

## Revisión bibliográfica sobre técnicas de biorremediación para el tratamiento del residuo por derrame de asfalto

**Grettell Ramos Barceló**

E-MAIL:

Facultad de Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría

**Yuletsis Díaz Rodríguez**

E-MAIL: yuletdíaz78@gmail.com

Centro de Investigación del Petróleo (CEINPET)

### RESUMEN

En el tratamiento de residuos por derrame de asfalto resulta prioritario implementar técnicas sostenibles para reducir su impacto ambiental. Estos residuos, derivados de la producción y mantenimiento de pavimentos, liberan compuestos tóxicos como metales pesados e hidrocarburos que contaminan suelos y aguas, especialmente durante fenómenos climáticos extremos. Métodos como el reciclaje en caliente, frío y la reutilización directa han demostrado eficacia en Cuba, disminuyendo costos y emisiones asociadas a la extracción de nuevos materiales. No obstante, la biorremediación emerge como alternativa para tratar estos residuos dado que con ella se alcanzan tasas de biodegradación superiores al 50% en suelos contaminados con hidrocarburos y derivados. Estas estrategias se alinean con políticas ambientales cubanas que promueven la economía circular y la minimización de residuos peligrosos.

**KEYWORDS:** Biorremediación; residuos de asfalto; tratamiento; contaminación

Literature review on bioremediation techniques for the treatment of asphalt spill waste

### ABSTRACT

When treating asphalt spill waste, implementing sustainable techniques is a priority to reduce its environmental impact. This waste, derived from pavement production and maintenance, releases toxic compounds such as heavy metals and hydrocarbons that contaminate soil and water, especially during extreme weather events. Methods such as hot and cold recycling and direct reuse have proven effective in Cuba, reducing costs and emissions associated with the extraction of new materials. However, bioremediation is emerging as an alternative for treating this waste, as it achieves biodegradation rates of over 50% in soils contaminated with hydrocarbons and derivatives. These strategies are aligned with Cuban environmental policies that promote the circular economy and the minimization of hazardous waste.

**PALABRAS CLAVES:**

Bioremediation; asphalt waste; treatment; contamination

## 01 INTRODUCCION

El asfalto, un material bituminoso de color negro proveniente de yacimientos naturales o como residuo de la refinación de crudos pétreos, es ampliamente utilizado en la construcción de pavimentos y otras aplicaciones de ingeniería civil. Sin embargo, su producción y manejo inadecuado puede generar residuos que provocan importantes desafíos ambientales. De ahí la necesidad de nuevas alternativas de manejo de los residuos, dada la creciente preocupación por el impacto ambiental tanto de la industria petrolera como de la construcción (Díaz Carrillo 2021).

Los residuos de asfalto presentan propiedades que los convierten en grandes agentes contaminantes, debido a su potencial para liberar sustancias nocivas al entorno que pueden afectar la calidad del suelo y las fuentes de agua subterránea (Rahmad et al. 2022). Los métodos de gestión más empleados en la actualidad son el reciclaje y la reutilización por su capacidad de reducir significativamente los costos de construcción y disminuir la necesidad de extraer nuevos recursos.

Tradicionalmente, se han desarrollado métodos de tratamiento para la contaminación gaseosa producida por las plantas de asfalto (Díaz Carrillo 2021). Sin embargo, la atención a la contaminación del suelo por residuos de asfalto ha sido menos frecuente. En tal situación, surge la necesidad de investigar y desarrollar nuevas alternativas de tratamiento específicamente diseñadas para abordar la contaminación del suelo por residuos de asfalto.

La biorremediación se presenta como una opción prometedora, ofreciendo una solución eficaz y respetuosa con el medio ambiente, para mitigar los impactos negativos de la contaminación por petróleo y sus derivados. Esta técnica utiliza microorganismos o sus enzimas para degradar y/o transformar contaminantes en sustancias menos tóxicas o no tóxicas, contribuyendo a la recuperación de ecosistemas dañados sin generar subproductos nocivos (Martínez Prado et al. 2011). Los métodos de biorremediación con potencialidades aplicables a residuos de asfalto incluyen la bioestimulación, que implica la adición de nutrientes para estimular la actividad de microorganismos nativos, y la bioaumentación que consiste en la introducción de microorganismos específicamente seleccionados para degradar los contaminantes presentes.

El objetivo de esta revisión es evaluar la potencialidad de técnicas de biorremediación, como bioestimulación y bioaumentación, para el tratamiento de residuos por derrame de asfalto y fomentar la efectividad del proceso. En tal caso se favorece la capacidad para degradar contaminantes y su sostenibilidad ambiental, cuando no es posible aplicar métodos tradicionales como el reciclaje en frío o caliente.

