

REVISIÓN BIBLIOMÉTRICA DE LAS PRINCIPALES TÉCNICAS DE BIORREMEDIACIÓN DE CONTAMINANTES AMBIENTALES.

Jhonatan Alexander Acuña Villate.

Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomás seccional Tunja,

Jhonatan.acuna@usantoto.edu.co

Director: Edinson Fabian Monroy Ávila

RESUMEN

La creciente preocupación por el aumento de contaminantes en el entorno ha impulsado el desarrollo de tecnologías sostenibles y eficientes para su remediación. Este artículo ofrece una revisión bibliométrica de las principales técnicas de biorremediación, analizando su eficacia en el tratamiento de distintos contaminantes en suelos, cuerpos de agua y atmósfera. Mediante un análisis detallado de 30 estudios publicados entre 2018 y 2024, se identificaron las metodologías más utilizadas, destacando una preferencia por las técnicas in-situ, que representan el 73% de los estudios analizados. Entre las técnicas más destacadas figuran la fitorremediación, el compostaje y la bioaumentación, las cuales se presentan como alternativas sostenibles y efectivas para la mitigación de contaminantes. La fitorremediación, la técnica más mencionada en la literatura, sobresale por su capacidad para tratar metales pesados y compuestos tóxicos. El compostaje, por su parte, demostró ser una opción económica y eficaz en la gestión de residuos sólidos y la reducción de hidrocarburos, mientras que la bioestimulación mostró versatilidad en la intervención tanto en contextos in-situ como ex-situ.

ABSTRACT.

The growing concern about the increase in pollutants in the environment has driven the development of sustainable and efficient technologies for their remediation. This article offers a bibliometric review of the main bioremediation techniques, analyzing their effectiveness in the treatment of different pollutants in soils, water bodies and the atmosphere. Through a detailed analysis of 30 studies published between 2018 and 2024, the most widely used methodologies were identified, highlighting a preference for in-situ techniques, which represent 73% of the studies analyzed. Among the most notable techniques are phytoremediation, composting and bioaugmentation, which are presented as sustainable and effective alternatives for the mitigation of pollutants. Phytoremediation, the most mentioned technique in the literature, stands out for its ability to treat heavy metals and toxic compounds. Composting, for its part, proved to be an economical and effective option for managing solid waste and reducing hydrocarbons, while biostimulation showed versatility in intervention in both in-situ and ex-situ contexts.

PALABRAS CLAVES.

Biorremediación, fitorremediación, compostaje, bioaumentación, contaminantes.

KEYWORDS

Bioremediation, phytoremediation, composting, bioaugmentation, contaminants.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el incremento de contaminantes en el medio ambiente ha generado impactos negativos en los seres humanos, animales y plantas, desestabilizando el equilibrio natural de los ecosistemas. Estos contaminantes también representan un riesgo significativo para la seguridad alimentaria al infiltrarse en la cadena de producción de alimentos a través principalmente de los suelos agrícolas. A lo largo del último siglo, el avance de la economía y el aumento de la población ha causado graves efectos ambientales, especialmente en la contaminación persistente resultante de la agricultura intensiva, la minería y la expansión urbana (Mokrani y otros, 2024).

Para enfrentar este desafío, se han desarrollado diversas tecnologías de remediación fisicoquímica y biológica, los métodos fisicoquímicos son rápidos y eficaces, pero suelen ser costosos y complicados. Por otro lado, los tratamientos biológicos son más ecológicos y gozan de una mayor aceptación social ya que no perjudican a la fauna, flora ni a los elementos propios del entorno, técnicas como la fitorremediación y la biorremediación han sido objeto de numerosos estudios en años recientes debido a su capacidad para eliminar contaminantes de manera eficiente y a un costo menor que los métodos tradicionales (Kuppan y otros, 2024).

La biorremediación es una tecnología innovadora y ecológica que emplea microorganismos para degradar y neutralizar contaminantes, esta técnica desempeña un papel clave en la restauración de ecosistemas al estado original y previene la contaminación futura. Además, los proyectos de biorremediación bien planificados pueden crear nuevas oportunidades económicas y mejorar la gestión de impactos ambientales, impulsando prácticas socioeconómicas. Sin embargo, este proceso puede requerir más tiempo para la eliminación completa de los contaminantes orgánicos (Mokrani y otros, 2024).

Los biorremediadores incluyen bacterias, arqueas y hongos, siendo estos los principales organismos empleados, esta biorremediación microbiana tiene la ventaja de ser un proceso natural y, por ende, es bien recibido por el público. Además, es más accesible económicamente que otras tecnologías de remediación de desechos peligrosos y permite la destrucción de contaminantes sin transferirlos a otros medios. Los recientes avances en este campo han revelado el potencial de diversas técnicas, como la utilización de microbios para la limpieza de derrames de petróleo, la fitorremediación para la extracción de metales pesados, y la biodegradación de plaguicidas, así como la bioaumentación en aguas subterráneas contaminadas. Estas innovaciones no solo ofrecen soluciones efectivas ante problemas medioambientales críticos, sino que también resaltan la importancia de la

investigación continua en genómica microbiana y la nanotecnología, que prometen optimizar los procesos de remediación (Kuppan y otros, 2024).

