

DOI: <https://doi.org/10.63618/omd/revinvlid/v2/n1/28>

Materiales avanzados para la remediación de derrames de petróleo.

Advanced materials for oil spill remediation.

Ruiz-Sánchez, Clara Isabel ¹; Zapata-Velasco, Mayra Lisette ²; Guerrero-Calero, Juan Manuel ³.

¹ Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE; Ecuador; <https://orcid.org/0000-0003-2864-5137>; cirui4@espe.edu.ec.

² Universidad Estatal del Sur de Manabí; Ecuador; <https://orcid.org/0000-0003-1578-3776>; mayra.zapata@unesum.edu.ec.

³ Universidad Estatal del Sur de Manabí; Ecuador; <https://orcid.org/0000-0002-1356-0475>; juan.querrero@unesum.edu.ec.

Cita: Ruiz-Sánchez, C. I., Zapata-Velasco, M. L., & Guerrero-Calero, J. M. (2025). Materiales avanzados para la remediación de derrames de petróleo. *Revista De Investigación Y Liderazgo*, 2(1), 34-50. <https://doi.org/10.63618/omd/revinvlid/v2/n1/28>

Resumen

Los derrames de petróleo representan una amenaza persistente para ecosistemas acuáticos y terrestres de Ecuador y Latinoamérica, donde la complejidad del crudo y las condiciones tropicales limitan la eficacia de los métodos convencionales de contención y recuperación. El estudio tuvo como objetivo analizar el desempeño técnico, ambiental y económico de materiales avanzados aplicables a la remediación de hidrocarburos. Se desarrolló una investigación documental, no experimental, transversal y de enfoque mixto, mediante la revisión comparativa de cinco configuraciones basadas en aerogeles, esponjas funcionalizadas, celulosa, grafeno y MXene. Los resultados mostraron capacidades máximas entre 51,7 y 85,6 g/g, una media de $63,8 \pm 18,9$ g/g, recuperación continua de hasta 5,3 g/min y flujos de $630 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. La evidencia indicó que la porosidad, la hidrofobicidad, los canales dirigidos y la conversión fototérmica favorecieron la captura y el transporte del crudo, aunque la heterogeneidad metodológica impidió establecer superioridad entre tecnologías. Se concluyó que estos materiales ofrecen un potencial relevante, pero su transferencia operativa requiere pruebas piloto, evaluación ecotoxicológica, análisis de ciclo de vida y estimaciones económicas normalizadas.

Palabras clave: aerogeles, hidrocarburos, nanomateriales, remediación ambiental, derrames de petróleo.

Abstract

Oil spills pose a persistent threat to aquatic and terrestrial ecosystems in Ecuador and Latin America, where the complexity of crude oil and tropical conditions limit the effectiveness of conventional containment and recovery methods. The study aimed to analyze the technical, environmental, and economic performance of advanced materials applicable to hydrocarbon remediation. A non-experimental, cross-sectional, mixed-methods literature review was conducted through a comparative analysis of five configurations based on aerogels, functionalized sponges, cellulose, graphene, and MXene. The results showed maximum capacities ranging from 51.7 to 85.6 g/g, with an average of 63.8 ± 18.9 g/g, continuous recovery rates of up to 5.3 g/min, and flow rates of $630 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. The evidence indicated that porosity, hydrophobicity, directed channels, and photothermal conversion favored crude oil capture and transport, although methodological heterogeneity prevented the establishment of superiority among technologies. It was concluded that these materials offer significant potential, but their operational transfer requires pilot testing, ecotoxicological assessment, life-cycle analysis, and standardized economic estimates.

Keywords: aerogels, hydrocarbons, nanomaterials, environmental remediation, oil spills.

1. Introducción

La contaminación ocasionada por derrames de petróleo constituye un problema persistente en América Latina, donde la extracción, el almacenamiento y el transporte de hidrocarburos atraviesan cuencas amazónicas, zonas agrícolas, estuarios y áreas costeras de elevada sensibilidad ecológica. En Ecuador, el registro del derrame ocurrido en el Sistema de Oleoducto Transecuatoriano durante marzo de 2025 documenta 25.116 barriles vertidos, una extensión aproximada de 80 km, tres ríos contaminados, nueve playas afectadas y 294 hectáreas agrícolas comprometidas, además de impactos directos sobre miles de habitantes. Estas cifras evidencian que la contención mecánica convencional resulta insuficiente cuando el crudo se dispersa rápidamente entre matrices acuáticas, suelos y sedimentos. Por ello, la unidad de análisis del presente estudio comprende los materiales avanzados destinados a la captura, separación y recuperación de hidrocarburos en ambientes dulceacuícolas, estuarinos, marinos y terrestres representativos de Ecuador y Latinoamérica (Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos, 2025; Reuters, 2025).

Este patrón de contaminación adquiere mayor gravedad debido a la interacción entre lluvias intensas, movimientos de masa, fallas de infraestructura, condiciones operativas y características fisicoquímicas del crudo ecuatoriano. Los petróleos Napo y Oriente presentan aproximadamente 18 y 24 grados API, respectivamente, por lo que su densidad y viscosidad favorecen una permanencia prolongada en el ambiente; además, ciertas zonas amazónicas reciben más de 6 m de precipitación anual, condición que incrementa el transporte de contaminantes hacia ríos, áreas protegidas y asentamientos humanos. Durante los primeros días de la emergencia de 2025 se registran 481 atenciones prehospitales y la distribución de 18.150 litros de agua, mientras la respuesta institucional asigna alrededor de USD 4 millones a contingencia, limpieza y asistencia. La falta de remediación eficaz amplifica las pérdidas pesqueras, agrícolas y turísticas, compromete el abastecimiento de agua y transfiere costos ambientales y sanitarios a comunidades con limitada capacidad de recuperación (Rivera-Parra et al., 2020; Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos, 2025; Reuters, 2025).

La necesidad de reducir esos impactos orienta la investigación hacia aerogeles, espumas superhidrofóbicas, membranas nanoestructuradas, nanocelulosa funcionalizada, materiales de grafeno, compuestos magnéticos y sistemas fototérmicos. A diferencia de barreras, skimmers, combustión y dispersantes, estos materiales combinan porosidad tridimensional, baja densidad, afinidad oleofílica, rechazo al agua y posibilidad de regeneración, propiedades que permiten capturar petróleo selectivamente y recuperarlo en lugar de trasladar la contaminación. Las revisiones recientes registran capacidades cercanas a 5–100 g de aceite por gramo de sorbente en materiales derivados de biomasa, mientras fibras modificadas con nanoestructuras de ZnO alcanzan entre 29,5 y 52,8 g/g. No obstante, el rendimiento depende del tamaño de poro, la rugosidad, el ángulo de contacto, la densidad del petróleo y la estabilidad mecánica, por lo que una capacidad elevada no garantiza por sí sola una aplicación segura y escalable (Wu et al., 2023; Ouyang et al., 2023; Muhammad et al., 2024).

