

Estrategias de remediación aplicadas en los principales derrames de petróleo costeros: un análisis teórico global

Robert Peralta Otero*

<https://orcid.org/0000-0002-9464-1575>
rperaltao@untumbes.edu.pe
Universidad Nacional de Tumbes
Tumbes, Perú

Tessy Peralta-Ortiz

<https://orcid.org/0000-0001-5907-7713>
tperaltao@untumbes.edu.pe
Universidad Nacional de Tumbes
Tumbes, Perú

Enedia Vieyra-Peña

<https://orcid.org/0000-0001-6541-7075>
evieyrap@untumbes.edu.pe
Universidad Nacional de Tumbes
Tumbes, Perú

Carola Ortiz Mogollón

<https://orcid.org/0009-0008-6329-1120>
cortizm@untumbes.edu.pe
Universidad Nacional de Tumbes
Tumbes, Perú

Auberto Hidalgo Mogollón

<https://orcid.org/0000-0003-2921-4523>
ahidalgom@untumbes.edu.pe
Universidad Nacional de Tumbes
Tumbes, Perú

*Autor de correspondencia: rperaltao@untumbes.edu.pe

Recibido (01/09/2025), Aceptado (02/12/2025)

Resumen. Los derrames petroleros costeros generan impactos ambientales complejos que requieren estrategias de remediación cada vez más especializadas. En este estudio se realizó una revisión sistemática de los diez eventos más importantes a nivel mundial, analizando las técnicas empleadas, su evolución temporal y los vacíos temáticos existentes. La búsqueda se efectuó en *Scopus* y *Web of Science*, con criterios de inclusión y exclusión definidos, para obtener un corpus documental adecuado. Los resultados muestran que la producción científica está influida por factores históricos, tecnológicos e institucionales, y que las técnicas han migrado desde enfoques físicos hacia estrategias biológicas más integradas. Sin embargo, persisten ciertas limitaciones como la escasa validación en campo de tecnologías emergentes como la *nanotechnology*, la *electroremediation* y la *artificial intelligence*. Además, se evidencia la necesidad de evaluar la recuperación funcional de los ecosistemas post-remediación. El estudio propone líneas estratégicas para futuras investigaciones en ambientes costeros afectados por hidrocarburos.

Palabras clave: derrames petroleros, zonas costeras, remediación ambiental.

Remediation Strategies Applied in Major Coastal Oil Spills: A Global Theoretical Analysis

Abstract. Coastal oil spills generate complex environmental impacts that require increasingly specialized remediation strategies. This study presents a systematic review of the ten most significant oil spill events worldwide, analyzing the remediation techniques applied, their temporal evolution, and existing thematic gaps in the scientific literature. The search was conducted in *Scopus* and *Web of Science*, applying clearly defined inclusion and exclusion criteria to obtain an adequate documentary corpus. The results indicate that scientific production is influenced by historical, technological, and institutional factors, and that remediation approaches have progressively shifted from predominantly physical methods toward more integrated biological strategies. However, several limitations persist, particularly the limited field validation of emerging technologies such as nanotechnology, electroremediation, and artificial intelligence. In addition, the need to assess the functional recovery of ecosystems after remediation processes is highlighted. The study proposes strategic directions for future research in hydrocarbon-impacted coastal environments.

Keywords: oil spills, coastal zones, environmental remediation.

I. INTRODUCCIÓN

Los derrames petroleros en ambientes costeros constituyen graves amenazas para los ecosistemas marinos y litorales, afectando la biodiversidad, la salud humana y las economías locales. Desde el primer gran derrame de petróleo registrado en 1903 en costas australianas, el número de derrames de petróleo ha ido en aumento, así entre 1967 y 2017 se han registrado al menos 2316 derrames que han liberado cada uno más de 30 000 barriles de petróleo cada uno [1]. Otros eventos importantes como el de *Deepwater Horizon*, ocurrido en Estados Unidos en 2010, y el de *Prestige* en España en 2002 han mostrado que se requieren técnicas de remediación capaces de adaptarse a condiciones oceanográficas variables y ecosistemas sensibles, entre las cuales se tienen a las físicas (barreras, *skimmers*), químicas (dispersantes, solidificadores), biológicas (bioestimulación, bioaumentación); así como las más modernas y recientes como el empleo de nanomateriales y enzimas catalíticas. La selección de la técnica depende de diversos factores como son: la clase de hidrocarburo, la salinidad, la temperatura, el tipo de sustrato costero y la urgencia de respuesta [2], [3].

Estudios recientes han demostrado que las técnicas de biorremediación, especialmente las que emplean microorganismos propios de la zona impactada por el derrame, ofrecen ventajas al ser aplicadas en áreas costeras, aunque su efectividad puede verse limitada por condiciones ambientales extremas [4], [5]. Por otro lado, tecnologías basadas en nanomateriales han mostrado alta eficiencia en la adsorción y degradación de hidrocarburos, pero existe preocupación por su posible toxicidad y su viabilidad para ser implementadas en gran escala [3], [6], [7].