Comparada con los métodos tradicionales de remediación química y física, la biorremediación es más ecológica, fácil de implementar y menos invasiva, capaz de eliminar y reducir la toxicidad de contaminantes como efluentes industriales, metales pesados, pesticidas y compuestos clorados. En este contexto, la creciente demanda de soluciones sostenibles y eficientes para la gestión de contaminantes ha impulsado el desarrollo de diversas técnicas de biorremediación (Katti y otros, 2024). Este artículo tiene como propósito llevar a cabo un análisis bibliométrico de las principales técnicas de biorremediación, con el fin de identificar las tendencias más destacadas en la investigación y las metodologías más utilizadas en este campo. Se han revisado estudios clave para evaluar las técnicas más efectivas según el tipo de contaminante y el entorno, lo que contribuye a una mejor comprensión de las aplicaciones actuales y futuras de la biorremediación a nivel global.

METODOLOGIA.

La presente investigación se centra en una revisión bibliométrica que analiza las técnicas de biorremediación más efectivas aplicadas en el tratamiento de contaminantes ambientales. Para llevar a cabo esta revisión, se realizaron búsquedas meticulosas en bases de datos académicas reconocidas, tales como Google Scholar, Science Direct, Scielo y Scopus, abarcando un intervalo temporal que se extiende desde el año 2018 hasta 2024. Se diseñó una cadena de búsqueda específica y rigurosa con el propósito de asegurar que los resultados obtenidos sean pertinentes y contemporáneos.

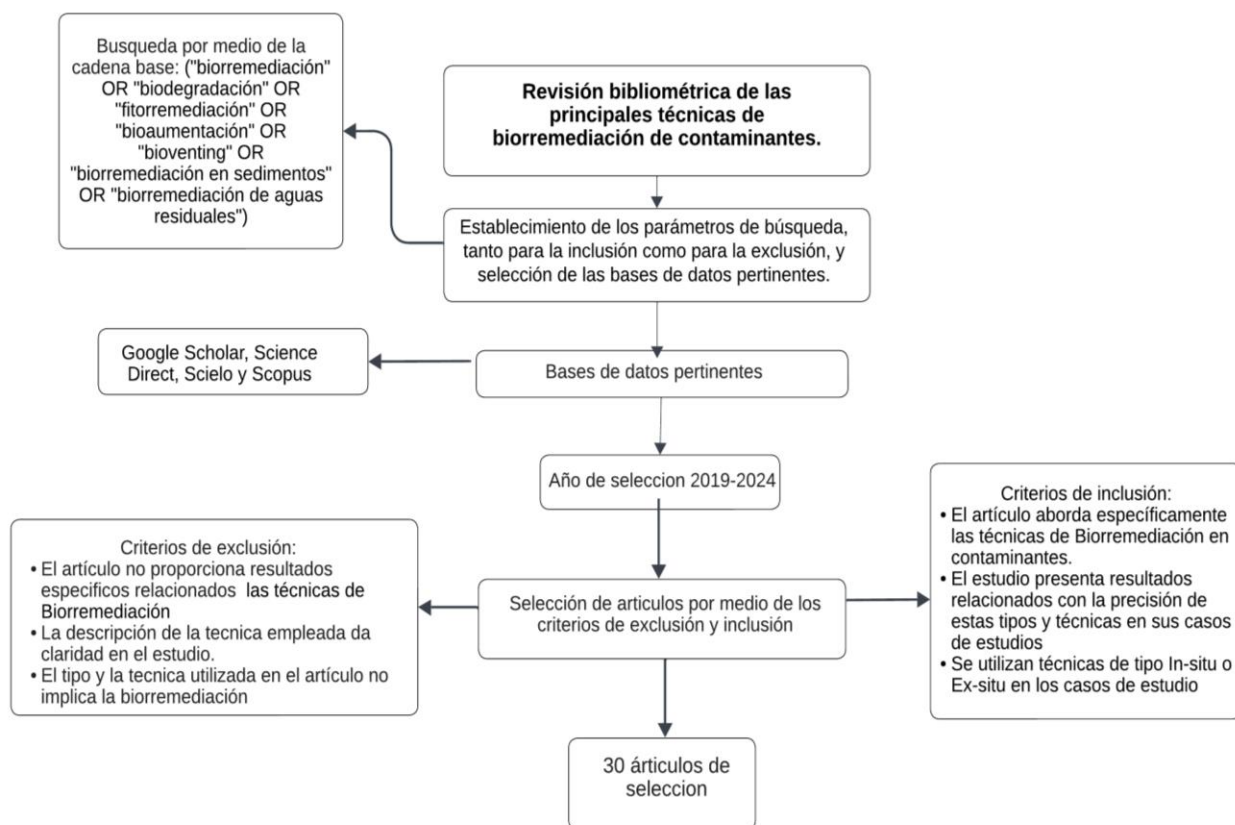
Una vez recopilada la información, se aplicaron criterios de inclusión y exclusión estrictos que facilitaron la identificación de los estudios más significativos en el campo de la biorremediación. Como resultado de este proceso sistemático, se seleccionaron un total de 35 artículos que abordan diversas técnicas de biorremediación, tales como bioaumentación, fitorremediación, composteo, Bioagumentación, bioadsorción, entre otras. La selección de estos estudios se fundamentó en su relevancia en relación con la efectividad y la aplicación de las metodologías para la eliminación de contaminantes del suelo y del agua, estableciendo así un marco sólido para el análisis posterior.