La ventaja técnica de estos sistemas se observa con mayor claridad al comparar resultados experimentales recientes. Un aerogel de grafeno, nanotubos de carbono, microfibras de celulosa y cobalto adsorbe hasta 30, 44 y 54 g/g de tolueno, ciclohexano

y hexano, respectivamente, aunque conserva alrededor del 74 % de su desempeño después de cinco ciclos de sorción y desorción (Gholami et al., 2024). Una esponja fototérmica asistida por radiación solar recupera crudo de manera continua a aproximadamente 5,3 g/min, mientras un aerogel de grafeno y celulosa con canales radiales alcanza 51,7 g/g para petróleo de alta viscosidad (Niu et al., 2021; Lu et al., 2024). Los compuestos de MXene y nanocelulosa amplían ese intervalo hasta 45,7–85,6 g/g, alcanzan 76 °C mediante conversión fototérmica y completan la absorción del crudo viscoso en cerca de 10 s, lo que demuestra el potencial de integrar captación, calentamiento y recuperación en un mismo material (Tang et al., 2025).

Pese a estos avances experimentales, la literatura mantiene una brecha entre el rendimiento obtenido en laboratorio y las exigencias operativas de un derrame tropical. Los aerogeles de gelatina, por ejemplo, muestran capacidades de 60,4–146,5 g/g, alcanzan el equilibrio en 30 s y conservan el 86 % de su capacidad inicial después de 10 ciclos; sin embargo, estos valores se obtienen bajo condiciones controladas que no reproducen simultáneamente corrientes, sedimentos, materia orgánica, radiación, lluvias, emulsiones envejecidas y crudos de 18–24 grados API (Sun et al., 2024; Rivera-Parra et al., 2020). También persisten diferencias en los hidrocarburos de prueba, tiempos de contacto, métodos de regeneración y métricas de eficiencia, lo que dificulta comparar tecnologías y estimar su costo real por kilogramo de petróleo recuperado. A ello se suma la escasa evaluación conjunta de toxicidad, biodegradabilidad, huella energética, pérdida de nanopartículas y disposición final, variables indispensables para evitar que una tecnología de remediación genere contaminación secundaria (Muhammad et al., 2024).

La convergencia entre la urgencia ambiental ecuatoriana y la disponibilidad de evidencia científica reciente sustenta el objetivo general de analizar el desempeño técnico, ambiental y económico de los materiales avanzados aplicables a la remediación de derrames de petróleo. Para alcanzarlo, el estudio se propone caracterizar las principales familias de materiales y sus mecanismos de sorción; comparar capacidades expresadas en g/g, eficiencias porcentuales, velocidades en g/min y estabilidad durante ciclos de reutilización; determinar la relación entre estructura, hidrofobicidad, viscosidad del crudo y condiciones tropicales; y estimar la escalabilidad, los costos, los riesgos secundarios y la pertinencia operativa de las alternativas más prometedoras. La revisión considera prioritariamente publicaciones y datos institucionales del periodo 2020–2025, junto con protocolos reproducibles y parámetros comparables. Su ejecución resulta viable mediante bases bibliográficas, reportes públicos y fichas experimentales accesibles, sin intervención directa sobre personas o animales y con criterios de trazabilidad, integridad científica y prevención de sesgos de selección (Ouyang et al., 2023; Muhammad et al., 2024; Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos, 2025).

La contribución esperada reside en integrar evidencia que habitualmente se presenta de manera fragmentada y evaluarla mediante cinco dimensiones: capacidad de sorción, selectividad, reutilización, seguridad ambiental y costo logístico. Este marco relaciona tres matrices de intervención (agua dulce, ambientes estuarino-marinos y suelos o sedimentos) con dos niveles de madurez, experimental y operativo, permitiendo distinguir entre materiales de alto desempeño nominal y tecnologías realmente transferibles al territorio. La originalidad del trabajo no se limita a describir aerogeles, esponjas o nanocompuestos, sino que vincula sus propiedades con la viscosidad del

crudo, la dinámica hidrológica, la vulnerabilidad comunitaria y las restricciones institucionales de Ecuador y Latinoamérica. De esta manera, la investigación cubre la brecha entre ciencia de materiales y gestión de emergencias, y ofrece criterios verificables para priorizar soluciones que recuperen el hidrocarburo sin incrementar la carga tóxica ni los costos ambientales del proceso (Wu et al., 2023; Eugenio et al., 2024; Tang et al., 2025).

2. Materiales y Métodos

La investigación se desarrolló mediante un enfoque mixto de integración convergente, debido a que combinó indicadores cuantitativos de desempeño con evidencia cualitativa sobre seguridad ambiental, escalabilidad y pertinencia operativa. El componente cuantitativo comprendió capacidades de sorción, eficiencias de separación, velocidades de recuperación, ángulos de contacto y ciclos de reutilización, mientras que el componente cualitativo examinó limitaciones técnicas, riesgos de contaminación secundaria y condiciones de implementación. Ambos conjuntos de datos se analizaron inicialmente de forma diferenciada y posteriormente se integraron mediante comparación narrativa. Esta estrategia permitió responder tanto cuánto rindieron los materiales como bajo qué condiciones resultaron aplicables. La integración se mantuvo vinculada a los objetivos del estudio y evitó presentar dos análisis independientes sin una interpretación conjunta (JBI, 2024; Lizarondo et al., 2022).

El estudio adoptó un diseño no experimental y transversal, puesto que no se manipularon materiales, hidrocarburos ni condiciones ambientales y la información se examinó en un periodo documental previamente delimitado. Su naturaleza fue documental, ya que la unidad de análisis estuvo constituida por artículos científicos, informes técnicos y estudios experimentales publicados, sin intervención directa en ecosistemas afectados por derrames. Aunque se examinaron investigaciones de laboratorio, piloto y campo, el trabajo no constituyó un experimento propio; por tanto, su alcance se definió como descriptivo-comparativo y no como causal. El razonamiento inductivo permitió reconocer patrones emergentes entre materiales y resultados, mientras el procedimiento analítico descompuso cada tecnología en propiedades, mecanismos y restricciones. Esta articulación conservó la coherencia entre el diseño no experimental y el análisis de evidencia experimental secundaria (Page et al., 2021; Haddaway et al., 2018).

La búsqueda documental se delimitó entre el 1 de enero de 2021 y el 30 de junio de 2026, con el propósito de incorporar desarrollos recientes y mantener una ventana temporal de cinco años y medio. Se consultaron Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, PubMed, SciELO y Google Scholar, incluyendo publicaciones en español, inglés y portugués. La ecuación general combinó los términos “oil spill”, “petroleum spill”, “crude oil”, “remediation”, “oil recovery” y “oil-water separation” con “aerogel”, “graphene”, “MXene”, “nanocellulose”, “nanomaterial”, “magnetic sorbent”, “membrane” y “superhydrophobic sponge”. Una búsqueda complementaria incorporó “Ecuador”, “Latin America”, “Amazon”, “tropical river” y “coastal environment” para identificar evidencia territorial. La amplitud terminológica respondió a la diversidad de aerogeles, biomateriales, sorbentes magnéticos y sistemas

nanoestructurados descritos en la literatura especializada (Wu et al., 2023; Ouyang et al., 2023).