Este artículo se basa en una revisión sistemática acerca de los diez derrames petroleros costeros más importantes a nivel mundial, analizando las técnicas de remediación empleadas, analizando su efectividad y limitaciones, así como analizando técnicas de remediación que aún no se han aplicado en derrames petroleros costeros para reconocer vacíos y proponer nuevas investigaciones.

El artículo se ha organizado en secciones. En la primera de ellas se hace una introducción al tema exponiendo la problemática y los objetivos; a continuación, la sección de desarrollo, en la que se aporta información teórica necesaria para comprender las técnicas de remediación. Luego, en la sección de metodología, se expone el procedimiento realizado para la búsqueda y el procesamiento de los datos. Como siguiente punto, en la sección de resultados, se presentan los principales hallazgos y las tendencias actuales respecto a las técnicas de remediación empleadas en grandes derrames de petróleo en costas, y como sección final se exponen las conclusiones de la investigación.

II. MARCO TEÓRICO

Las técnicas de remediación aplicadas en ambientes costeros tras derrames petroleros se han diversificado en función de la complejidad ecológica, el tipo de hidrocarburo vertido y la urgencia de respuesta. Estas estrategias se agrupan en cuatro categorías principales: mecánicas, químicas, biológicas y emergentes, cada una con ventajas operativas y limitaciones ambientales que deben considerarse según el ecosistema afectado [1].

Las técnicas mecánicas, como barreras flotantes, *skimmers* y sistemas de succión, se emplean principalmente en etapas iniciales para contener y recuperar el crudo superficial. Estas técnicas han demostrado ser efectivas en aguas tranquilas y accesibles, como playas arenosas, pero presentan limitaciones en zonas de alta energía o vegetación densa [2], [3]. Por otro lado, los métodos químicos basados en el uso de dispersantes y solidificadores permiten una rápida fragmentación del petróleo, facilitando su dispersión y degradación. Sin embargo, su aplicación en ecosistemas sensibles como manglares puede generar toxicidad residual y afectación prolongada [3].

Por otro lado, las técnicas biológicas se refieren principalmente a la biorremediación, mediante microorganismos nativos o introducidos [5], que constituye una alternativa ecológica en ambientes con baja energía y alta retención de contaminantes, como marismas y estuarios. En este contexto, Manasseh y Humpfrey destacan que la efectividad de estos métodos depende de factores como la temperatura, la salinidad y la disponibilidad de nutrientes, siendo especialmente útil en escenarios donde el acceso físico es limitado [4]. En paralelo, tecnologías emergentes como el uso de nanomateriales adsorbentes y enzimas catalíticas han mostrado alta eficiencia en la degradación de hidrocarburos, aunque requieren evaluación de su toxicidad y viabilidad operativa [3], [7].

Dada la diversidad de técnicas de remediación existentes, la elección de la más adecuada no solo depende del tipo de hidrocarburo, sino también del ecosistema impactado. En playas arenosas, por ejemplo, se ha documentado éxito con la combinación de métodos físicos y bioestimulación, mientras que en zonas rocosas la limpieza manual y el uso de absorbentes han sido efectivos, aunque con alto costo operativo y riesgo de recontaminación [2]. Además, en ambientes de alta sensibilidad ecológica, como manglares, se recomienda evitar el uso de dispersantes y priorizar técnicas de baja intrusión [4].

El empleo de técnicas de remediación es frecuente en derrames costeros; por ejemplo, en el caso de *Deepwater Horizon* (ocurrido en EE.UU. en 2010), se emplearon dispersantes químicos a gran escala, junto con barreras y técnicas de biorremediación en marismas del Golfo de México. Por otro lado, en *Prestige* (ocurrido en España en 2002), la respuesta incluyó limpieza manual, *skimmers* y bioestimulación en acantilados y playas gallegas [1]. Estos antecedentes muestran que la selección de medidas depende tanto de la magnitud del evento como de las características del ecosistema afectado.

Ahora bien, más allá de la eficiencia operativa, es fundamental considerar el impacto ecológico a largo plazo. En este sentido, De Lima et al. advierten que los derrames costeros han afectado gravemente a la megafauna marina, incluyendo aves, mamíferos y tortugas, cuya recuperación depende no solo de la remoción del contaminante, sino de la restauración funcional del hábitat afectado [1]. Por ello, se recomienda incorporar indicadores ecológicos en la evaluación post-remediación, como la recolonización de especies clave, la calidad del sedimento y la dinámica de nutrientes.