El análisis bibliométrico de los artículos seleccionados permitirá identificar las técnicas de biorremediación más frecuentemente implementadas, así como las estrategias que han demostrado ser más efectivas en la práctica. Esta revisión abarca también una evaluación de las tendencias actuales en investigación y desarrollo de nuevas metodologías en biorremediación, contribuyendo así a la innovación en el tratamiento de contaminantes. Al sintetizar estos hallazgos, el estudio busca ofrecer una perspectiva clara y comprensiva sobre las técnicas más prometedoras en el ámbito de la biorremediación.

Esta revisión pretende proporcionar una base sólida para futuras investigaciones y prácticas en el campo de la biorremediación, facilitando la adopción de metodologías o técnicas más

efectivas y sostenibles. Al documentar las principales técnicas y sus respectivas eficacias, este estudio no solo contribuye al avance del conocimiento en la evaluación y tratamiento de contaminantes, sino se pretende ofrecer recursos valiosos para investigadores, profesionales y formuladores de políticas comprometidos con la mejora de la calidad ambiental.

Figura 1 Descripción metodológica.



Fuente: Autor

RESULTADOS.

Tabla 1. Análisis de revisión de la literatura.

<i>Autor/Año</i>	<i>Tipo</i>	<i>Área de estudio</i>	<i>Clasificación (Ex-situ, In-situ)</i>
<i>(Velasco & Volke, 2020)</i>	<i>Composteo</i>	<i>Suelos</i>	<i>Ex-situ</i>
<i>(Plaza, 2019)</i>	<i>Fitorremediación</i>	<i>Suelos</i>	<i>In-situ</i>
<i>(Rodriguez, Zarate, & Codina, 2022)</i>	<i>Fitorremediación</i>	<i>Suelos</i>	<i>In-situ</i>
<i>(Alarcon Mora, 2023)</i>	<i>Composteo</i>	<i>Suelos</i>	<i>Ex-situ</i>

<i>(Villarroel, 2024)</i>	<i>Bioestimulación</i>	<i>Suelos</i>	<i>Ex -situ</i>
<i>(Patiño & Ocampo, 2024)</i>	<i>Bioadsorción</i>	<i>Aguas</i>	<i>In-situ</i>
<i>(Benites & Mercedes, 2024)</i>	<i>Bioestimulación</i>	<i>Aguas/Suelos</i>	<i>Ex -situ</i>
<i>(Flórez, 2024)</i>	<i>Ficorremediación</i>	<i>Aguas</i>	<i>In-situ</i>
<i>(Yepez, 2024)</i>	<i>Fitorremediación</i>	<i>Aguas</i>	<i>In-situ</i>
<i>(Euclides, 2023)</i>	<i>Fitorremediación</i>	<i>Aguas</i>	<i>In-situ</i>
<i>(Aparicio, 2024)</i>	<i>Bioestimulación, Biorremediación</i>	<i>Agua/ Aire</i>	<i>In-situ</i>
<i>(Torres, 2024)</i>	<i>Bioadsorción</i>	<i>Aire</i>	<i>In-situ</i>
<i>(Calle, 2024)</i>	<i>Bioaugmentación</i>	<i>Suelo</i>	<i>In-situ</i>
<i>(Perez, 2024)</i>	<i>Bioaugmentación/ Biorremediación</i>	<i>Agua</i>	<i>In-situ</i>
<i>(Rojas, 2024)</i>	<i>Composteo</i>	<i>Suelo</i>	<i>Ex -situ</i>
<i>(Rendón Castrillón y otros, 2024)</i>	<i>Bioaugmentación- Bioestimulación</i>	<i>Agua industria textil</i>	<i>In-Situ</i>
<i>(Schommer y otros, 2023)</i>	<i>Fitorremediación</i>	<i>Suelo metales pesados</i>	<i>In-Situ</i>
<i>(González González y otros, 2022)</i>	<i>Bioacumulación</i>	<i>Contaminantes emergentes en aguas</i>	<i>In- Situ</i>
<i>(Villaverde y otros, 2019)</i>	<i>Biorremediación- consorcios microbianos</i>	<i>Suelos agrícolas</i>	<i>In-situ</i>
<i>(Simarro y otros, 2019)</i>	<i>Bioaugmentación, Bioestimulación,</i>	<i>Suelo</i>	<i>In-situ</i>
<i>(Kumar Sakar y otros, 2019)</i>	<i>Biosorción, oxidación química</i>	<i>Aguas residuales sintéticas</i>	<i>In-situ</i>
<i>(Saravanan y otros, 2024)</i>	<i>Consorcios Microbianos Fitorremediación</i>	<i>Aguas residuales</i>	<i>In-situ</i>

<i>(Helmy & Kardena, 2024)</i>	<i>Biorremediación-biocompost</i>	<i>Suelos</i>	<i>In-situ</i>
<i>(Kumar y otros, 2024)</i>	<i>Biorremediación por microalgas</i>	<i>Nanopartículas metálicas</i>	<i>Ex- situ</i>
<i>(Or Roshid y otros, 2024)</i>	<i>Biorreactor</i>	<i>Haloácidos</i>	<i>Ex -situ</i>
<i>(Elumalai y otros, 2024)</i>	<i>Bacterias biosurfactnates, Fitorremediación</i>	<i>Metales pesados, petroleo</i>	<i>In-situ</i>
<i>(Biswas y otros, 2024)</i>	<i>Fitorremediación</i>	<i>Metales pesados, diésel</i>	<i>Ex-situ</i>
<i>(Stabili y otros, 2024)</i>	<i>Alga Chaetomorpha linum Fitorremediación</i>	<i>Microplasticos marinos</i>	<i>In- situ</i>
<i>(Lee y otros, 2024)</i>	<i>Bioaumentación con bacterias halófilas</i>	<i>Suelos hipersalinos</i>	<i>In-situ</i>
<i>(Blanco Vieites y otros, 2024)</i>	<i>Bioestimulación</i>	<i>Aguas residuales ganaderas</i>	<i>In-situ</i>