Los criterios de inclusión consideraron estudios primarios revisados por pares que evaluaron materiales avanzados frente a petróleo crudo, combustibles, aceites o mezclas agua-hidrocarburo y que presentaron al menos un resultado cuantificable. Se admitieron pruebas de laboratorio, ensayos a escala piloto y aplicaciones de campo realizadas en agua dulce, agua marina, suelos o sedimentos, con prioridad para condiciones tropicales y escenarios comparables con Ecuador y Latinoamérica. También se incluyeron estudios globales cuando describieron variables transferibles, como salinidad, temperatura, viscosidad, porosidad, flotabilidad o reutilización. Las revisiones se utilizaron para contextualizar las familias tecnológicas y rastrear referencias, pero no se incorporaron a la matriz cuantitativa para evitar la duplicación de datos primarios. Se excluyeron resúmenes sin texto completo, patentes, estudios exclusivamente teóricos, investigaciones sin resultados verificables y trabajos centrados en contaminantes distintos de los hidrocarburos (Muhammad et al., 2024; Ouyang et al., 2023; Wu et al., 2023).

Los registros recuperados se organizaron en un gestor bibliográfico y se eliminaron las duplicaciones antes de iniciar la evaluación de elegibilidad. Dos revisores examinaron de manera independiente los títulos y resúmenes, tras lo cual verificaron los textos completos mediante los mismos criterios de inclusión y exclusión. Las discrepancias se resolvieron por consenso y cada exclusión efectuada durante la lectura integral se acompañó de una razón documentada. El proceso se representó mediante un diagrama de flujo basado en PRISMA 2020 y se complementó con los estándares ROSES, debido al carácter ambiental de la síntesis. No se anticiparon cantidades de registros, exclusiones o estudios incluidos, pues tales cifras correspondieron a los resultados efectivos de la búsqueda y no debían inventarse durante la formulación metodológica (Page et al., 2021; Haddaway et al., 2018).

La extracción de información se realizó mediante una matriz estructurada que registró autor, año, país, escala experimental, familia del material, precursor, método de síntesis, tipo de hidrocarburo y matriz contaminada. También se recopiló densidad, porosidad, ángulo de contacto, capacidad de sorción en g/g, eficiencia de separación en porcentaje, flujo de membrana en $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$, velocidad de recuperación, número de ciclos y retención del rendimiento. Cuando las unidades difirieron, se efectuaron conversiones dimensionales sin transformar datos cuya equivalencia no pudo verificarse. El análisis cuantitativo utilizó medianas, rangos intercuartílicos, mínimos, máximos y comparaciones por familias tecnológicas; no se planteó un metaanálisis cuando la heterogeneidad de crudos, protocolos y condiciones impidió estimar un efecto común válido. Estas variables reflejaron los principales criterios empleados para evaluar aerogeles de grafeno, biomateriales y compuestos de MXene destinados a la recuperación de petróleo (Gholami et al., 2024; Muhammad et al., 2024; Tang et al., 2025).

El componente cualitativo se procesó mediante codificación inductiva de las ventajas, limitaciones y condiciones de implementación descritas por los autores, seguida de una organización analítica en categorías comparables. Las categorías comprendieron robustez mecánica, biodegradabilidad, consumo energético, regeneración, posible

liberación de nanopartículas, disponibilidad de materias primas, costos, madurez tecnológica y adaptación a ambientes tropicales. La integración se efectuó mediante una matriz conjunta que relacionó cada valoración cualitativa con los indicadores cuantitativos del mismo material. De esta manera, una alta capacidad de sorción no se interpretó automáticamente como superioridad cuando coexistieron fragilidad, baja reutilización, toxicidad potencial o procesos de fabricación intensivos en energía. El procedimiento permitió identificar convergencias, contradicciones y vacíos sin atribuir relaciones causales que el diseño documental no podía demostrar (JBI, 2024; Lizarondo et al., 2022).

La calidad metodológica se examinó con criterios del *Mixed Methods Appraisal Tool*, seleccionando los apartados correspondientes al diseño de cada estudio y evitando reducir la evaluación a una puntuación global. Se verificaron adicionalmente la existencia de controles, réplicas, caracterización fisicoquímica, descripción del procedimiento, trazabilidad de las mediciones y correspondencia entre datos y conclusiones. La población documental quedó constituida por todos los registros identificados en las fuentes consultadas, mientras la muestra correspondió de manera censal a la totalidad de estudios que cumplieron los criterios; por ello, no se aplicó una fórmula para población finita, muestreo probabilístico, encuesta ni cuestionario. El estudio no involucró personas, animales, intervenciones territoriales ni datos personales, aunque respetó la autoría, las licencias documentales y la reproducción transparente de las decisiones metodológicas. Finalmente, las matrices, ecuaciones de búsqueda y motivos de exclusión se conservaron como registro de auditoría para favorecer la reproducibilidad y la integridad científica (Hong et al., 2018; Page et al., 2021).