Teniendo en cuenta estos aspectos ecológicos, en los últimos años se han desarrollado tecnologías que prometen mejorar la respuesta a derrames en ambientes costeros. Entre ellas, el uso de nanomateriales como absorbentes inteligentes permite una alta capacidad de retención y degradación catalítica [3]. Asimismo, la incorporación de sensores remotos, drones y sistemas de *artificial intelligence* facilita el monitoreo en tiempo real y la modelación de trayectorias de dispersión [4]. En conjunto, estas herramientas permiten optimizar la selección de técnicas según las condiciones locales, reducir el tiempo de respuesta y mejorar la trazabilidad ambiental [6].

III. METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló siguiendo los lineamientos de *PRISMA 2020* para una revisión sistemática, que permiten la trazabilidad de los documentos y proporcionan rigor metodológico y replicabilidad. La estrategia de búsqueda se realizó en las dos bases de datos científicas más prestigiosas del mundo: *Web of Science*, *Scopus* y *ScienceDirect*, empleando como cadena de consulta: ("OIL SPILL" OR "PETROLEUM SPILL" OR "HYDROCARBON SPILL") AND ("COAST" OR "COASTAL") AND ("REMEDIATION" OR "BIOREMEDIATION" OR "BIODEGRADATION" OR "BIOLOGICAL TREATMENT" OR "POLLUTION CONTROL" OR "CHEMICAL TREATMENT" OR "PHYSICAL CLEANUP") AND ("[NOMBRE DEL DERRAME]"), la cual fue adaptada a la sintaxis específica de cada base de datos.

En el caso del término *[NOMBRE DEL DERRAME]*, se utilizó el nombre en inglés de cada evento de derrame petrolero analizado, de acuerdo con los eventos listados en la Tabla 1. Esta estrategia permitió focalizar la búsqueda en estudios directamente relacionados con los principales derrames petroleros costeros a nivel mundial y las técnicas de remediación aplicadas en cada caso.

En el caso de los derrames de Brasil y Guerra del Golfo, al no producir resultados en las búsquedas con tales términos en inglés: "*Brazil spill*" y "*Gulf War oil spill*", se emplearon los nombres en inglés de los países en que se desarrollaron, es decir: "*Brazil*" y "*Kuwait*". En el caso del derrame de Ixtoc I, como la búsqueda realizada en las bases de datos de *Web of Science* y *Scopus* indicó un error de sintaxis, se cambió el término por el nombre del país en que se produjo: "*Mexico*", con lo que se eliminó tal error. Los datos obtenidos en las búsquedas en ambas bases de datos fueron descargados en archivos *RIS*.

Los archivos se subieron a la aplicación en línea *Rayyan*, los documentos se filtraron considerando que traten sobre remediación en cualquiera de los 10 derrames petroleros costeros que figuran en la Tabla 1 y como criterio de exclusión, aquellos documentos que, tratando sobre esos derrames petroleros, no incluyan información sobre las técnicas de remediación empleadas.

Tabla 1. Principales derrames petroleros que afectaron zonas costeras en el mundo.

Nº	Derrame petrolero	Año	Ubicación	Línea costera afectada (km)	Referencias
1	Derrame de Brasil	2019	Nordeste de Brasil	4334	[8]
2	Derrame de la Guerra del Golfo	1991	Golfo Pérsico	770	[9]
3	Deepwater Horizon	2010	Golfo de México, EE.UU.	1000	[10]
4	Hebei Spirit	2007	Corea del Sur	1046	[11]
5	Exxon Valdez	1989	Alaska, EE.UU.	1300	[12]
6	Ixtoc I	1979	Golfo de México, México	1600	[13]
7	Prestige	2002	Costa de la Muerte, España	1000	[14]
8	Amoco Cadiz	1978	Bretaña, Francia	320–400	[15]
9	Sea Star	1972	Golfo de Omán	300	[12]
10	Torrey Canyon	1967	Islas Sorlingas, Reino Unido	193	[12]

El filtrado se hizo en dos etapas, primero evaluando título y *abstract* y finalmente sobre los documentos a texto completo. De los 97 documentos obtenidos en las consultas, se seleccionaron 52 documentos; además, en base a búsquedas en entidades internacionales y búsqueda de citas, se identificaron 10 documentos adicionales, con lo que el corpus documental final fue de 62 documentos (Figura 1).