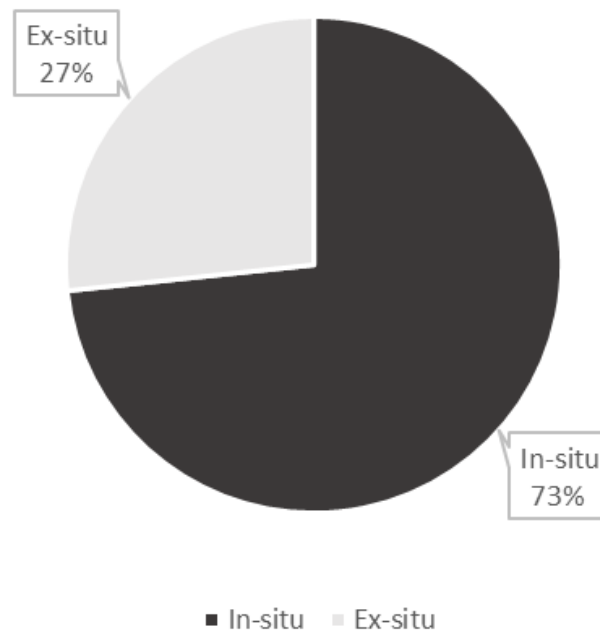
Fuente: Autor

- *Análisis de las Principales Técnicas de Biorremediación de Contaminantes*

Al examinar las técnicas de biorremediación empleadas en una selección de treinta artículos, se identificó una tendencia predominante hacia el uso de técnicas in-situ, con veintidós estudios adoptando esta clasificación. En comparación, ocho investigaciones aplicaron técnicas ex-situ. Esta distribución pone de manifiesto la diversidad de enfoques metodológicos en la investigación actual y la importancia de seleccionar el método adecuado para abordar la complejidad de los contaminantes estudiados.

La figura 2, El gráfico muestra la distribución de los dos tipos de estrategias: In-situ y Ex-situ, en términos de su proporción total de 30 artículos correspondientes a un 100%. El 73% corresponde a In-situ, mientras que el 27% está asociado a Ex-situ. Esto sugiere que las actividades In-situ son significativamente más predominantes, representando casi tres cuartas partes del total. Las actividades Ex-situ, aunque presentes, tienen un papel menor en comparación.

Figura 2, Distribución de la clasificación de técnicas de Biorremediación.



Fuente: Autor

La tendencia hacia el uso de técnicas in-situ sugiere que los investigadores están optando por métodos que permiten la remediación directamente en el lugar de la contaminación, lo cual puede ser más efectivo en ciertos contextos, especialmente en suelos y aguas contaminadas. Por otro lado, el uso de técnicas ex-situ, aunque menor, sigue siendo relevante, particularmente para casos donde la contaminación es severa o se requiere un tratamiento especializado fuera del sitio contaminado.

Dentro de la clasificación anterior se puede identificar la importancia de una técnica in-situ debido a que permite realizar intervenciones directamente en el lugar de estudio o conservación, lo cual favorece la preservación de las condiciones naturales del entorno. Esto es esencial para procesos que requieren la interacción directa con los factores ambientales presentes, asegurando una mayor fidelidad en los resultados obtenidos. Por ejemplo, el estudio realizado por Yopez (2024), resalta la importancia de un proceso de biorremediación al utilizar microalgas como una solución prometedora y sustentable para el tratamiento de aguas residuales y la producción de energía renovable, debido a que estos microorganismos tienen la capacidad de eliminar nutrientes y contaminantes presentes en el agua, mejorando su calidad durante su ciclo de vida. Al mismo tiempo, según los resultados se pudo determinar que son grandes fuentes generando biomasa, la cual es una fuente potencial de biocombustibles como biodiésel, bioetanol, biohidrógeno y biometano, mediante diversos métodos de conversión.

Así mismo, en este mismo ámbito se pudo evidenciar otro importante estudio como lo fue el de Rodríguez, Zarate, & Codina, (2022), resaltando la capacidad de diversos

microorganismos, específicamente bacterias, para degradar compuestos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos, que son especialmente recalcitrantes. La identificación de cepas bacterianas efectivas, como *Sphingobium* y *Pseudomonas*, demuestra no solo la viabilidad de estas metodologías, sino también su relevancia económica y ambiental en la restauración de suelos contaminados in situ. Además, se destaca la importancia de variables fisicoquímicas como el pH, la temperatura y la disponibilidad de oxígeno, que juegan un papel crítico en la optimización de los procesos de biorremediación.