## 02 MATERIALES Y MÉTODOS

En el desarrollo de la revisión bibliográfica se seleccionaron diversos temas para su análisis, abarcando desde aspectos generales, como el concepto de asfalto y el impacto ambiental asociado a su producción, hasta cuestiones más específicas, como el manejo de residuos petrolizados y la aplicación de la biorremediación en el tratamiento de hidrocarburos. En la búsqueda de información se emplearon palabras clave relacionadas con el objeto de estudio, tales como biorremediación, residuos de asfalto, tratamiento y contaminación. Para garantizar la confiabilidad y actualidad de los datos, se consideraron fuentes como artículos de revistas académicas, tesis, proyectos y libros publicados en los últimos diez años.

## 03 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### GENERALIDADES DEL ASFALTO

El asfalto es un material bituminoso de color negro que proviene de yacimientos naturales o como residuo de la refinación de determinados crudos pétreos (Díaz Carrillo 2021). Dicho material está constituido básicamente de cuatro fracciones genéricas, que representan grupos de hidrocarburos con propiedades químicas similares: saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos, conocidos como fraccionamiento SARA por sus iniciales. Este grupo de compuestos se subdividen según su polaridad en asfaltenos y maltenos. Los primeros presentan características polares y son la fracción más pesada que posee el asfalto. El segundo grupo (saturados, aromáticos y resinas) son compuestos orgánicos de baja polaridad (Victoria Palma et al. 2016).

En cuanto a las características físicas, el asfalto desarrolla propiedades ligantes y la consistencia disminuye al ser calentado. Los saturados son los compuestos más ligeros y afectan negativamente el grado de variación de la viscosidad en función de la temperatura, también conocido como susceptibilidad térmica. La fracción aromática mejora las propiedades físicas del material, las resinas mejoran su ductilidad y los asfaltenos contribuyen al aumento de la viscosidad, lo cual disminuye la susceptibilidad térmica. Dada la dificultad para distinguir claramente la fase continua y dispersa, el asfalto es considerado un sistema coloidal complejo de hidrocarburos (Victoria Palma et al. 2016).

La principal aplicación de los asfaltos es en la preparación de pavimentos, esta mezcla sirve para impermeabilizar la estructura, pues lo hace poco sensible al vapor ambiental y eficaz contra la penetración del agua proveniente de la precipitación. Así mismo es resistente a la acción mecánica de disgregación producida por las cargas de los vehículos, por mencionar algunos de sus beneficios (Victoria Palma et al. 2016). El asfalto por sus cualidades aglutinantes y sus propiedades físicas y químicas, es apto para numerosas aplicaciones, por ejemplo: cubiertas para techos, protección de cañerías, entre otras. En particular el que se emplea en pavimentos es llamado “cemento asfáltico” (Díaz Carrillo 2021).

### IMPACTO AMBIENTAL EN LA PRODUCCIÓN DE ASFALTO

La producción de hormigón asfáltico y asfalto es de gran importancia a nivel mundial, lo cual está destinado obras de ingeniería, construcción, mejoramiento y mantenimiento de vías. Actualmente las plantas de procesamiento asociadas se encuentran distribuidas ampliamente por todo el planeta y constituyen una de las principales fuentes de crecimiento económico local y regional; por lo tanto, de bienestar para la sociedad en función de la eficiencia de la producción de estos materiales y su costo. Sin embargo, los efectos ambientales provocados por la producción de estos, el manejo inadecuado de desechos y la ausencia de un plan de gestión amigable con el ambiente pueden generar rechazo, dado que existen precedentes de efectos ambientales muy negativos afectando a la integridad de poblaciones cercanas a estos lugares. En el contexto ambiental, son consideradas potencialmente contaminantes, al provocar alteraciones negativas al medio socioambiental. Las plantas de asfalto caliente tienen un gran poder de contaminación atmosférica fundamentalmente y se perciben como un lugar antiestético que emite oscuros gases malolientes (Díaz Carrillo 2021).

## CONTAMINACIÓN DE LOS SUELOS POR DERRAME DE ASFALTO

El asfalto es potencialmente perjudicial para el medio ambiente debido a su origen, el cual resulta de la destilación de la fracción más pesada del petróleo crudo, constituyendo un residuo semisólido o sólido. Este material está compuesto por una mezcla de hidrocarburos aromáticos, junto con metales como calcio (Ca), cromo (Cr), cadmio (Cd), cobre (Cu), hierro (Fe), plomo (Pb), sodio (Na), níquel (Ni) y vanadio (V). Además, contiene compuestos volátiles como benceno, acridina, carbazol, fenantreno, naftaleno, piridina y fenol. El impacto ambiental de estos compuestos es especialmente notable durante fenómenos climáticos como meteorización, inundaciones y lluvias intensas, que incrementan la liberación de estas sustancias al entorno (Rahmad et al. 2022).