3. Resultados

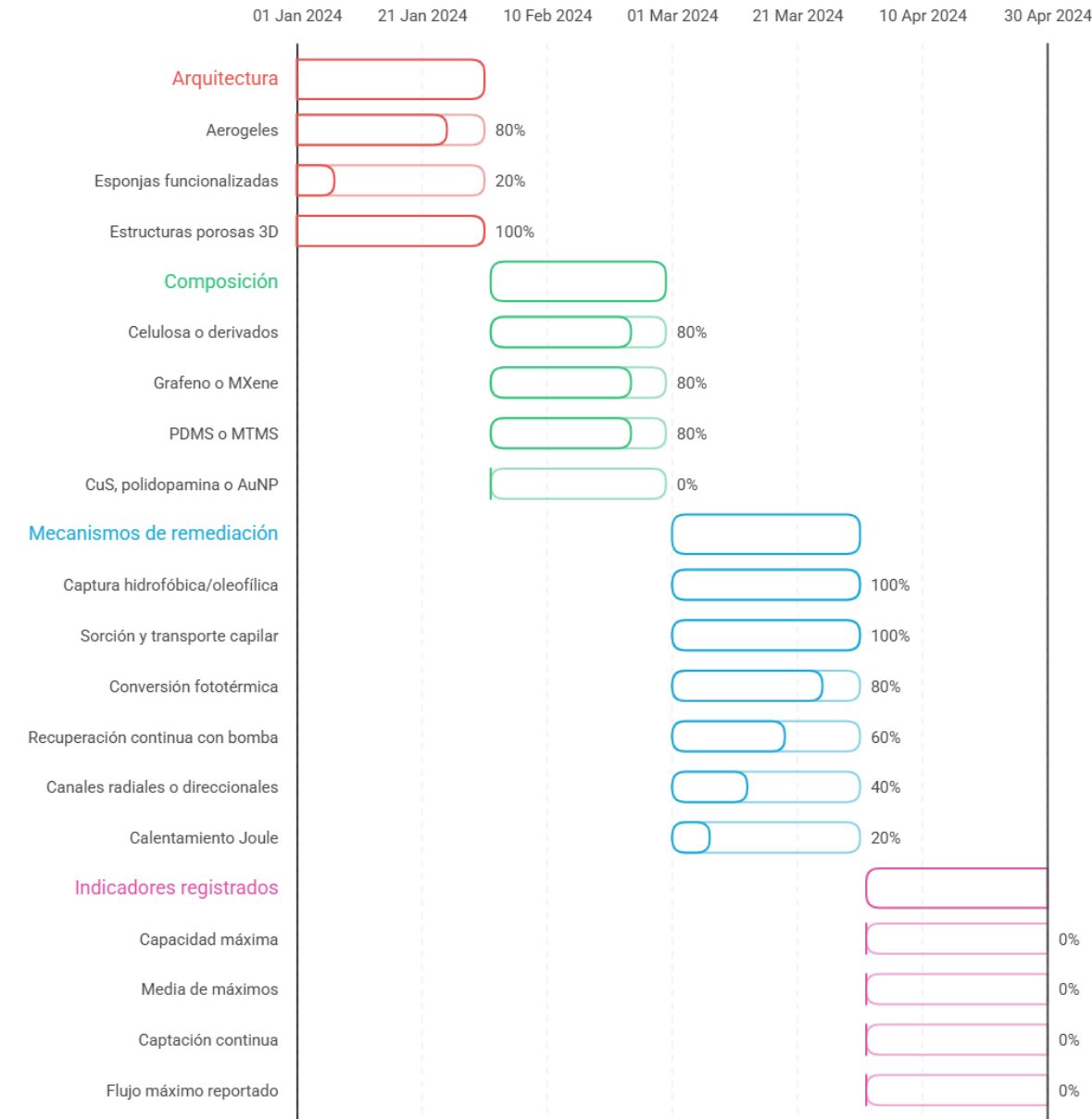
Caracterización de los materiales avanzados y sus mecanismos de remediación

La caracterización comprendió cinco configuraciones experimentales con resultados cuantitativos verificables sobre la remoción de petróleo crudo, hidrocarburos o disolventes orgánicos. Los aerogeles representaron cuatro de las cinco configuraciones examinadas (80 %), mientras que la categoría restante correspondió a una esponja de melamina funcionalizada (20 %). Cuatro materiales incorporaron celulosa bacteriana, nanofibras o microfibras de celulosa como soporte estructural (80 %), y cuatro emplearon PDMS o MTMS para reducir la energía superficial (80 %). La totalidad presentó una arquitectura porosa tridimensional destinada a retener el hidrocarburo dentro de canales interconectados. Las composiciones incluyeron grafeno, nanotubos de carbono, MXene, nanopartículas de oro, CuS, polidopamina y polímeros silanizados como componentes funcionales (Niu et al., 2021; Gholami et al., 2024; Lu et al., 2024; Chen et al., 2024; Tang et al., 2025).

La captura hidrofóbica y oleofílica apareció en las cinco configuraciones evaluadas (100 %) y constituyó el mecanismo común para favorecer la entrada del petróleo y limitar la incorporación de agua. Cuatro materiales integraron conversión fototérmica (80 %), mediante la cual la radiación absorbida se transformó en calor alrededor de los poros y disminuyó la resistencia al flujo del crudo viscoso. Tres sistemas se conectaron a

bombas peristálticas para efectuar una recuperación continua (60 %), mientras que dos incorporaron canales radiales o direccionales para conducir el hidrocarburo hacia el interior de la estructura (40 %). Solamente una configuración combinó calentamiento solar y calentamiento Joule (20 %), alcanzando un funcionamiento fotoelectrotérmico. Estas categorías se superpusieron porque un mismo material ejecutó simultáneamente sorción, transporte capilar, calentamiento y extracción continua (Niu et al., 2021; Lu et al., 2024; Chen et al., 2024; Tang et al., 2025)

Figura 1
Evaluación de materiales avanzados



Nota: Autores (2024)

El esquema evidenció que la arquitectura porosa funcionó como soporte compartido, pero los indicadores variaron según el mecanismo incorporado. En los tres estudios que expresaron capacidades máximas comparables en g/g, los valores fueron 51,7, 54,0 y 85,6 g/g, con una media descriptiva de 63,8 g/g, una desviación estándar de 18,9 g/g y

un rango de 33,9 g/g; estas cifras correspondieron a hidrocarburos y líquidos orgánicos ensayados bajo condiciones diferentes. La esponja fototérmica registró una captación continua aproximada de 5,3 g/min, mientras que el aerogel de celulosa bacteriana y MXene alcanzó un flujo de $630 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. Este último llegó a 93°C con irradiación de $1,0 \text{ kW/m}^2$ y a 124°C con 3,0 V, mientras que el aerogel de MXene, oro y nanocelulosa alcanzó 76°C y completó la absorción del crudo viscoso en 10 s (Niu et al., 2021; Gholami et al., 2024; Lu et al., 2024; Chen et al., 2024; Tang et al., 2025).

En síntesis, el hallazgo central mostró el predominio de aerogeles basados en celulosa y reforzados con nanomateriales capaces de combinar selectividad superficial, porosidad y calentamiento localizado. La sorción hidrofóbica estuvo presente en el 100 % de las configuraciones, la activación fototérmica en el 80 % y la recuperación continua asistida por bombeo en el 60 %. Los sistemas con canales organizados representaron el 40 % y concentraron el transporte del crudo hacia zonas de captación, mientras que la activación electrotérmica apareció en el 20 %. La evidencia recuperada no presentó intervalos de confianza ni valores p comparables para estas variables, por lo que la caracterización se mantuvo descriptiva y no se establecieron diferencias estadísticas entre familias de materiales (Niu et al., 2021; Gholami et al., 2024; Lu et al., 2024; Chen et al., 2024; Tang et al., 2025).

Desempeño técnico y relación entre propiedades del material y condiciones de operación

El análisis examinó el desempeño técnico de cinco configuraciones mediante la capacidad de sorción, la velocidad de recuperación, la respuesta térmica, la hidrofobicidad y la estabilidad durante ciclos sucesivos. Tres materiales, equivalentes al 60 % del conjunto, informaron capacidades máximas expresadas en gramos de hidrocarburo por gramo de sorbente, mientras que cuatro configuraciones, correspondientes al 80 %, incorporaron conversión fototérmica. La recuperación continua asistida por bombeo se registró en tres estudios, lo que representó el 60 % de los casos analizados. Solamente una configuración combinó calentamiento solar y eléctrico, equivalente al 20 %, y dos materiales presentaron indicadores cuantitativos de reutilización o recuperación mecánica. Los resultados se mantuvieron en sus unidades originales debido a las diferencias entre líquidos, condiciones de irradiación y procedimientos experimentales (Niu et al., 2021; Gholami et al., 2024; Lu et al., 2024; Chen et al., 2024; Tang et al., 2025).