Por otra parte, la clasificación Ex-situ es de gran importancia debido a que su relevancia radica en que permite el tratamiento de contaminantes fuera del sitio afectado, garantizando un control más preciso de los procesos de remediación. Este enfoque minimiza los riesgos para la salud pública y el medio ambiente, al tratar grandes volúmenes de material contaminado de manera eficiente. Según el estudio realizado por Rojas (2024), pretende evaluar la capacidad de la biomasa fúngica para la remoción de metales pesados, analizando la producción de dicha biomasa y sus mecanismos de acción para mejorarla con una técnica de biorremediación, siendo fundamental la clasificación ex-situ, ya que permitió preservar la salud pública de los trabajadores expuestos a las toxinas que se generan durante el proceso y tratarlas de una mejor manera y en un ámbito adecuado.

De esta misma manera, el estudio realizado por Or Roshid y otros (2024), presenta la necesidad de métodos de biorremediación eficientes. Este estudio investiga la sobreexpresión de L-2-haloácido deshalogenasa (HadL) de *Pseudomonas putida* en la superficie de endosporas de *Bacillus subtilis*, abordando desafíos de purificación e inmovilización. Se desarrolló un biorreactor enzimático escalable que optimiza las condiciones para la deshalogenación, logrando una actividad funcional superior gracias a un promotor inducible por IPTG. La capacidad del sistema para deshalogenar compuestos como el ácido 2-cloropropiónico a una velocidad notable indica su potencial en aplicaciones ex-situ para la remediación de contaminantes halogenados en ambientes acuáticos. Además, la renovación de las endosporas asegura la sostenibilidad del proceso, ampliando su viabilidad en estrategias de manejo de residuos.

<i>Tipo de Técnica</i>	<i>Clasificación</i>	<i>Número de Artículos</i>
<i>Composteo</i>	<i>Ex-situ</i>	<i>4</i>
<i>Fitorremediación</i>	<i>In-situ</i>	<i>8</i>
<i>Bioestimulación</i>	<i>Ex-situ/In-situ</i>	<i>5</i>
<i>Bioadsorción</i>	<i>In-situ</i>	<i>3</i>
<i>Bioaugmentación/Biorremediación</i>	<i>In-situ</i>	<i>3</i>
<i>Bioacumulación</i>	<i>In-situ</i>	<i>1</i>
<i>Biosorción/Oxidación química</i>	<i>In-situ</i>	<i>1</i>

<i>Biorremediación por microalgas</i>	<i>Ex-situ</i>	<i>1</i>
<i>Fitorremediación con Alga Chaetomorpha</i>	<i>In-situ</i>	<i>1</i>
<i>Total, de artículos</i>		<i>30</i>

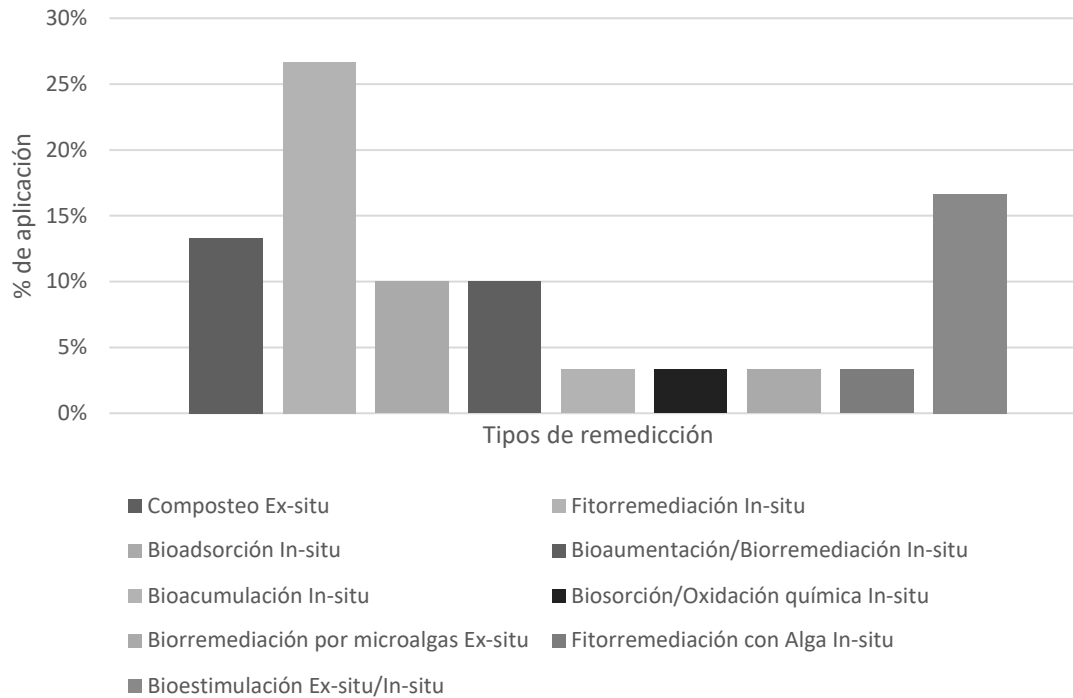
A continuación, la tabla 2, presenta una la distribución de las técnicas de biorremediación analizadas, donde se pudieron identificar diversidades técnicas como el composteo, la fitorremediación, bioestimulación, bioaumentación y bioadsorción resaltando enfoques disponibles para enfrentar los desafíos de la biorremediación.

Tabla 2, la distribución de las técnicas de biorremediación analizadas.