Según estudios realizados por Rahmad y otros (Rahmad et al. 2022), acerca del impacto por contaminación al agua subterránea y el suelo de un ligante de asfalto modificado con polímero junto con un aditivo químico, el pavimento asfáltico representa un factor relevante en la contaminación del suelo, al estar directamente en contacto con este. En tal caso se facilita la transferencia de metales pesados y otras sustancias contaminantes puesto que, en el hormigón asfáltico expuesto a procesos de meteorización se han identificado trazas significativas de metales como bario (Ba), manganeso (Mn), plomo (Pb), níquel (Ni), estroncio (Sr), vanadio (V) y zinc (Zn). Estos contaminantes se depositan en la superficie del suelo y penetran hacia horizontes más profundos, lo que genera una disminución significativa en la cobertura vegetal proyectada, con reducciones del 30 al 40 %. La acumulación de metales pesados afecta negativamente la actividad biológica y enzimática del suelo, lo que conduce a su degradación general. Sin embargo, el factor más crítico para las plantas y otros organismos vivos es el grado de accesibilidad de estos metales, determinado por su movilidad en el medio. Dichos compuestos representan uno de los contaminantes más peligrosos en el suelo debido a su alta toxicidad y su característica de no ser biodegradables. Además, forman parte de la circulación biológica, se transfieren a lo largo de las cadenas alimenticias y generan una serie de consecuencias negativas. En casos de contaminación química extrema, se observa una disminución en la capacidad de autodepuración biológica de los suelos, pérdida de productividad y, en última instancia, la destrucción completa del ecosistema (Gumarova et al. 2022).

## MANEJO DE RESIDUOS DE ASFALTO

Los residuos de asfalto, también conocidos como fresados o desechos asfálticos, requieren un manejo adecuado para minimizar su impacto ambiental y promover su reutilización (Asim et al. 2020). Existen diversos tratamientos y opciones para gestionar estos materiales.

El reciclaje en caliente es un proceso que consiste en calentar asfalto recuperado a temperaturas que varían entre 120 °C y 160 °C. Este calentamiento se lleva a cabo en plantas de producción o directamente en el lugar de trabajo mediante equipos especializados, como paneles de calefacción infrarrojos (CEDEX 2015). Posteriormente, el material calentado se combina con agregados nuevos y un ligante asfáltico, lo que da origen a una mezcla reutilizable denominada pavimento asfáltico reciclado (RAP) (Mendoza, Adame & Marcos 2020). Esta técnica destaca por su eficacia en proyectos de gran escala, ya que permite reintegrar grandes volúmenes de fresado directamente en nuevas capas de pavimento, optimizando recursos y reduciendo el desperdicio.

Por otro lado, el reciclaje en frío ofrece una alternativa que no requiere elevadas temperaturas. En este proceso, el asfalto existente se Tritura y se mezcla con aditivos como emulsiones asfálticas o cemento, todo realizado a temperatura ambiente. Al evitar el calentamiento, se reduce

significativamente el consumo de energía y las emisiones de carbono asociadas. La mezcla resultante puede aplicarse de inmediato sobre la superficie a rehabilitar, lo que facilita una rápida apertura al tráfico. Esta característica lo hace ideal para reparaciones urgentes, como el sellado de baches o el mantenimiento rutinario de vías (Almusawi et al. 2024).

La reutilización directa es otro método que simplifica el proceso de reciclaje al eliminar tratamientos adicionales. Consiste en recolectar y triturar residuos, como asfalto recuperado (RAP) o escombros de construcción, para emplearlos directamente como material base o relleno en la construcción de caminos. Esta práctica no solo reduce costos operativos, sino que también garantiza la estabilidad de las estructuras, siempre que los materiales cumplan con especificaciones técnicas rigurosas (Miranda Argüello & Aguiar Moya 2019).

Finalmente, el tratamiento químico introduce aditivos especializados, como rejuvenecedores, polímeros o estabilizadores, para modificar la estructura molecular del asfalto envejecido. Estos compuestos revierten efectos como el aumento de rigidez y la pérdida de ductilidad causados por la oxidación. Un ejemplo innovador es el uso de orujo de uva como antioxidante, el cual ha demostrado eficacia en la reducción del daño oxidativo, mejorando propiedades mecánicas clave como la flexibilidad y la resistencia (Rojas Rojas et al. 2021; González Castro, Mulato & Tellez 2015).

Reciclar el pavimento asfáltico (RAP de sus siglas en inglés) no es algo novedoso, mundialmente la reducción de los recursos de un pavimento flexible se hace mediante el RAP. Esto se define como el material recién fresado de un pavimento flexible durante la rehabilitación y construcción de este. Por ejemplo, en Hong-Kong se importa asfalto del extranjero y cada año se fresan cerca de 200 000 toneladas de mezcla asfáltica de las carreteras, que pueden aprovecharse en la construcción o rehabilitación de las mismas. Existe la necesidad de reutilizar el RAP debido a que se generan altos contenidos de recursos por reconstrucción o rehabilitación de carreteras, donde una de las posibles maneras de ampliar el uso del RAP sería incorporar el agregado en el cemento portland (Guzmán Ortiz et al. 2021).