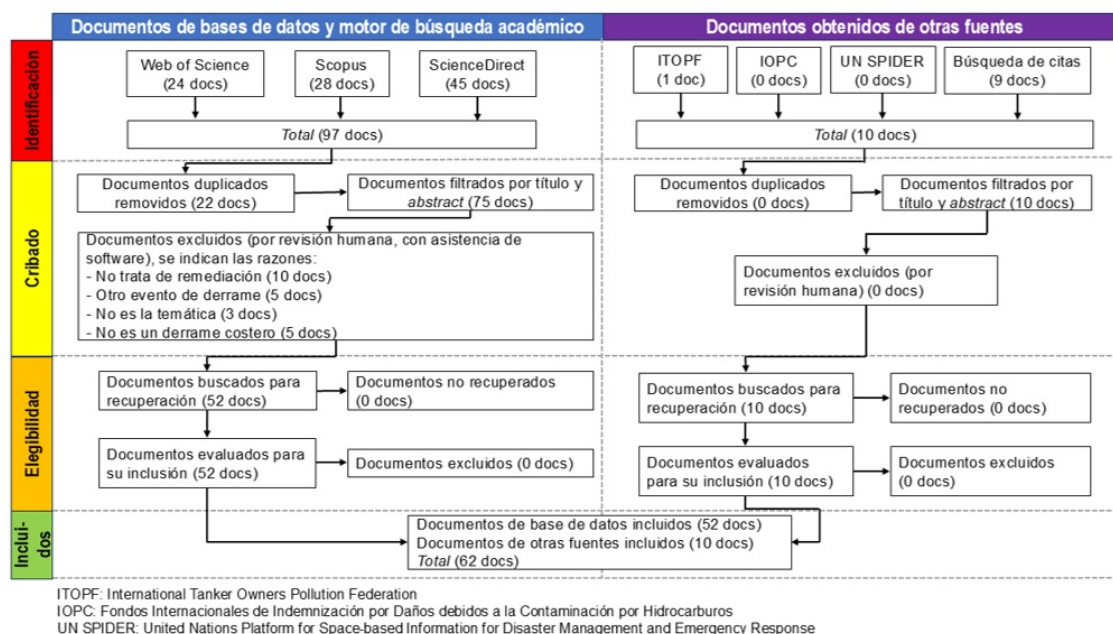


Fig. 1. Flujograma de selección de documentos para la revisión bibliográfica.

Por otra parte, se hallaron pocos vínculos bibliográficos relevantes que permitieran incrementar el corpus documental, lo que indica una reducida red de interconexiones entre los trabajos de la temática.

IV. RESULTADOS

El *corpus* documental indica tendencias relacionadas no solo con el tamaño del derrame, sino también con factores de naturaleza histórica, tecnológica y sociopolítica que influyeron en la producción científica en cada caso (Tabla 2). Eventos antiguos, como los de *Sea Star*, *Amoco Cadiz*, *Ixtoc I*, y *Exxon Valdez*, ocurridos entre 1972 y 1989, son cubiertos por un número reducido de documentos científicos; aunque su escasa representación no estaría relacionada con un menor impacto ambiental,

sino más bien a la limitada capacidad que las instituciones tuvieron para monitorear en aquellas décadas, a lo cual se suma la reducida disponibilidad de datos digitalizados y una menor conciencia ambiental. Como señalan De Lima y su equipo [1], la preocupación por los efectos ecológicos de los derrames comenzó a consolidarse recién en la década de 1990, lo que explicaría la reducida cantidad de estudios.

Tabla 2. Corpus documental según derrame petrolero costero.

Nº	Derrame	Documentos	Rango de publicación	Pico de producción
1	Derrame de Brasil	2	2023–2024	2023
2	Guerra del Golfo	1	2011–2011	2011
3	<i>Deepwater Horizon</i>	28	2010–2023	2012–2015
4	<i>Hebei Spirit</i>	2	2018–2019	2018
5	<i>Exxon Valdez</i>	5	1989–2013	2011
6	Ixtoc I	4	1992–2019	2011–2013
7	<i>Prestige</i>	12	2006–2015	2007–2009
8	Amoco Cadiz	4	1981–2019	2013–2019
9	<i>Sea Star</i>	5	1992–2025	2025
10	<i>Torrey Canyon</i>	8	1968–2025	2017

Por otro lado, el derrame de *Deepwater Horizon* concentró casi la mitad del corpus documental (45,9%). Lo cual podría responder a múltiples factores: la magnitud del evento, la disponibilidad de datos en tiempo real, el acceso institucional a zonas afectadas y el financiamiento internacional para investigación post-desastre; caso similar al del *Prestige*, el cual también mostró una cantidad alta de documentos (19,7% del corpus), con estudios concentrados entre 2006 y 2015.

Los derrames más recientes, como el de Brasil en 2019, muestran una producción aún incipiente, con solo dos artículos científicos publicados entre 2023 y 2024. Aunque este evento generó una emergencia sanitaria regional [8], su cobertura técnica ha sido limitada, posiblemente por restricciones institucionales, baja inversión en investigación aplicada y pobre articulación entre las entidades científicas y las gubernamentales. No obstante, los estudios que abordan este derrame son prometedoras, como por ejemplo al utilizar enzimas *Iaccasas* marinas para la remediación [16] y comunidades bacterianas en manglares [9] que podrían utilizarse en futuras estrategias de remediación biotecnológica. La producción científica sobre derrames costeros parece estar condicionada por la visibilidad internacional del evento, la capacidad de respuesta institucional, el acceso a datos y la evolución de las prioridades ambientales.