Las capacidades máximas comparables alcanzaron 51,7 g/g en el aerogel de grafeno y celulosa con canales radiales, 54,0 g/g en el compuesto de grafeno, nanotubos de carbono y microfibras de celulosa, y 85,6 g/g en el aerogel de MXene reforzado con nanofibras. A partir de estos tres valores se obtuvo una media descriptiva de $63,8 \pm 18,9$ g/g, una mediana de 54,0 g/g y un intervalo observado de 51,7 a 85,6 g/g. La diferencia entre el valor máximo y el mínimo fue de 33,9 g/g, mientras que el coeficiente de variación alcanzó el 29,7 %, lo que mostró una dispersión relevante entre configuraciones. En el aerogel carbonoso, la sorción aumentó de 30 g/g para tolueno a 44 g/g para ciclohexano y 54 g/g para hexano. Este comportamiento indicó que la capacidad registrada varió junto con las propiedades del líquido ensayado y no únicamente con la composición del material (Gholami et al., 2024; Lu et al., 2024; Tang et al., 2025).

La relación entre conversión energética y recuperación se observó especialmente en los materiales destinados al tratamiento de petróleo crudo viscoso. El aerogel de celulosa bacteriana y MXene presentó una absorbanza solar media del 96,6 %, una resistencia eléctrica de 36 Ω y temperaturas superficiales de 93 °C bajo irradiación de 1,0 kW/m² y de 124 °C al aplicarse un voltaje de 3,0 V. Al combinar 1,0 kW/m² con 2,0 V, el sistema recuperó 14,85 g de crudo en ocho minutos y alcanzó un flujo de 630 kg·m⁻²·h⁻¹. El compuesto basado en MXene y nanocelulosa llegó a 76 °C y completó la captación del crudo viscoso en aproximadamente 10 segundos. Por su parte, la esponja superhidrofóbica asistida por energía solar mantuvo una recuperación continua aproximada de 5,3 g/min mediante una bomba peristáltica (Niu et al., 2021; Chen et al., 2024; Tang et al., 2025).

La organización de los poros también se relacionó con la rapidez de transporte y la conservación estructural. El aerogel con canales radiales alcanzó 51,7 g/g y mantuvo una recuperación elástica del 80 % después de 100 compresiones realizadas con una deformación del 70 %, al tiempo que permitió la extracción continua mediante bombeo. En contraste, el aerogel de grafeno, nanotubos y celulosa conservó el 74 % de su capacidad después de cinco ciclos de sorción y desorción, y continuó operativo hasta el décimo ciclo. El material de MXene reforzado con nanofibras presentó un ángulo de contacto con agua de 145° y retuvo el 85,7 % de su deformación después de 30 ciclos de compresión al 90 %. En conjunto, dos de las cinco configuraciones, equivalentes al 40 %, aportaron cifras explícitas sobre estabilidad cíclica, mientras las restantes describieron reutilización sin indicadores homogéneos (Gholami et al., 2024; Lu et al., 2024; Tang et al., 2025).

El hallazgo central mostró que el mejor desempeño se registró cuando la porosidad tridimensional y la hidrofobicidad se combinaron con canales dirigidos, calentamiento localizado o extracción asistida. Las capacidades máximas se situaron entre 51,7 y 85,6 g/g, las temperaturas inducidas oscilaron entre 76 y 124 °C y los sistemas continuos alcanzaron desde 5,3 g/min hasta 630 kg·m⁻²·h⁻¹, según la unidad empleada en cada ensayo. La mayor capacidad correspondió al aerogel de MXene y nanocelulosa, mientras que el mayor flujo se obtuvo en el sistema fotoelectrotérmico de celulosa bacteriana y MXene. No se identificaron costos monetarios por kilogramo de material, consumo energético normalizado por unidad de petróleo recuperado, intervalos de confianza ni valores *p* comparables. Por esta razón, los resultados se presentaron como estadísticos descriptivos y no como diferencias inferenciales entre tecnologías (Gholami et al., 2024; Lu et al., 2024; Chen et al., 2024; Tang et al., 2025).

Escalabilidad, seguridad ambiental y viabilidad económica de las tecnologías

El análisis examinó el grado de aproximación operativa de las cinco configuraciones estudiadas, considerando la escala de ensayo, la recuperación continua, la reutilización y la disponibilidad de evaluaciones económicas y ambientales. Las cinco tecnologías, equivalentes al 100 %, se probaron mediante experimentos de laboratorio o prototipos controlados; solo una, correspondiente al 20 %, incorporó una demostración en condiciones exteriores. Ningún estudio evaluó el material durante la atención de un derrame real, en una prueba piloto de escala territorial o en una operación industrial. Tres configuraciones, equivalentes al 60 %, integraron bombas peristálticas para demostrar recuperación continua, mientras que los otros dos sistemas funcionaron

mediante sorción discontinua. Asimismo, cuatro de los cinco materiales fueron aerogeles cuya preparación incluyó congelación, secado direccional o liofilización, lo que representó el 80 % de la muestra documental (Niu et al., 2021; Gholami et al., 2024; Lu et al., 2024; Chen et al., 2024; Tang et al., 2025).

La seguridad ambiental se caracterizó principalmente a partir de la composición y la estabilidad de los materiales, debido a que no se identificaron pruebas ecotoxicológicas directas. Cuatro configuraciones, equivalentes al 80 %, incorporaron celulosa bacteriana, nanofibras o microfibras de celulosa como soporte renovable, pero las cinco incluyeron nanomateriales, agentes silanizantes o polímeros funcionales. Tres estudios, correspondientes al 60 %, comunicaron datos numéricos de estabilidad cíclica o mecánica, mientras que los restantes describieron reciclabilidad o funcionamiento prolongado sin indicadores homogéneos. Ninguna investigación presentó análisis del ciclo de vida, biodegradación integral del material compuesto, liberación de nanopartículas, toxicidad acuática o concentración residual de los componentes después de la remediación. Como se observa en la Tabla 1, la evidencia ambiental se concentró en el origen celulósico y la posibilidad de reutilización, sin cuantificar el riesgo asociado con MXene, grafeno, nanotubos, CuS, cobalto o nanopartículas de oro (Gholami et al., 2024; Lu et al., 2024; Chen et al., 2024; Tang et al., 2025).