En un estudio realizado por Robles y colaboradores (2024), para el mejoramiento mecánico de la carretera Lambayeque, carretera Illimo a Jayanca, se analizaron diferentes proporciones de pavimento reciclado en la mezcla asfáltica, evaluando su impacto en las propiedades mecánicas del pavimento resultante para el diseño de mezclas asfálticas utilizando pavimento reciclado. Los resultados mostraron que la incorporación de pavimento reciclado en las mezclas asfálticas no solo es viable, sino que también mejora ciertas características mecánicas del pavimento, como la resistencia a la fatiga y la capacidad de carga (Robles Godier & Cerna Llanos 2024).

No obstante, se comenta poco sobre los factores claves que afectan la calidad de las mezclas asfálticas. En el caso del tipo de asfalto en caliente uno de los factores clave es la contaminación del material por impurezas en los agregados o asfalto ya que pueden reducir la adherencia y durabilidad. Los agregados que garantizan la resistencia y duración de la mezcla son grava, piedra triturada, arena, aditivos modificadores de polímeros, emulsiones asfálticas y fibras. Con el uso de otros materiales se tiene el riesgo de provocar que el pavimento sea menos duradero, se afecte con cargas pesadas y condiciones climáticas adversas (Joke, Wim & Johan 2016). Por tal motivo no es posible recuperar todo el asfalto que se derrama pues se contamina con materiales no deseados. En tal situación es necesario recurrir a otros métodos de gestión compatibles con este tipo de residuos como pudiera ser el caso de tratamientos biológicos.

## TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS DE RESIDUOS PETROLIZADOS. BIORREMEDIACIÓN

La biorremediación es una solución eficaz y respetuosa con el medio ambiente que permite mitigar los impactos negativos de la contaminación por petróleo. Su aplicación contribuye a la recuperación de ecosistemas dañados, es menos costosa que otros métodos tradicionales y evita la generación de subproductos peligrosos. Además, se alinea con las estrategias globales para reducir los riesgos asociados al manejo de desechos tóxicos (Koshlaf & Ball 2017).

Dicha técnica basada en la capacidad que tienen los microorganismos de crecer a partir de la utilización de sustancias recalcitrantes al medio ambiente. Su aplicación para tratamiento de contaminantes orgánicos, está dirigida a una adecuada estimulación de los microorganismos para crecer y utilizarlos como fuente de alimento y energía, en un entorno favorable de humedad, temperatura y pH (Tapia Espinosa 2016). En este proceso, las enzimas microbianas están involucradas directamente en la transformación o degradación de los mismos hasta dióxido de carbono, sales, agua y otros productos inocuos al medio ambiente. La eficiencia depende de varios factores como la magnitud, toxicidad y degradabilidad de los contaminantes, así como la capacidad con la que se cuenta para monitorear el proceso. La biorremediación, puede llevarse a cabo en el lugar impactado, proceso conocido como *in situ*, o cuando la matriz contaminada se transfiere a otro lugar especialmente preparado para tales fines, lo cual se denomina *ex situ* (Cota Ruiz et al. 2019). Además, esta práctica de descontaminación es efectiva, de bajo costo, permite tratar grandes volúmenes de contaminantes y a diferencia de otros procedimientos de descontaminación, presenta un impacto ambiental mínimo (Núñez et al. 2010).

Las metodologías de biorremediación se clasifican según sus operaciones unitarias, ventajas, desventajas y el tipo de residuos que degradan con mayor eficacia. Una de ellas es el landfarming, técnica que busca la oxidación biológica de hidrocarburos presentes en el suelo mediante la estimulación de su microflora natural, como bacterias, hongos o levaduras. Para ello, se aplican fertilizantes, se realizan labores de arado y se implementa riego superficial. Este enfoque, definido como una bioestimulación dirigida, permite que los microorganismos utilicen los hidrocarburos como fuente de energía, acelerando así su degradación (Díaz Segredo 2022).

Otra metodología destacada es la fitorremediación, que emplea plantas y su microbiota asociada para eliminar, retener o reducir contaminantes ambientales. Este proceso opera a través de múltiples mecanismos, los cuales involucran distintas estructuras de las plantas, como raíces, hojas o tallos, aprovechando su capacidad natural para interactuar con sustancias tóxicas y transformarlas en compuestos menos dañinos (Hernández Valencia, Navas & Infante 2017).

El compostaje, por su parte, es un proceso biológico controlado que degrada contaminantes orgánicos mediante microorganismos en condiciones aeróbicas y temperaturas termófilas (entre 40 y 50 °C). Para ello, el suelo contaminado se excava y se mezcla con materiales ricos en materia orgánica, como restos vegetales, que mejoran su porosidad. La descomposición de estos compuestos añadidos genera calor, manteniendo las condiciones termófilas necesarias para optimizar la actividad microbiana (Díaz Segredo 2022).