El análisis comparativo de los diez derrames petroleros costeros ocurridos entre 1967 y 2019, que tuvieron documentos dentro del corpus documental indica una evolución técnica en las estrategias de remediación ambiental, respecto a su complejidad así como a su operatividad (Tabla 3). En las décadas de 1970 y 1980, las técnicas físicas fueron aplicadas más frecuentemente. Estrategias como el lavado a presión, la remoción manual y el uso de barreras fueron ampliamente utilizadas debido a su disponibilidad logística y bajo requerimiento tecnológico. Sin embargo, su efectividad fue limitada en sustratos rocosos o porosos, donde se observó alta persistencia de hidrocarburos incluso tras intervenciones prolongadas [13], [15]; así también, al menos en el derrame del *Exxon Valdez*, se observó que el lavado a presión con agua caliente retardó la recuperación de las zonas costeras en las que se empleó [12]. Estas técnicas, aunque útiles para contención inicial, no permiten degradar sustancias mucho más complejas y recalcitrantes como son los hidrocarburos aromáticos policíclicos (*PAHs*) o los asfaltenos.

A partir del año 2000, se observa una transición hacia enfoques mixtos que integran procesos químicos y biológicos. De esta manera, el uso de fertilizantes oleofílicos y *biodiesel* como co-solventes y bioestimulantes permitió mejorar la biodisponibilidad de hidrocarburos y acelerar su degradación en condiciones controladas [14]. En paralelo, el compostaje y vermicompostaje demostraron alta eficiencia en la degradación de residuos pesados, alcanzando tasas superiores al 90% en laboratorio, aunque con limitaciones en su aplicación directa en campo.

Más adelante, las técnicas biológicas evolucionaron desde la bioestimulación genérica hacia el uso de consorcios microbianos especializados y enzimas purificadas. También es importante mencionar que, en eventos recientes como *Deepwater Horizon* y el derrame de Brasil, se aplicaron estrategias avanzadas como la bioturbación, el enriquecimiento con *PAHs* y la bioaumentación *in vitro*, logrando degradaciones rápidas y específicas de compuestos de alto peso molecular [10], [16]. No obstante,

muchas de estas técnicas emergentes aún carecen de validación operativa en ambientes naturales, lo que limita su escalabilidad.

Tabla 3. Técnicas de remediación en los principales derrames petroleros costeros en el mundo.

Nº	Derrame (año, país)	Técnicas de remediación	Efectividad	Limitaciones	Ref.
1	<i>Torrey Canyon</i> (1967, Reino Unido)	Físicas: remoción manual, <i>skimmers</i> , barreras, bombeo; químicas: dispersantes; naturales: atenuación; otras: quema y bombardeo	Dispersantes y quema redujeron gran parte del crudo	Alta toxicidad de dispersantes	[12]
2	<i>Sea Star</i> (1972, Omán)	No reportadas; probable atenuación natural	No reportada	No reportadas	[12]
3	Amoco Cadiz (1978, Francia)	Físicas: lavado con agua caliente a presión	Degradación evidente en 1 año	Persistencia en zonas rocosas	[15]
4	Ixtoc I (1979, México)	Físicas: remoción manual, barreras; químicas: dispersantes; naturales: atenuación; otras: quema	Alta degradación costera; baja en mar abierto	Baja eficiencia en zonas profundas	[13]
5	<i>Exxon Valdez</i> (1989, EE.UU.)	Físicas: remoción, lavado caliente, barreras; químicas: dispersantes; biológicas: biorremediación; otras: quema	Quema preliminar 98%; lavado efectivo	Daño costero; emulsificación del crudo	[12]
6	Guerra del Golfo (1991, Kuwait)	Físicas: remoción, barreras; químicas: dispersantes; biológicas: bioestimulación; otras: quema	Degradación parcial en marismas	Toxicidad residual; heterogeneidad	[9]
7	<i>Prestige</i> (2002, España)	Físicas: limpieza manual y mecánica; químicas: fertilizantes; biológicas: compostaje	Hasta 95% de degradación de asfaltenos	Baja penetración en rocas	[14]
8	<i>Hebei Spirit</i> (2007, Corea del Sur)	Físicas: barreras; químicas: dispersantes; biológicas: bioestimulación con <i>PAHs</i>	Degradación parcial de <i>PAHs</i>	Persistencia en capas profundas	[11]
9	<i>Deepwater Horizon</i> (2010, EE.UU.)	Físicas: barreras; químicas: <i>Corexit 9500/9527</i> ; biológicas: consorcios microbianos; otras: quema	Alta biodegradación en agua y sedimentos	Variabilidad espacial	[10]
10	Derrame de Brasil (2019, Brasil)	Físicas: recolección manual; químicas: laccasas; biológicas: cepas cultivadas; naturales: bioaumentación <i>in vitro</i>	>50% de <i>PAHs</i> en 48 h	No validado en campo	[16]

Por otro lado, el uso de dispersantes químicos mostró resultados mixtos. Aunque mejoran la dispersión superficial del crudo, su eficacia depende de múltiples factores físico-químicos y su toxicidad residual sigue siendo objeto de debate técnico [11]. En algunos casos, como en el derrame de *Deepwater Horizon*, se combinaron con bioestimulación para compensar sus limitaciones, pero su aplicación sigue siendo controversial.