Fuente: Autor

De la misma manera la figura 3, se puede evidenciar un análisis porcentual de la aplicación de diferentes tipos de biorremediación ambiental, Se observa que la fitorremediación in-situ es la técnica más aplicada, representando aproximadamente el 27% del total. Le sigue el composteo ex-situ con un 14%, reflejando una preferencia significativa por la intervención directa sobre los contaminantes en el sitio afectado. Técnicas como la bioadsorción in-situ, la bioaumentación/biorremediación in-situ, y la bioestimulación ex-situ/in-situ tienen aplicaciones más moderadas, rondando entre el 8% y el 10%. En menor proporción se encuentran los métodos de bioacumulación in-situ, biosorción/oxidación química in-situ, y biorremediación por microalgas ex-situ, con porcentajes que no superan el 5%.

Figura 3. Análisis porcentual de tipos de biorremediación.



Fuente: Autor

La técnica de biorremediación más referenciada en los artículos revisados fue la fitorremediación, con 8 menciones, lo que la posiciona como una de las metodologías in situ más empleadas para la mitigación de contaminantes. Esta técnica aprovecha la capacidad de las plantas para absorber, acumular y degradar contaminantes presentes en el suelo o el agua, siendo especialmente efectiva en la remediación de metales pesados y compuestos tóxicos (Naz y otros, 2024)

Estudios recientes destacan su eficiencia y sostenibilidad como una solución natural para la remediación ambiental tal como el realizado por (Zhang y otros, 2024), en el cual se demostró que la mejora de la fitorremediación con biocarbón modificado con ferrato (FeBC) puede aumentar significativamente su eficacia, al mejorar la microestructura del biocarbón y reducir la biodisponibilidad de los metales en el suelo, lo que contribuye a una menor acumulación de contaminantes en las plantas. Las interacciones entre el biocarbón, los agregados del suelo y las plantas indicaron que estas nuevas propuestas de coremediación favorece la resistencia de las plantas y remodeló las comunidades bacterianas del suelo, aumentando la actividad microbiana y mejorando la capacidad de remediación de suelos contaminados

El composteo, con cuatro (4) menciones, se identificó como una técnica ex situ que facilita la descomposición controlada de materia orgánica, acelerando el proceso de degradación a través de la acción de microorganismos. Es ampliamente utilizada para transformar residuos sólidos orgánicos en compuestos menos peligrosos (Alarcon Mora, 2023). Tal como lo menciona (Gallego R y otros, 2022) el uso de compost como único aditivo puede lograr una

reducción superior al 80% de hidrocarburos totales del petróleo en un período de 90 días, destacándose como una solución eficiente y de bajo costo para la biorremediación de grandes áreas contaminadas, el compost, al ser una rica fuente de nutrientes y materia orgánica, actúa como un bioestimulante, favoreciendo así la degradación de los hidrocarburos.

La bioestimulación, mencionada en cinco artículos, se destaca por su versatilidad, ya que puede aplicarse tanto *in situ* como *ex situ*. Este método se basa en la estimulación de los microorganismos nativos presentes en el ambiente contaminado, lo que acelera la biodegradación de los contaminantes. Otras técnicas, como la bioadsorción y la bioaugmentación, cada una con tres menciones, se centran en la remoción de contaminantes a través de la adherencia de partículas a superficies biológicas o el aumento de poblaciones de microorganismos específicos, respectivamente.

Por otro lado, técnicas menos comunes, como la bioacumulación, la biosorción y la fitorremediación con algas, mencionadas en un artículo cada una, sugieren que estas metodologías todavía están en fases exploratorias, pero tienen un potencial significativo para la remediación de contaminantes en entornos específicos.

Considerando la relevancia de la gráfica anterior, es fundamental comprender los mecanismos de funcionamiento de cada una de los tipos de biorremediación presentadas. La tabla 3, proporciona una descripción detallada de estos procesos, destacando las características técnicas y los principios de cada tipo de biorremediación.

Tabla 3. Descripción de los principales tipos de biorremediación.

Tipo de Biorremediación	Descripción
Composteo	Proceso biológico que utiliza la actividad microbiana para descomponer materia orgánica contaminada, transformándola en un material estable y no tóxico. Durante este proceso, los microorganismos degradan contaminantes presentes en los residuos, como hidrocarburos o metales pesados, en condiciones controladas de temperatura y oxigenación (<i>Velasco & Volke, 2020</i>).
Fitorremediación	Esta utiliza plantas para remover, degradar o inmovilizar contaminantes del suelo, agua o aire. Las plantas actúan a través de procesos como la absorción, acumulación y transformación de sustancias tóxicas, incluidas metales pesados, compuestos orgánicos y contaminantes emergentes (<i>Biswas y otros, 2024</i>).
Bioadsorción	Proceso de remediación en el que materiales biológicos, como bacterias, hongos o algas, se utilizan para adsorber contaminantes presentes en medios acuáticos o gaseosos. Estos organismos tienen superficies celulares con alta afinidad para retener metales pesados, compuestos orgánicos o contaminantes

emergentes mediante interacciones físico-químicas (*Patiño & Ocampo, 2024*).