Las biopilas representan otra alternativa, consistente en mezclar suelos contaminados con suelos pretratados o suelo capa vegetal y disponerlos en pilas estratégicas. En estas estructuras, la biorremediación se logra mediante aireación forzada, control de humedad, nutrientes, temperatura,

oxígeno y pH. La aireación puede realizarse por vacío o presión positiva, y se complementa con la adición de nutrientes para maximizar la actividad microbiana. Esta técnica ha demostrado éxito en la remediación de sitios afectados por derrames de petróleo, al promover la biodegradación y mineralización de contaminantes orgánicos (Cota Ruiz et al. 2019). Cabe destacar que las biopilas se definen como procesos biológicos controlados donde el suelo contaminado se organiza en montículos, se estimula la microbiota autóctona y se mantienen parámetros críticos para asegurar su eficacia (Castro Rodríguez et al. 2022).

Finalmente, el bioventeo aerobio se aplica en suelos con baja oxigenación, insuflando aire u oxígeno para favorecer la biodegradación aeróbica de contaminantes. En casos necesarios, se añaden nutrientes o surfactantes para mejorar la disponibilidad de los contaminantes. Este método es particularmente útil en suelos afectados por combustibles, compuestos orgánicos volátiles (COV), semivolátiles (COSVs), pesticidas y herbicidas no halogenados, ya que acelera la descomposición de estas sustancias sin requerir excavación extensiva (Hernández Hernández 2020).

## MÉTODOS DE ESTIMULACIÓN

La biorremediación se ha considerado como una técnica emergente, ecológica y sostenible debido a su simplicidad, rentabilidad y a la capacidad metabólica de los microorganismos para degradar los hidrocarburos de petróleo en el suelo. Para potenciar la eficiencia y efectividad de los procesos de biorremediación se utilizan métodos de estimulación, cuando los requerimientos lo demandan. Básicamente, puede llevarse a cabo de forma natural (atenuación natural) o potenciarse con la introducción de nutrientes o aditivos (bioestimulación) o microorganismos (bioaumentación) (Castro Rodríguez et al. 2022; Romero Silva et al. 2019).

La bioaumentación es una estrategia dirigida a incrementar el número de microorganismos por unidad de volumen o masa de residuos o sustrato en tratamiento (Oña & Gualoto 2022). Esto se logra, inyectando microorganismos en el sistema de tratamiento. Los microorganismos injectados deben haber sido obtenidos *in situ*. Cuando en la fuente no existe la cepa necesaria para la degradación de un contaminante específico o cuando la tasa de biodegradación de la cepa local es muy baja, se emplearán microorganismos aislados *ex situ* (Díaz Segredo 2022).

En condiciones controladas esta es una técnica práctica y económicamente efectiva para eliminar la contaminación por hidrocarburos. Los microorganismos deben estar presentes en suficiente cantidad y diversidad. También deben tener asegurados sus requerimientos esenciales para lo cual se controlan rigurosamente parámetros como: nivel de oxígeno, nutrientes inorgánicos, acceso al sustrato, agua y otras condiciones como pH, temperatura, salinidad y propiedades del contaminante (Bermúdez Acosta 2012).

En la bioestimulación se incrementa el potencial de degradación de las comunidades microbianas naturales del lugar, pero sin modificar la diversidad genética, proporcionando las condiciones ambientales adecuadas mediante el uso de enmiendas tales como adición de nutrientes, regulación de condiciones redox, cambio de pH, u otras condiciones diversas sobre las que se puede influir (Díaz Segredo 2022).

La adición de nutrientes, sustratos o tensoactivos que estimulen el crecimiento y la actividad metabólica de los microorganismos degradadores presentes en la zona impactada implica generalmente, el empleo de fertilizantes, suplementos y/o factores de crecimiento. También pequeñas cantidades de contaminantes pueden actuar como estimulante natural, pues activan los

operones que regulan la síntesis de las enzimas que intervienen en el proceso de biorremediación (Bermúdez Acosta 2012). También la mejora de las condiciones ambientales desde el punto de vista nutricional, ha demostrado ser una de las mejores soluciones en términos de facilidad y manejo. Además, la bioestimulación presenta una notable ventaja frente a otras alternativas, porque los microorganismos ya están adaptados a las condiciones del sitio (Castro Rodríguez et al. 2022).

El uso de biosurfactantes permite mejorar y acelerar los procesos de biorremediación ya que impulsan la biodisponibilidad de hidrocarburos por las sustancias tensoactivas producidas por bacterias que crecen en su presencia. Estos productos son compuestos anfifílicos capaces de intercalarse en las interfases aire-agua y aceite-agua, por lo que disminuyen la tensión superficial e interfacial y promueven cambios en la mojabilidad del petróleo en el suelo. Además, disminuyen la viscosidad del aceite, promoviendo su fluidización; debido a ello los compuestos hidrocarbonados son liberados, solubilizados y/o dispersados en la fase acuosa para ser atacados enzimáticamente por los microorganismos biodegradadores. Derivado de lo anterior, se logra una mejoría en las tasas de biodegradación (Díaz Segredo 2022; Castillo Campos 2022).