Las técnicas naturales, como la atenuación espontánea y la bioturbación, han ganado relevancia como mecanismos complementarios. Aunque no constituyen intervenciones directas, su contribución a la recuperación funcional del ecosistema es significativa, especialmente en ambientes con alta actividad microbiana y buena oxigenación.

La revisión realizada permite observar que existe una evolución desde estrategias reactivas y mecanizadas hacia otras adaptativas, integradas y basadas en procesos biológicos. Esta transición técnica no solo tiende a mejorar la eficiencia de remediación, sino también responde a la mayor comprensión de la compleja dinámica ecológica costera y la persistencia de fracciones de hidrocarburos recalcitrantes. La selección de técnicas debe considerar el tipo de crudo, la matriz ambiental, la escala del evento y las condiciones operativas, priorizando aquellas con validación científica y capacidad de integración funcional.

Sin embargo, existen vacíos importantes, respecto a técnicas aún no empleadas en este tipo de derrames petroleros. La mayoría de estudios se centran en la degradación química y biológica, pero no se llevan a cabo evaluaciones integrales que muestren el nivel de recuperación del ecosistema. Además, existen novedosas técnicas como la *electroremediation*, el uso de *nanomaterials* funcionalizados y la aplicación de *artificial intelligence* para optimizar la respuesta al evento, que aún no han sido

exploradas en profundidad en estos derrames y tampoco en ambientes costeros. Por ejemplo, Porcino y sus colaboradores [17], proponen el uso de electrocinética para movilizar hidrocarburos en sedimentos marinos compactos, técnica que podría ser útil en zonas submareales anóxicas donde la biodegradación es limitada, tal como por ejemplo en sedimentos de manglares.

En cuanto a nanotecnología, Bi y su equipo [3], evaluaron el potencial de nanopartículas y nanocompuestos como óxidos metálicos, zeolitas modificadas y materiales magnéticos para mejorar la adsorción, emulsificación y degradación de hidrocarburos en ambientes costeros. Estas nanopartículas pueden formar emulsiones estables tipo *Pickering* y facilitar la recuperación de petróleo mediante mecanismos físico-químicos avanzados como los magnéticos [7], térmicos, alteración del *pH*, fuerza iónica y membranas. No obstante, en el mismo estudio se reconoce que el uso de materiales a escala nanométrica muestra aún desafíos ambientales, pues son persistentes en el medio, pueden ser tóxicos para los organismos marinos y carecen de protocolos estandarizados para su empleo seguro.

Esta preocupación por los nanomateriales también la manifiesta Vasconcelos y su equipo [6], quienes señalan que los modelos actuales de simulación de derrames aún no incorporan adecuadamente el comportamiento dinámico de nanopartículas en ambientes costeros, lo que limita la capacidad predictiva y de evaluación de riesgos. Ambos estudios coinciden en que se requiere más investigaciones que evalúen cómo interaccionan los nanomateriales con las matrices biológicas y cuál es el destino final de tales nanomateriales luego de la remediación.

Por otro lado, respecto a una de las tecnologías emergentes más recientes como es la inteligencia artificial (IA), Kõivupuu y sus colaboradores. [18], demostraron que modelos de *artificial intelligence* pueden ayudar a mejorar la toma de decisiones en tiempo real durante la respuesta a derrames, lo que potencialmente podría acelerar la recuperación del ecosistema impactado.

Finalmente, Bin Yusup [19] propone el empleo de una metodología multitrófica para evaluar el potencial de recuperación de los ecosistemas costeros post-remediación, incluyendo vegetación, fauna bentónica y ciclos biogeoquímicos, aspecto que lamentablemente aún está ausente en los estudios evaluados en este corpus documental y que, sin embargo, resultaría útil en entornos complejos como los costeros para evaluar su recuperación funcional.

La investigación realizada permitió mostrar que las técnicas de remediación en este tipo de eventos están migrando hacia aquellas que representan estrategias más adaptativas, integradas y específicas. De manera que se requiere evaluar el estado de restauración de la funcionalidad ecosistémica frente a las intervenciones realizadas, así como validar las técnicas emergentes e incorporar herramientas predictivas que permitan mejorar la trazabilidad y eficiencia de las intervenciones en ambientes costeros afectados por hidrocarburos.

CONCLUSIONES

La revisión sistemática permitió identificar una clara evolución en las técnicas de remediación aplicadas a derrames petroleros costeros, que pasaron de estrategias físicas y reactivas hacia técnicas biológicas más integradas y adaptativas. Este cambio muestra no solo avances tecnológicos, sino también una mayor comprensión y respeto al funcionamiento del ecosistema, así como a la necesidad de proporcionar estrategias de mitigación sostenibles en ambientes altamente sensibles.