Bioestimulación	Este consiste en la adición de nutrientes, oxígeno o compuestos específicos para estimular la actividad de microorganismos autóctonos en un ambiente contaminado. Este enfoque busca acelerar la degradación de contaminantes orgánicos como hidrocarburos, pesticidas o solventes, promoviendo la biodegradación natural sin introducir organismos externos. (<i>Blanco Vieites y otros, 2024</i>)
Bioacumulación	Los organismos vivos, como plantas, hongos o microorganismos, absorben y concentran contaminantes, especialmente metales pesados y compuestos tóxicos, en sus tejidos. A lo largo del tiempo, estas especies acumulan grandes cantidades de contaminantes desde el suelo o el agua, reduciendo su presencia en el medio ambiente (<i>González González y otros, 2022</i>).
Bioaumentación	La introducción de cepas microbianas específicas o consorcios microbianos en un entorno contaminado, con el fin de acelerar la degradación de contaminantes. Estas cepas, seleccionadas por su alta capacidad degradadora, son añadidas para complementar o potenciar la actividad microbiana autóctona, especialmente en sitios donde los microorganismos locales no son suficientemente efectivos (<i>Simarro y otros, 2019</i>).
Biosorción	Utiliza biomasa inerte, como algas, bacterias, hongos o residuos agrícolas, para adsorber y retener contaminantes del medio ambiente, particularmente metales pesados y compuestos orgánicos. A diferencia de los mecanismos activos, la biosorción no requiere que los organismos estén vivos, ya que la capacidad de adsorción se debe a los grupos funcionales presentes en las paredes celulares (<i>Kumar Sakar y otros, 2019</i>).

Fuente: Autor

Por otra parte, dentro de la revisión se pudo identificar que los principales medios de biorremediación aplicadas son en los medios de suelo, aire y agua, donde el suelo es el área de estudio predominante, con técnicas como el composteo, la fitorremediación, la bioestimulación, la bioaumentación y la biorremediación. En el agua, se destacan la bioadsorción, la fitorremediación, la bioestimulación y el uso de consorcios microbianos, orientadas principalmente a la descontaminación de aguas residuales o emergentes. El aire es el menos representado, con aplicaciones de bioadsorción y biorremediación, enfocadas en la eliminación de contaminantes atmosféricos. Esto refleja un mayor enfoque en la descontaminación de suelos y aguas, probablemente debido a su mayor vulnerabilidad a la contaminación industrial y agrícola.

CONCLUSIONES

La biorremediación se presenta como una alternativa viable y sostenible en la lucha contra la contaminación ambiental frente a enfoques tradicionales de remediación química y física. La revisión bibliométrica realizada revela una clara preferencia por las técnicas in-situ, particularmente la fitorremediación, el composteo y la bioaumentación. En particular, se

destaca la preferencia por técnicas in-situ, que representan aproximadamente el 73% de los estudios analizados, indica un enfoque creciente hacia intervenciones que minimizan el impacto ambiental y abordan la contaminación en su origen.

La fitorremediación ha demostrado ser eficaz, siendo la técnica más referenciada en los artículos revisados, lo que confirma su relevancia en la mitigación de contaminantes, especialmente metales pesados y compuestos orgánicos. Asimismo, el composteo se destaca como una opción viable y económica para el tratamiento de residuos sólidos y la degradación de hidrocarburos, enfatizando la valorización de residuos como recurso en los procesos de remediación.

La versatilidad de la bioestimulación, aplicable tanto in-situ como ex-situ, subraya la necesidad de adaptar las estrategias de biorremediación a las condiciones específicas de los contaminantes y entornos. Por su parte, las técnicas de bioadsorción y bioaugmentación muestran un potencial significativo, ofreciendo soluciones prometedoras para la remoción de contaminantes en medios acuáticos y terrestres.

Es esencial seguir la investigación continua en este campo, lo que implica no solo mejorar las técnicas existentes, sino también explorar nuevas metodologías que puedan ofrecer soluciones efectivas a problemas complejos. La combinación de biorremediación con enfoques innovadores, como la genómica microbiana y la nanotecnología, promete revolucionar la forma en que se aborda los contaminantes ambientales.

REFERENCIAS

Alarcon Mora, G. E. (2023). Eficacia de la biorremediación utilizando compost y vermicompost en la reducción de contaminación de suelos por metales pesados en Cocachacra, 2023. Universidad Cesar Vallejo.

Aparicio, R. (2024). Avances y casos prácticos de la oxigenación y biorremediación en las balsas de riego. Universidad de Jaen.

Benites, J., & Mercedes, A. (2024). Biorremediación de agua y suelo contaminados por residuos orgánicos de petróleo en Iquitos. Universidad Nacional de Trujillo.

Biswas, S., Jayaram, S., Philip, I., Balasubramanian, B., Pappuswamy, M., Chelliapan, S., . . . Vasseghian, Y. (2024). Appraisal of the potential of endophytic bacterium *Bacillus amyloliquefaciens* from *Alternanthera philoxeroides*: A triple approach to heavy metal bioremediation, diesel biodegradation, and biosurfactant production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(5).
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113454>

Blanco Vieites, M., Álvarez Gil, M., Delgado, F., Garcia Ruesgas, L., & Rodriguez, E. (2024). Livestock wastewater bioremediation through indigenous microalgae culturing as a circular bioeconomy approach as cattle feed. *Algal Research*, 78.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103424>