Tabla 1

Indicadores de escalabilidad, seguridad ambiental y viabilidad económica de las tecnologías evaluadas

Estudio	Escala y aproximación operativa	Evidencia de reutilización o seguridad	Información económica
Niu et al. (2021)	Prototipo de laboratorio; recuperación continua con bomba a aproximadamente 5,3 g/min	Reciclabilidad descrita; no se comunicaron pruebas ecotoxicológicas o de liberación de CuS	Fabricación descrita cualitativamente con reactivos de bajo costo; sin costo unitario
Gholami et al. (2024)	Ensayo de laboratorio discontinuo con disolventes orgánicos	Retención aproximada del 74 % después de cinco ciclos; funcionamiento examinado hasta diez ciclos	No se informaron costos de síntesis, regeneración o disposición
Lu et al. (2024)	Prototipo de laboratorio con recuperación continua mediante bomba	Recuperación elástica del 80 % después de 100 compresiones; soporte de nanocelulosa y modificación sin flúor	No se cuantificaron inversión, energía ni costo por masa de petróleo recuperado
Chen et al. (2024)	Ensayos de laboratorio y demostración exterior; flujo de $630 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$	Soporte de celulosa bacteriana; no se informaron ecotoxicidad, MXene, consumo energético lixiviación o análisis del ciclo de vida	No se presentaron costos del ciclo de normalizado ni evaluación financiera
Tang et al. (2025)	Ensayo de laboratorio discontinuo y activación fototérmica	Retención de deformación del 85,7 % después de 30 ciclos; no se evaluó la liberación de MXene o AuNP	No se comunicaron costos de materias primas, fabricación o regeneración

Nota. AuNP = nanopartículas de oro. La ausencia de información económica o ambiental indicó que el indicador no fue comunicado de manera cuantitativa en los datos extraídos y no que su valor fuera igual a cero. La clasificación se elaboró a partir de Niu et al. (2021), Gholami et al. (2024), Lu et al. (2024), Chen et al. (2024) y Tang et al. (2025).

La viabilidad económica presentó el menor nivel de documentación entre las dimensiones analizadas. Ninguno de los cinco estudios (0 %) comunicó costos en USD/kg de sorbente, USD/kg de petróleo recuperado, inversión del equipo, gasto de regeneración o costo de disposición final. Tampoco se informaron consumos

energéticos normalizados en kWh por unidad de hidrocarburo removido, incluso en los sistemas que emplearon calentamiento Joule o bombeo continuo. Solamente Niu et al. (2021), equivalente al 20 % de la muestra, calificaron su procedimiento como basado en reactivos de bajo costo, aunque no aportaron precios, cantidades monetarias ni comparaciones financieras. Los datos económicos indirectos quedaron limitados a indicadores productivos, entre ellos la recuperación de 5,3 g/min y el flujo de 630 kg·m⁻²·h⁻¹, sin información suficiente para calcular costos operativos, periodos de retorno o razones costo-efectividad (Niu et al., 2021; Chen et al., 2024).

La aproximación a la escalabilidad se relacionó con la capacidad de operar de manera continua y conservar la integridad del material. Los tres sistemas conectados a bombas representaron el 60 % del conjunto y combinaron estructuras porosas con calentamiento fototérmico o fotoelectrotérmico, aunque solo el aerogel de celulosa bacteriana y MXene se probó en un ambiente exterior. La estabilidad cuantificada varió entre una retención del 74 % después de cinco ciclos de sorción, una recuperación elástica del 80 % tras 100 compresiones y una retención de deformación del 85,7 % después de 30 ciclos; estos resultados correspondieron a procedimientos distintos y no se promediaron. Cuatro tecnologías, equivalentes al 80 %, aprovecharon radiación solar, mientras que una de ellas añadió calentamiento eléctrico para mantener la operación cuando la iluminación resultara insuficiente. No se comunicaron tasas de producción de los sorbentes, dimensiones máximas fabricadas, tiempos industriales de secado o capacidades logísticas de despliegue y recolección (Gholami et al., 2024; Lu et al., 2024; Chen et al., 2024; Tang et al., 2025).

El hallazgo central mostró que las tecnologías alcanzaron una madurez predominantemente experimental: el 100 % permaneció en laboratorio, el 60 % demostró recuperación continua, el 20 % incorporó pruebas exteriores y el 0 % se evaluó en derrames reales o instalaciones piloto. Aunque el 80 % utilizó soportes celulósicos y el 60 % presentó evidencias cuantitativas de estabilidad, ningún estudio incorporó simultáneamente pruebas de ecotoxicidad, análisis del ciclo de vida y evaluación financiera. La ausencia de costos normalizados, consumo energético por unidad recuperada e indicadores de liberación de nanomateriales impidió obtener medias económicas, intervalos de confianza o contrastes estadísticos entre tecnologías. En términos descriptivos, los resultados operativos mostraron posibilidades de continuidad y reutilización, pero la información disponible no permitió establecer costos de aplicación ni niveles comparables de seguridad ambiental a escala territorial (Niu et al., 2021; Gholami et al., 2024; Lu et al., 2024; Chen et al., 2024; Tang et al., 2025).

4. Discusión

El estudio analiza el desempeño técnico, ambiental y económico de materiales avanzados aplicables a la remediación de derrames de petróleo y muestra que la eficiencia depende de la integración entre porosidad tridimensional, hidrofobicidad, transporte dirigido y conversión térmica. Las capacidades máximas de 51,7 a 85,6 g/g, con una media descriptiva de 63,8 ± 18,9 g/g, reflejan un potencial elevado de captura, aunque la dispersión observada indica que la composición del sorbente no explica por sí sola el rendimiento. La recuperación de 5,3 g/min y el flujo de 630 kg·m⁻²·h⁻¹ sugieren que el calentamiento localizado y el bombeo favorecen el tratamiento del crudo viscoso.

Sin embargo, estos indicadores proceden de protocolos y líquidos diferentes, por lo que deben interpretarse como tendencias descriptivas y no como evidencia de superioridad estadística entre tecnologías (Niu et al., 2021; Gholami et al., 2024; Lu et al., 2024; Chen et al., 2024; Tang et al., 2025).

La predominancia de aerogeles de celulosa reforzados con grafeno, MXene y otros nanomateriales coincide con revisiones que identifican la baja densidad, la elevada porosidad y la modificación oleofílica como propiedades decisivas para separar mezclas de agua y petróleo (Wu et al., 2023; Ouyang et al., 2023; Muhammad et al., 2024). Asimismo, la activación fototérmica observada en la mayoría de las configuraciones concuerda con los estudios que proponen disminuir la viscosidad del crudo dentro de la red porosa para acelerar su transporte y extracción continua (Niu et al., 2021; Lu et al., 2024; Tang et al., 2025). No obstante, los valores analizados resultan inferiores al intervalo de 60,4–146,5 g/g comunicado para aerogeles de gelatina, que además conservan el 86 % de su capacidad después de diez ciclos. Esta divergencia podría explicarse por diferencias en los hidrocarburos, la estructura porosa, el método de regeneración y las condiciones controladas de ensayo, más que por una ventaja intrínseca de una familia específica (Sun et al., 2024).