Sin embargo, la producción científica continúa concentrándose en unos pocos eventos recientes y visibles, mientras que otros de gran impacto están subrepresentados, lo que evidencia la influencia de factores institucionales, financieros y de acceso a datos en la generación de nuevo conocimiento. Aunque se han logrado avances en bioestimulación, compostaje y bioturbación, persisten vacíos críticos en la validación operativa de técnicas emergentes como la *electroremediation*, el uso de *nanomaterials* funcionalizados y la *artificial intelligence*. Además, la mayoría de estudios se centran en la degradación química sin evaluar de manera integral el proceso mediante el cual se alcanza la recuperación del ecosistema.

Se requiere avanzar hacia estrategias que integren innovación tecnológica con evaluación ecológica multitrófica. La incorporación de metodologías que consideren vegetación, fauna bentónica y ciclos biogeoquímicos, junto con modelos predictivos basados en *artificial intelligence* y protocolos estandarizados para *nanomaterials*, fortalecería la trazabilidad y eficiencia de las intervenciones. Por último, en futuras

investigaciones se debe priorizar la integración de tecnologías emergentes con indicadores ecológicos de recuperación, el desarrollo de modelos predictivos y de respuesta rápida basados en *artificial intelligence* y la implementación de metodologías que permitan evaluar la resiliencia ecológica post-remediación en los ambientes costeros afectados por hidrocarburos.

RECONOCIMIENTO

Esta investigación fue financiada por la Universidad Nacional de Tumbes, en el marco del proyecto “Producción de un biorremediador en base a bacterias nativas degradadoras de hidrocarburos presentes en el mar y manglar de Tumbes”, aprobado mediante la Resolución N° 0904–2028/UNTUMBES–CU. El presente estudio formó parte de las actividades desarrolladas en dicho proyecto.

REFERENCIAS

- [1] F. J. De Lima Silva *et al.*, “Overview of oil spills worldwide and impacts on marine megafauna,” *BJCR*, vol. 4, no. 1, pp. 78–94, jan 2024, doi: 10.52600/2763-583X.bjcr.2024.4.1.78-94.
- [2] A. Gomez and B. Santhakumar, “Oil spill remediation techniques and their effectiveness in coastal waters,” *IJARES*, vol. 5, no. 1, pp. 71–86, may 2025, doi: 10.70102/IJARES/V5I1/5-1-09.
- [3] H. Bi, C. N. Mulligan, K. Lee, B. Zhang, Z. Chen, and C. An, “Nanotechnology for oil spill response and cleanup in coastal regions,” *Environ. Sci.: Nano*, no. 12, pp. 41–47, jan 2025, doi: 10.1039/D4EN00954A.
- [4] M. Manasseh Ilumunter and S. Humphrey Sam, “Bioremediation of oil spill: concept, methods and applications,” *Discov. Chem.*, vol. 1, no. 42, pp. 1–18, nov 2024, doi: 10.1007/s44371-024-00038-2.
- [5] R. A. Vizuete García, D. M. Bonilla Jurado, and C. G. Albán Yáñez, “Método de contingencia a través del sistema de marco lógico,” *UCT*, vol. 1, no. 1, pp. 96–106, abr 2019, disponible en: <https://uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/download/54/55>.
- [6] R. N. Vasconcelos *et al.*, “Trends in oil spill modeling: a review of the literature,” *Water*, vol. 17, no. 15, pp. 1–38, aug 2025, doi: 10.3390/w17152300.
- [7] M. O. Méndez Mantuano, K. X. Boderó Jiménez, S. F. Alvarado Fiallo, Á. R. Huayamave Rosado, and D. V. Apolo Robles, “Biosynthesis of iron nanoparticles (Fe_3O_4) in the remediation of polluted waters,” *UCT*, vol. 24, no. 96, pp. 35–45, ene 2020, disponible en: <https://uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/view/262>.
- [8] P. G. Lopes Pena, A. L. Northcross, M. A. Gomes De Lima, and R. D. C. Franco Rêgo, “Derramamento de óleo bruto na costa brasileira em 2019: emergência em saúde pública em questão,” *Cad. Saúde Pública*, vol. 36, no. 2, p. e00231019, mar 2020, doi: 10.1590/0102-311x00231019.
- [9] R. Peixoto *et al.*, “Bacterial communities reflect the spatial variation in pollutant levels in Brazilian mangrove sediment,” *Antonie van Leeuwenhoek*, vol. 99, no. 2, pp. 341–354, feb 2011, doi: 10.1007/s10482-010-9499-0.
- [10] G. M. King, J. E. Kostka, T. C. Hazen, and P. A. Sobecky, “Microbial responses to the Deepwater Horizon oil spill: from coastal wetlands to the deep sea,” *Annu. Rev. Mar. Sci.*, vol. 7, no. 1, pp. 377–401, ene 2015, doi: 10.1146/annurev-marine-010814-015543.

