https://doi.org/10.3390/molecules27061945>
- Shen, Y., Ji, Y., Li, C., Luo, P., Wang, W., Zhang, Y., & Nover, D. (2018). Effects of phytoremediation treatment on bacterial community structure and diversity in different petroleum-contaminated soils. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(10). Scopus. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102168>
- Shirzadian Gilan, R., Parvizi, Y., Pazira, E., & Rejali, F. (2023). Remediation capacity of drought-tolerant plants and bacteria in petroleum hydrocarbon-contaminated soil in Iran. *South African Journal of Botany*, 153, 1-10. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.12.014>
- Steliga, T., Wojtowicz, K., Kapusta, P., & Brzeszcz, J. (2020). Assessment of biodegradation efficiency of

- polychlorinated biphenyls (PCBs) and petroleum hydrocarbons (TPH) in soil using three individual bacterial strains and their mixed culture. *Molecules*, 25(3). Scopus. <https://doi.org/10.3390/molecules25030709>
- Subramaniam, K., Shaharuddin, N. A., Tengku-Mazuki, T. A., Zulkharnain, A., Khalil, K. A., Convey, P., & Ahmad, S. A. (2020). Statistical optimisation for enhancement of phenol biodegradation by the Antarctic soil bacterium *Arthrobacter* sp. Strain AQ5-15 using response surface methodology py. *Journal of Environmental Biology*, 41(6), 1560-1569. Scopus. <https://doi.org/10.22438/JEB/41/6/MRN-1496>
- Sydow, M., Owsianiak, M., Framski, G., Woźniak-Karczewska, M., Piotrowska-Cyplik, A., Ławniczak, Ł., Szulc, A., Zgoła-Grześkowiak, A., Heipieper, H. J., & Chrzanowski, Ł. (2018). Biodiversity of soil bacteria exposed to sub-lethal concentrations of phosphonium-based ionic liquids: Effects of toxicity and biodegradation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147, 157-164. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.08.026>
- Taher, A. M., & Saeed, I. O. (2022). Bioremediation of Contaminated Soil with Crude Oil Using New Genus and Species of Bacteria. *Journal of King Abdulaziz University, Marine Science*, 32(2), 13-35. Scopus. <https://doi.org/10.4197/Mar.32-2.2>
- Thomas, F., Corre, E., & Cébron, A. (2019). Stable isotope probing and metagenomics highlight the effect of plants on uncultured phenanthrene-degrading bacterial consortium in polluted soil. *ISME Journal*, 13(7), 1814-1830. Scopus. <https://doi.org/10.1038/s41396-019-0394-z>
- Vauloup, A., & Cébron, A. (2025). Development of a device to trap soil bacteria capable of degrading organic contaminants such as alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons. *Journal of Hazardous Materials*, 491. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.137690>
- Wang, J., Su, X., Zhang, C., Han, Z., & Wang, M. (2025). Biodegradation of Benzo(a)pyrene in Contaminated Soil: Plant and Microorganism Contributions from Isotope Tracing. *Toxics*, 13(5). Scopus. <https://doi.org/10.3390/toxics13050405>
- Wang, P., Liu, T., Liu, J., Duan, Y., Han, S., Zhang, Z., Li, L., & Lin, Y. (2022). Effects of different colored polyethylene mulching films on bacterial communities from soil during enrichment incubation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 246. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114160>
- Wang, W., Gao, Y., Du, J., Zheng, L., Kong, X., Wang, H., Yang, X., Duan, L., Zhao, Q., Liu, Y., & Naidu, R. (2023). Dose-effect of nitrogen regulation on the bioremediation of diesel contaminated soil. *Environmental Technology and Innovation*, 32. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103245>
- Xia, M., Chakraborty, R., Terry, N., Singh, R. P., & Fu, D. (2020). Promotion of saltgrass growth in a saline petroleum hydrocarbons contaminated soil using a plant growth promoting bacterial consortium. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 146. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.104808>
- Yessentayeva, K., Reinhard, A., Berzhanova, R., Mukasheva, T., Urich, T., & Mikolasch, A. (2024). Bacterial crude oil and polyaromatic hydrocarbon degraders from Kazakh oil fields as barley growth support. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 108(1). Scopus. <https://doi.org/10.1007/s00253-024-13010-y>
- Yu, Y., Zhang, Y., Zhao, N., Guo, J., Xu, W., Ma, M., & Li, X. (2020). Remediation of crude oil-polluted soil by the bacterial rhizosphere community of *Suaeda salsa* revealed by 16S rRNA genes. *International*

Journal of Environmental Research and Public Health, 17(5). Scopus.

<https://doi.org/10.3390/ijerph17051471>

Yuan, S., Friman, V.-P., Balcázar, J. L., Zheng, X., Ye, M., Sun, M., & Hu, F. (2023). Viral and Bacterial Communities Collaborate through Complementary Assembly Processes in Soil to Survive Organochlorine Contamination. *Applied and Environmental Microbiology*, 89(3). Scopus.

<https://doi.org/10.1128/aem.01810-22>

Zhang, Y., Qian, F., & Bao, Y. (2025). Variations of microbiota and metabolites in rhizosphere soil of *Carmona microphylla* at the co-contaminated site with polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 290. Scopus.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117734>

Zhu, H., Ren, L., Yang, H., & Zhang, J. (2025). Leveraging indigenous *Bacillus* consortia for heavy oil biodegradation and soil bioremediation. *Environmental Technology and Innovation*, 40. Scopus.

<https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104415>