Los biosurfactantes son producidos a partir de diversas especies de bacterias, levaduras y hongos, ya sea extracelularmente o como parte de la membrana celular. Presentan varias ventajas respecto a los surfactantes químicos: pueden obtenerse a partir de fuentes baratas y autosustentables, desechos y subproductos industriales; son biocompatibles, estables a condiciones ambientales extremas, sus concentraciones micelares críticas son pequeñas, son altamente biodegradables y su toxicidad es baja. Al ser producidos por diversos microorganismos, los biosurfactantes se encuentran en una amplia variedad química y estructural. Entre los principales microorganismos productores de biosurfactantes se encuentran especies del género *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Rhodococcus*, empleados en la industria petrolera para tratar derrames de hidrocarburos y en la biorremediación de suelos (Castillo Campos 2022).

## APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE BIORREMEDIACIÓN

En el mundo se ha utilizado ampliamente esta técnica para el tratamiento de residuos petrolizados, así lo demostró Martínez en una de sus investigaciones donde analizó el proceso de biorremediación aeróbica de un suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo, en México, utilizando lodos residuales (biosólidos) de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas como fuente alternativa de macro y micronutrientes. Los resultados demostraron que los lodos residuales estimularon eficazmente los microorganismos nativos del suelo, acelerando la degradación de hidrocarburos (Martínez Prado et al. 2011).

Ferreira y otros profesionales evaluaron la biorremediación de un suelo brasileño tropical contaminado con residuos aceitosos intemperizados provenientes de la industria petrolera. Los investigadores probaron tres concentraciones iniciales de hidrocarburos totales de petróleo (HTP): 15,3, 19,0 y 29,2 g/kg de suelo, durante un período de 60 días. El proceso de biorremediación demostró ser efectivo, logrando tasas de biodegradación de 84 %, 72 % y 55 % respectivamente para las tres concentraciones evaluadas. Los resultados indicaron que la concentración inicial de HTP influyó inversamente en la eficacia de la biodegradación (Ferreira Do Nascimento, Santos Oliveira & Pessoa De França 2013).

En Cuba existe experiencia práctica acerca del manejo de suelos contaminados con hidrocarburos, destacándose acciones de biorremediación para el manejo de los residuos sólidos petrolizados

generados por la limpieza de tanques de almacenamiento, con resultados prometedores en el desarrollo de la técnica de Landfarming. En este sentido se aplica fundamentalmente la bioestimulación para mejorar las cargas de nitrógeno y fósforo necesarias para el proceso. En dicho proceso se demostró una degradación de G y A e HCT a 140 días de proceso con tasas de biodegradación del 86 % y 85 % respectivamente. La cuantificación de fracciones del petróleo: saturados, aromáticos y asfaltenos, en 180 días de tratamiento tasas del 76 %, 81 % y 80 %, en cada caso (Romero Silva, Sánchez Peralta & Fernández Rangel 2016).

La biorremediación se ha consolidado también como una estrategia efectiva para la recuperación de ecosistemas contaminados, tal es el caso de manglares. Sobre ello se realizó un estudio de aplicación de esta tecnología en un área de manglar en la cayería norte del centro de Cuba en el cual se evaluó un sedimento contaminado con petróleo en un manglar y se desarrolló una estrategia de recuperación mediante biorremediación aplicando las técnicas de bioaumentación y bioestimulación (Romero Silva et al. 2021).

Igualmente, otros residuos contaminados con hidrocarburos como cortes de perforación contaminados con diésel fueron tratados por un proceso de biorremediación mejorada, con acondicionadores orgánicos para su manejo y disposición final. El proceso se desarrolló a escala de campo empleando el método de bioestimulación. El seguimiento analítico se realizó mediante la medición de grasas y aceites, hidrocarburos totales según normas establecidas. La actividad microbiana se evaluó mediante la respirometría en suelos, con crecimiento exponencial entre 90 y 150 días. En la aplicación se logró una remoción superior al 70 % de los contaminantes y disminución del contenido de aromáticos en un 61 %. Además, no hubo toxicidad para la biota terrestre en el suelo tratado (Díaz Rodríguez et al. 2023).