- [11] C. Lee *et al.*, "Comparative evaluation of bioremediation techniques on oil contaminated sediments in long-term recovery of benthic community health," *Environ. Pollut.*, vol. 252, pp. 137-145, sep 2019, doi: 10.1016/j.envpol.2019.05.100.
- [12] NOAA, *Oill spill case histories. 1967-1991. Summaries of significant U.S. and international spills*, 1st ed. Seattle: NOAA, 1992, disponible en: https://web.archive.org/web/20111121222456/http://response.restoration.noaa.gov/book_shelf/26_spilld
- [13] H. F. Santos, F. L. Carmo, J. E. S. Paes, A. S. Rosado, and R. S. Peixoto, "Bioremediation of mangroves impacted by petroleum," *Water Air Soil Pollut*, vol. 216, no. 1-4, pp. 329-350, mar 2011, doi: 10.1007/s11270-010-0536-4.
- [14] N. Jiménez, M. Viñas, J. M. Bayona, J. Albaiges, and A. M. Solanas, "The Prestige oil spill: bacterial community dynamics during a field biostimulation assay," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 77, no. 4, pp. 935-945, dec 2007, doi: 10.1007/s00253-007-1229-9.
- [15] R. M. Atlas, P. D. Boehm, and J. A. Calder, "Chemical and biological weathering of oil, from the Amoco Cadiz spillage, within the littoral zone," *Est. Coast. Shelf Sci.*, vol. 12, no. 5, pp. 589-608, may 1981, doi: 10.1016/S0302-3524(81)80085-0.
- [16] A. Barbosa Da Rocha *et al.*, "Shrimp laccase degrades polycyclic aromatic hydrocarbons from an oil spill disaster in Brazil: A tool for marine environmental bioremediation," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 194, p. 115445, sep 2023, doi: 10.1016/j.marpolbul.2023.115445.
- [17] N. Porcino, F. Crisafi, M. Catalfamo, R. Denaro, and F. Smedile, "Electrokinetic remediation in marine sediment: A review and a bibliometric analysis," *Sustainability*, vol. 16, no. 11, p. 4616, may 2024, doi: 10.3390/su16114616.
- [18] A. Kõivupuu *et al.*, "Towards resilient marine ecosystems: EcoSensitivity as an operational model for strategic oil spill management," *JMSE*, vol. 13, no. 1, p. 2, dec 2024, doi: 10.3390/jmse13010002.
- [19] M. F. Bin Yusup, "Mitigating the impact of oil spills in the sea with responsive strategies and ecosystem recovery," *Journal of Maritime Technology and Society*, pp. 22-27, jun 2024, doi: 10.62012/mp.v3i2.35387.

AUTORES



Mg. Robert Peralta Otero es Ingeniero Pesquero y doctorante en Ciencias Ambientales. Se desempeña como Docente Auxiliar en el Departamento Académico de Pesquería de la Facultad de Ingeniería Pesquera y Ciencias del Mar de la Universidad Nacional de Tumbes. Sus líneas de investigación se centran en la acuicultura, los recursos pesqueros y la biorremediación.



Dra. Tessy Peralta Ortiz es Ingeniera Pesquera, magíster en Acuicultura y Gestión Ambiental, y doctora en Educación. Se desempeña como Docente Principal en el Departamento de Acuicultura de la Facultad de Ingeniería Pesquera y Ciencias del Mar de la Universidad Nacional de Tumbes. Sus líneas de investigación se centran en la acuicultura, la biodiversidad y la patología acuática, con énfasis en el uso de herramientas de biología molecular.



Dra. Enedia Vieyra Peña es Ingeniera Pesquera y doctora en Ciencias de los Alimentos. Se desempeña como investigadora en la Facultad de Ingeniería Pesquera y Ciencias del Mar de la Universidad Nacional de Tumbes. Es líder del Grupo de Investigación en Tecnología de Alimentos y Desarrollo de Productos basados en Recursos Hidrobiológicos, orientando su trabajo al aprovechamiento sostenible y la innovación tecnológica en el sector pesquero.



Mg. Carola Ortiz Mogollón es Ingeniera Pesquera y magíster en Administración. Se desempeña como Docente Auxiliar en el Departamento Académico de Acuicultura de la Facultad de Ingeniería Pesquera y Ciencias del Mar de la Universidad Nacional de Tumbes. Sus líneas de investigación se centran en la acuicultura, los recursos pesqueros y la biorremediación.



Dr. Auberto Hidalgo Mogollón es docente principal del Departamento de Acuicultura de la Facultad de Ingeniería Pesquera y Ciencias del Mar de la Universidad Nacional de Tumbes. Es magíster en Nutrición Animal y doctor en Ciencias Ambientales. Sus líneas de investigación se centran en la acuicultura, la biodiversidad y la biorremediación, con énfasis en la aplicación de herramientas de biología molecular.