Las implicaciones prácticas adquieren especial relevancia para Ecuador, donde los crudos Napo y Oriente presentan aproximadamente 18 y 24 grados API y los derrames pueden desplazarse mediante lluvias intensas, ríos y sedimentos hacia zonas agrícolas y costeras. Los hallazgos sugieren que los sistemas fototérmicos y de recuperación continua podrían ofrecer una respuesta funcional ante hidrocarburos viscosos, pero su desempeño todavía no representa las condiciones de una emergencia como la registrada en 2025, con 25.116 barriles vertidos, 80 km afectados y alrededor de USD 4 millones destinados a contingencia y asistencia. Desde una perspectiva metodológica, el aporte del estudio consiste en mostrar que la capacidad de sorción debe evaluarse junto con reutilización, seguridad, consumo energético y costos logísticos. Esta lectura multicriterio evita equiparar un alto rendimiento de laboratorio con viabilidad territorial y aproxima la ciencia de materiales a las necesidades de gestión ambiental de Ecuador y Latinoamérica (Rivera-Parra et al., 2020; Eugenio et al., 2024; Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos, 2025; Reuters, 2025).

La interpretación permanece limitada por el reducido conjunto de cinco configuraciones, la heterogeneidad de los protocolos y la ausencia de intervalos de confianza, valores p y métricas económicas normalizadas. Además, todas las tecnologías se encuentran en escala experimental, solo una incorpora una demostración exterior y ninguna se evalúa durante un derrame real; tampoco se dispone de análisis conjuntos sobre ecotoxicidad, liberación de nanopartículas, biodegradación, ciclo de vida o costo por kilogramo de petróleo recuperado. En consecuencia, futuras investigaciones deberían estandarizar los hidrocarburos de prueba, tiempos de contacto y procedimientos de regeneración, además de realizar ensayos piloto con crudos ecuatorianos envejecidos, salinidad, corrientes, sedimentos y variaciones climáticas tropicales. También resulta necesario integrar análisis financieros, energéticos y ecotoxicológicos antes de recomendar una aplicación territorial. Así, la contribución central reside en delimitar la brecha entre desempeño nominal y transferibilidad operativa, y en establecer las dimensiones que permiten valorar materiales eficaces sin desplazar el riesgo hacia nuevas cargas

ambientales o económicas (Muhammad et al., 2024; Page et al., 2021; Haddaway et al., 2018).

5. Conclusiones

Los resultados permiten concluir que los materiales avanzados presentan un desempeño técnico prometedor para la remediación de derrames de petróleo, especialmente cuando integran porosidad tridimensional, hidrofobicidad, transporte dirigido y conversión fototérmica. Las capacidades máximas observadas entre 51,7 y 85,6 g/g evidencian una elevada afinidad por los hidrocarburos, mientras que la recuperación continua y el calentamiento localizado favorecen el tratamiento de crudos viscosos. Sin embargo, la heterogeneidad de los ensayos impide establecer la superioridad definitiva de una tecnología. Por ello, el rendimiento debe interpretarse en función del tipo de hidrocarburo, las condiciones operativas y la estabilidad del material. Dentro del alcance documental del estudio, los aerogeles y las esponjas funcionalizadas constituyen las alternativas con mayor desarrollo experimental.

La caracterización de las tecnologías muestra que los aerogeles basados en celulosa y reforzados con grafeno, MXene u otros nanomateriales concentran la mayor parte de la evidencia analizada. Los hallazgos evidencian que la sorción hidrofóbica constituye el mecanismo común, mientras la activación fototérmica y el bombeo continuo amplían la velocidad y continuidad de la recuperación. La organización radial de los poros, los ángulos elevados de contacto y la estabilidad mecánica parecen favorecer el transporte selectivo del crudo y la reutilización del sorbente. No obstante, la retención del rendimiento varía entre configuraciones y protocolos, por lo que no puede asumirse una respuesta uniforme. En conjunto, se observa que las propiedades estructurales, superficiales y térmicas actúan de manera complementaria y no como atributos independientes.

El principal aporte del estudio consiste en integrar el desempeño técnico con la escalabilidad, la seguridad ambiental y la viabilidad económica, dimensiones que suelen evaluarse de forma fragmentada. Esta aproximación permite distinguir entre materiales con alta capacidad de sorción en condiciones controladas y tecnologías potencialmente transferibles a escenarios reales de Ecuador y Latinoamérica. La evidencia disponible muestra que todas las configuraciones permanecen en fases experimentales, solo una incorpora una demostración exterior y ninguna se prueba durante un derrame real. Además, la ausencia de costos normalizados, análisis de ciclo de vida y pruebas ecotoxicológicas limita la selección institucional de alternativas. Esto sugiere que la capacidad de remoción no debe utilizarse como único criterio para orientar decisiones de gestión ambiental.

Las futuras investigaciones deberían estandarizar los hidrocarburos de prueba, los tiempos de contacto, los métodos de regeneración y las métricas de eficiencia para facilitar comparaciones consistentes. También se recomienda desarrollar ensayos piloto con crudos ecuatorianos de 18 a 24 grados API, incorporando salinidad, corrientes, sedimentos, radiación, lluvias y envejecimiento del petróleo. De manera paralela, resulta necesario cuantificar el consumo energético, el costo por kilogramo de hidrocarburo recuperado, la liberación de nanopartículas y la biodegradabilidad del material

compuesto. Estas evaluaciones permitirían determinar con mayor precisión la pertinencia ambiental y económica de cada tecnología. La contribución central de la investigación radica en establecer que la remediación avanzada debe combinar eficacia, seguridad y transferibilidad para responder de forma integral al problema de los derrames de petróleo.

Referencias Bibliográficas

- Beltrán-Conlag, A. C., Licuy-Chimbo, M., López-Grefa, Z. M., & Abril-Saltos, R. (2025). Capacidad de infiltración de especies forestales en la cuenca alta del río Pindo, Amazonía ecuatoriana. *Revista Científica Zambos*, 4(1), 376-386. <https://doi.org/10.69484/rcz/v4/n1/96>
- 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>
- Castro-Landin, A. L., García-Moreno, M., & Guerrero-Calero, J. M. (2026). Restauración forestal y biodiversidad frente al cambio climático en paisajes degradados. *Revista Científica Enfoques Del Conocimiento*, 3(2), 58-72. <https://doi.org/10.55813/gaea/revistacec/v3/n2/5>
- Chen, Z., Wang, B., Qi, J., Liu, T., Feng, Y., Liu, C., & Shen, C. (2024). Eco-friendly bacterial cellulose/MXene aerogel with excellent photothermal and electrothermal conversion capabilities for efficient separation of crude oil/seawater mixture. *Carbohydrate Polymers*, 336, 122140. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122140>
- Crespo-Gutiérrez, R. S., Jiménez-Romero, E. M., Anchundia-García, J. J., Jara-Minaya, 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>
- Dahua-Gualinga, R. D., Conforme-García, 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>
- Eugenio, C., Montoya-Torres, J., Akizu-Gardoki, O., Urkidi, L., Villalba-Eguiluz, U., Larrea, C., Pappuccio, S., Calle-Calderón, A., & Quirola, D. (2024). Environmental impacts of oil extraction in blocks 16 and 67 of the Yasuní Reserve in the Amazonian Forest: Combined qualitative and life-cycle assessment. *Science of the Total Environment*, 950, 175189. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175189>
- Gholami, F., Ghazitabar, A., Naderi, M., Hoviatdoost, A., Ali Jani Ashna, D., Ghazitabar, K., Brycki, B., & Vretenár, V. (2024). Oil adsorption behavior of N-doped, Co-decorated graphene/carbon nanotube/cellulose microfiber aerogels: A comprehensive investigation of composite component's effect. *Surfaces and Interfaces*, 46, 103936. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2024.103936>