Los estudios analizados demuestran la eficacia de la biorremediación en la degradación de hidrocarburos, con aplicaciones exitosas en suelos agrícolas, manglares y residuos contaminados con hidrocarburos, alineándose con políticas ambientales que priorizan la gestión responsable de recursos y la reducción de impactos ecológicos. No obstante, si bien existen reportes prometedores sobre la biodegradación de fracciones pesadas en contextos controlados, la literatura carece de estudios exhaustivos que evalúen la eficacia de las técnicas biológicas en matrices dominadas por asfaltenos, especialmente bajo condiciones ambientales variables. Esta limitación subraya la necesidad de profundizar en el desarrollo de protocolos adaptados, la optimización de biosurfactantes y la caracterización de consorcios microbianos especializados, con el fin de ampliar el alcance de la biorremediación hacia residuos asfálticos más complejos y garantizar su aplicabilidad a escala industrial. Bajo este contexto se considera una arista que puede ser explorada para fomentar las prácticas asociadas con la mayor efectividad e inclusión en los protocolos de gestión para estos residuos.

## 04 REFERENCIAS

**Díaz Carrillo, A.**, "Programa de educación ambiental para la comunidad de trabajadores de la Planta de Asfalto PC-3 del municipio de Consolación del Sur". Tesis de Maestría. Universidad de Pinar del Río Hermanos Saíz Montes de Oca. Pinar del Río, Cuba. 2021. Disponible en: <https://rc.upr.edu.cu/handle/DICT/4063>

**Rahmad, S., et al.**, "Assessment of metal leaching from rediset-polymer modified asphalt binder on groundwater and soil contamination". *Case Studies in Construction Materials* 2022, 16, p. 1-13 ISSN 2214-5095. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01108>

**Martínez Prado, A., et al.**, "Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes". *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 2011, 27(3), p. 241-252 ISSN 0188-4999. Disponible en: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992011000300009](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992011000300009)

**Victoria Palma, C., et al.**, "Modificación de asfalto con elastómeros para su uso en pavimentos". *AFINIDAD* LXXIII 2016, 574, p. 119-124. Disponible en: <https://files01.core.ac.uk/download/pdf/45665856.pdf>

**Gumarova, Z.M., et al.**, "Transformation of the chemical properties of soils in the zone of influence of the asphalt concrete plant". *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 2022, 979, p. 1-6. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/979/1/012159>

**ASIM, N., et al.**, "Wastes from the petroleum industries as sustainable resource materials in construction sectors: opportunities, limitations, and directions". *Journal of Cleaner Production* 2020, p. 1-45. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125459>

**Centro de Estudios de Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)**. "Reciclado de pavimentos asfálticos". ed. Ministerio de Fomento and Ministerio de Medio Ambiente 2015. Disponible en: <https://cdn.transportes.gob.es/portal-web-cedex/NR/26C518BE-1802-4803-82B1FBE634B03B03/119932/RECICLADODEPAVIMENTOSASFALTICOS.pdf>

**Mendoza, J.F., E. Adame, O.A. Marcos**. "Beneficios ambientales del reciclaje de pavimentos". Instituto Mexicano del Transporte 2020, 1(184), p. 1-2. Disponible en: <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=504&IdBoletin=184>

**Almusawi, A., et al.**, "Enhancing waste asphalt durability through cold recycling and additive integration". *Functional Composite Materials* 2024, 5, p. 1-9. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s42252-024-00061-7>

**Miranda Argüello, F. And J.P. Aguiar Moya**. "Mezclas asfálticas con rap: pavimentos asfálticos reciclados". PITRA-LanammeUCR 2019, 10(1), p. 1-9. Disponible en: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1421/Boletin%201%20Mezclas%20asf%C3%A1lticas%20con%20RAP.pdf?sequence=1>

**Rojas Rojas, G., et al.**, "Modificación del asfalto con orujo de uva roja como material antioxidante". *Revista Infraestructura Vial / LanammeUCR* 2021, 23(41), p. 1-10 ISSN 2215-3705. Disponible en: <https://doi.org/10.15517/iv.v23i41.44419>

**González Castro, C.A., J.C. Mulato, And J.D. Tellez.** "Variación del envejecimiento del asfalto (60-70) debido a la inclusión de polvo de orujo producto de la cepa Cabernet Sauvignon, producido por la Industria Enológica". Tesis de grado. Universidad Católica de Colombia. 2015. Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/2972>

**Guzmán Ortiz, D.V., et al.**, "Uso agregado de pavimento asfáltico reciclado para un pavimento rígido". Ingeniería, Investigación y Tecnología 2021, XXII(1) p. 1-11 ISSN 2594-0732. Disponible en: <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2021.22.1.005>

**Robles Godier, N.R And Cerna Llanos, W.A.** "Diseño de mezclas asfálticas con pavimento reciclado para el mejoramiento mecánico en la carretera Lambayeque – Illimo". Tesis de grado. Universidad Señor de Sipán. Pimentel, Perú. 2024. Disponible en: <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/13134>

**Joke, A., V.D.B. Wim, And B. Johan,** "Review and environmental impact assessment of green technologies for base courses in bituminous pavements". *Environmental impact assessment review* 2016, 60, p. 129-147 ISSN 0195-9255. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.EIAR.2016.04.005>

**Koshlaf, E. And A.S. Ball.** "Soil bioremediation approaches for petroleum hydrocarbon polluted environments". *AIMS Microbiol.* 2017, 3(1), p. 25-49. Disponible en: <https://doi.org/10.3934/microbiol.2017.1.25>

**Tapia Hinojosa, M.P.** "Evaluación de la eficiencia de la remoción de hidrocarburos totales de lodos petrolizados empleando un procedimiento de oxidación química". Tesis de maestría. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador. 2016. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/15632>

**Cota Ruiz, K., et al.**, "Biorremediación: actualidad de conceptos y aplicaciones". *Biotecnia* 2019, 21(1), p. 37-44 ISSN 1665-1456. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=672971082005>

**Núñez, R., et al.**, "Biorremediación de la contaminación de petróleo en el mar". Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo; Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente 2010, 19, p. 1-6 ISSN 1683-8904. Disponible en: <http://www.cmad.ama.cu/index.php/cmad/article/download/146/421>

**Díaz Segredo, J.L.**, "Proyecto para el manejo de residuos sólidos petrolizados de la empresa de perforación y extracción de petróleo Majagua". Tesis de grado. Universidad de Moa. Universidad de Moa. Holguín, Cuba. 2022. Disponible en: <http://ninive.ismm.edu.cu/handle/123456789/4105>

**Hernández Valencia, I., G. Navas, And C. Infante.** "Fitoremedación de un suelo contaminado con petróleo extra pesado con *Megathyrsus maximus*". Revista Internacional de Contaminación Ambiental 2017, 33(3), p. 495-503. Disponible en: <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.03.12>

**Castro Rodríguez, D.J., et al.**, "Despliegue de la función calidad para determinar los requisitos de diseño en biopilas experimentales a escala de banco, evaluadas como alternativa resiliente para la degradación de residuos petrolizados". Revista Chilena de Ingeniería 2022, 30(3), p. 439-454 ISSN 0718-3305. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052022000300439>

**Hernández Hernández, D.**, "Biotratamiento a cortes de perforación contaminados con diésel". Tesis de grado. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría. La Habana, Cuba. 2020.

**Romero-Silva, R., et al.**, "Bioremediation of soils contaminated with petroleum solid wastes and drill cuttings by *Pleurotus sp.* strains under different treatment scales". *bioRxiv* 2019. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1101/588673>

**Oña, T. And M. Gualoto.** "La Biodiversidad al servicio del ambiente". Universidad Técnica del Norte. Ibarra, Ecuador. Ed UTN, 433 p. 2022. ISBN 978-9942-845-16-0. Disponible en: <https://dokumen.pub/biorremediacion-ambiental-la-biodiversidad-al-servicio-del-ambiente-1nbsped-9789942845160.html>

**Bermúdez Acosta, J.**, "Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos a partir del uso de un consorcio bacteriano alóctono, en la zona costera de Punta Majagua". Tesis de maestría. Universidad Central Marta Abreu de las Villas. Cienfuegos, Cuba. 2012. Disponible en: <https://dspace.uclv.edu.cu/items/6852f24a-9bc7-4529-aedc-66162a061b49>

**Castillo Campos, E.**, "Producción y evaluación de un biosurfactante para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos". Tesis Doctoral. Universidad Autónoma Metropolitana. Ciudad de México. 2022. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.24275/uama.6738.9061>

**Ferreira Do Nascimento, T.C., F.J. Santos Oliveira, F. Pessoa De França.** "Biorremediación de un suelo tropical contaminado con residuos aceitosos intemperizados". Revista Internacional de Contaminación Ambiental 2013, 29(1), p. 21-28 ISSN 0188-4999 . Disponible en: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992013000100002](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992013000100002)

**Romero Silva, R., C. Sánchez Peralta, D. Fernandez Rangel,** "Biorremediación a lodos petrolizados generados de la limpieza de tanques". Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo; Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente 2016, 30, p. 1-8 ISSN 1683-8904. Disponible en: <https://cmad.ama.cu/index.php/cmad/article/view/226/502>

**Romero Silva, R., et al.**, "Estrategia de biorremediación en la recuperación de un ecosistema contaminado con petróleo". Infomin 2021, 13, p. 1-10. Disponible en: <https://infomin.edicionescervantes.com/index.php/i/article/view/200>

**Díaz Rodríguez, Y., et al.**, "Aplicación en campo de la biorremediación mejorada a cortes de perforación contaminados con diésel". *Tecnociencia Chihuahua* 2023, XVII(1), p. 1-15 ISSN 2683-3360. Disponible en: <https://doi.org/10.54167/tch.v17i1.1146>

**Conflictos de intereses**

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

**ORCID de los autores**

[Grettell Ramos Barceló](https://orcid.org/0009-0007-6759-5677) <https://orcid.org/0009-0007-6759-5677>

[Yuletsis Díaz Rodríguez](https://orcid.org/0000-0002-0705-1439) <https://orcid.org/0000-0002-0705-1439>