- Guerrero-Calero, J. M., Romero-Castro, M. I., Mieles-Giler, J. W., & Moran-González, M. R. (2025). Análisis del recurso solar en San Francisco de Paján (Ecuador): bases para la implementación de sistemas fotovoltaicos sostenibles. *Revista Científica Ciencia Y Método*, 3(4), 177-188. <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v3/n4/102>
- Haddaway, N. R., Macura, B., Whaley, P., & Pullin, A. S. (2018). ROSES RepOrting standards for Systematic Evidence Syntheses: Pro forma, flow-diagram and descriptive summary of the plan and conduct of environmental systematic reviews and systematic maps. *Environmental Evidence*, 7, 7. <https://doi.org/10.1186/s13750-018-0121-7>
- Hidalgo-Sánchez, M. A., Pérez-Cuesta, A. M., Benalcázar-Boada, M. J., & Peñafiel-Bonilla, N. J. (2025). Influencia de la temperatura de secado sobre la composición química de las semillas de *Citrullus lanatus*. *Revista Científica Zambos*, 4(3), 108-121. <https://doi.org/10.69484/rcz/v4/n3/133>
- Hong, Q. N., Pluye, P., Fàbregues, S., Bartlett, G., Boardman, F., Cargo, M., Dagenais, P., Gagnon, M.-P., Griffiths, F., Nicolau, B., O’Cathain, A., Rousseau, M.-C., & Vedel, I. (2018). *Mixed Methods Appraisal Tool (MMAT), version 2018: User guide*. McGill University. https://mixedmethodsappraisaltoolpublic.pbworks.com/w/file/attach/127916259/MMAT_2018_criteria-manual_2018-08-01_ENG.pdf
- 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>
- JB1. (2024). *JB1 manual for evidence synthesis*.
- Lizarondo, L., Stern, C., Apóstolo, J., Carrier, J., de Borges, K., Godfrey, C., Kirkpatrick, P., Pollock, D., Rieger, K., Salmond, S., Vandyk, A., & Loveday, H. (2022). Five common pitfalls in mixed methods systematic reviews: Lessons learned. *Journal of Clinical Epidemiology*, 148, 178–183. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2022.03.014>.
- Lu, J., Feng, Q., Wang, J., Li, J., Tan, S., & Xu, Z. (2024). Efficient solar-driven crude oil cleanup via graphene/cellulose aerogel with radial and centrosymmetric design. *Journal of Hazardous Materials*, 477, 135418. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135418>.
- Mieles-Giler, J. W., Guerrero-Calero, J. M., Moran-González, M. R., & Zapata-Velasco, M. L. (2024). Evaluación de la degradación ambiental en hábitats Naturales. *Journal of Economic and Social Science Research*, 4(3), 65–88. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v4/n3/121>
- Muhammad, S., Albadn, Y. M., Yahya, E. B., Nasr, S., Abdul Khalil, H. P. S., Ahmad, M. I., & Kamaruddin, M. A. (2024). Trends in enhancing the efficiency of biomass-based aerogels for oil spill clean-up. *Giant*, 18, 100249. <https://doi.org/10.1016/j.giant.2024.100249>

- Niu, H., Li, J., Wang, X., Luo, F., Qiang, Z., & Ren, J. (2021). Solar-assisted, fast, and in situ recovery of crude oil spill by a superhydrophobic and photothermal sponge. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(18), 21175–21185.
- Ouyang, D., Lei, X., & Zheng, H. (2023). Recent advances in biomass-based materials for oil spill cleanup. *Nanomaterials*, 13(3), 620. <https://doi.org/10.3390/nano13030620>.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Reuters. (2025, 25 de marzo). *Rupture of Ecuador SOTE pipeline spilled 25,116 barrels of oil*.
- Reyes-Mera, J. J., Viáfara-Banguera, D., Paredes-Ulloa, C. O., & Guamán-Castillo, J. G. (2025). Influencia del tiempo y la técnica de extracción en la recuperación de compuestos fenólicos a partir de la cáscara de Ananas comosus. *Revista Científica Zambos*, 4(3), 80-91. <https://doi.org/10.69484/rcz/v4/n3/132>
- Rivera-Parra, J. L., Vizcarra, C., Mora, K., Mayorga, H., & Dueñas, J. C. (2020). Spatial distribution of oil spills in the north eastern Ecuadorian Amazon: A comprehensive review of possible threats. *Biological Conservation*, 252, 108820. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108820>.
- Sarango-Ordóñez, J. P., Arellano-Reinoso, K. G., Arias-Ramirez, B. J., & Ureta-Leones, D. A. (2024). Distribución geográfica y estado de conservación actual de Cedrela odorata y Cedrelinga cateniformis en la Amazonía ecuatoriana. *Journal of Economic and Social Science Research*, 4(4), 89–106. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v4/n4/134>
- Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos. (2025). *SitRep No. 01: Por contaminación ambiental, del 13/03/2025 a la fecha—Esmeraldas*. https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/2025/03/Informe-de-Situacion-No_01_Por-Contaminacion-Ambiental_Esmeraldas_17_03_2025-3.pdf
- Sun, J., Qu, J., Xie, S., Zhao, T., Liu, F., & Liu, C. (2024). Facile fabrication of green and sustainable gelatin-based aerogels for marine oil spill recovery. *Journal of Water Process Engineering*, 68, 106383. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106383>.
- Tang, S., Wei, L., Wu, Z., Weng, J., Luo, J., & Wang, X. (2025). Robust MXene aerogel assisted by cellulose nanofiber for efficient crude oil spill remediation. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 10(2), 209–223. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2025.03.005>.
- Tang, S., Wei, L., Wu, Z., Weng, J., Luo, J., & Wang, X. (2025). Robust MXene aerogel assisted by cellulose nanofiber for efficient crude oil spill remediation. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 10(2), 209–223. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2025.03.005>.

Viáfara-Banguera, D., Reyes-Mera, J. J., Paredes-Ulloa, C. O., & Caicedo-Quinche, W. O. (2025). Optimización de la extracción de polifenoles totales en hojas de *Psidium guajava*. *Revista Científica Zambos*, 4(3), 67-79.
<https://doi.org/10.69484/rcz/v4/n3/131>

Wu, W., Du, M., Shi, H., Zheng, Q., & Bai, Z. (2023). Application of graphene aerogels in oil spill recovery: A review. *Science of the Total Environment*, 856, 159107.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159107>.

CONFLICTO DE INTERESES

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