- Calle, F. (2024). Biorremediación de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) presentes en aceite dieléctrico mediante Bioaugmentación con *Trichoderma* SP. en mesocosmos de suelo. Universidad Politecnica Salesiana.
- Elumalai, P., Rajamohan, R., Vayal Purayil, A., Menon, V., Pranav Srivatsan, R., Lakshminarayanan, S., . . . Parthipan, P. (2024). Biosurfactant and iron oxide nanoparticle-assisted bioremediation of soil co-contaminated with hydrocarbons and hazardous heavy metals. *Chemical Engineering Journal*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.154677>
- Euclides, D. (2023). Fitorremediación y biogás, un enfoque integral para la sostenibilidad del agua. *Dialnet*.
- Flórez, G. L. (2024). Potencial de un consorcio microbiano con predominio de microalgas MPMC en la biorremediación de aguas residuales de la PTAR de Nemocón, Cundinamarca. Universidad de los Andes.
- González González, R., Flores Contreras, E., Parra Saldivar, R., & Iqbal, H. (2022). Bio-removal of emerging pollutants by advanced bioremediation techniques. *Environmental Research*, 214. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113936>
- Helmy, Q., & Kardena, E. (2024). Enhancing field-scale bioremediation of weathered petroleum oil-contaminated soil with biocompost as a bulking agent. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100735>
- Katti, U. S., Prajna, R., Kavitha, R., & Sanjana, M. (2024). Bioremediation – the recent drift towards a sustainable environment. *Environmental Science Advances*, 3(8), 1097-1110. <https://doi.org/10.1039/d3va00358b>
- Kumar Sakar, K., Majee, S., Pathak, U., Polepali, S., Halder, G., Dasgupta Mandal, D., & Mandal, T. (2019). Development of an integrated treatment strategy for removal of ondansetron using simultaneous adsorption, oxidation and bioremediation technique. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103020>
- Kumar, P., Krishna Perumal, P., Sumathi, Y., Singhania, R. R., Chen, C. W., Di Dong, C., & Kumar Patel, A. (2024). Nano-enabled microalgae bioremediation: Advances in sustainable pollutant removal and value-addition. *Environmental Research*(263). doi:<https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120011>
- Kuppan, N., Padman, M., Mahadeva, M., Srinivasan, S., & Devarajan, R. (2024). A comprehensive review of sustainable bioremediation techniques: Eco friendly solutions for waste and pollution management. *Waste Management Bulletin*, 2(3), 154-171. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.07.005>
- Lee, K., Archer, S., Kansour, M., & Mailem, D. (2024). Bioremediation of oily hypersaline soil via autochthonous bioaugmentation with halophilic bacteria and archaea.

Science of The Total Environment, 922.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171279>

- Mokrani, S., Houali, K., Kumar Yadav, K., Ali Arabi, A., Eltayeb, L. B., Benguerba, Y., . . . Nabti, E.-h. (2024). Bioremediation techniques for soil organic pollution: Mechanisms, microorganisms, and technologies - A comprehensive review. *Ecological Engineering*, 207. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107338>
- Naz, M., Rahil Afzal, M., Qi, S. S., Dai, Z., Sun, Q., & Du, D. (2024). Microbial-assistance and chelation-support techniques promoting phytoremediation under abiotic stresses. *Chemosphere*, 365. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143397>
- Or Roshid, M., Moraskie, M., O'Connor, G., Dikici, E., Marc Zingg, J., Deo, S., . . . Daunert, S. (2024). Development of a renewable endospore-displayed enzyme bioreactor for the bioremediation of α -haloacids. *Journal of Water Process Engineering*, 65. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105789>
- Patiño, S., & Ocampo, M. (2024). Biosorción y biorremediación de aguas residuales de origen textil: Una solución sostenible para la industria. *Ciencias Ambientales*.
- Perez, C. (2024). Biorremediación de los sedimentos marinos de la bahía de Samanco (Ancash – Perú) utilizando *Pseudocmus dubiosus* a diferentes densidades en condiciones de laboratorio. Universidad Nacional Del Santa.
- Plaza, G. (2019). BIORREMEDIACIÓN EN SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*.
- Rendón Castrillón, L., Ramirez Carmona, M., Ocampo Lopez, C., Gonzáles López, F., Cuartas Uribe, B., & Mendoza Roca, J. (2024). Efficient bioremediation of indigo-dye contaminated textile wastewater using native microorganisms and combined bioaugmentation-biostimulation techniques. *Chemosphere*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141538>
- Rodriguez, A., Zarate, S., & Codina, A. (2022). Biodiversidad bacteriana presente en suelos contaminados con hidrocarburos para realizar biorremediación. *Revista de Ciencias Ambientales*.
- R Gallego, J. L., Peña-Álvarez, V., M Lara, L., Baragaño, D., Forján, R., Colina, A., . . . Peláez, A. I. (2022). Effective bioremediation of soil from the Burgan oil field (Kuwait) using compost: A comprehensive hydrocarbon and DNA fingerprinting study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 247. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114267>
- Rojas, J. (2024). Biorremediación fúngica de metales pesados del compost de RSOM/U. BUAP.

- Saravanan, A., Thamarai, P., Deivayanai, V., Karishma, S., Shaji, A., & Yaashikaa, P. (2024). Current strategies on bioremediation of personal care products and detergents: Sustainability and life cycle assessment. *Chemosphere*, 354. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141698>
- Schommer, V., Vanin, A. P., Torres Nazari, M., Valdecir, F., Dettmer, A., Luciane, M. C., & Steffentallo Pccin, J. (2023). Biochar-immobilized *Bacillus* spp. for heavy metals bioremediation: A review on immobilization techniques, bioremediation mechanisms and effects on soil. *Science of The Total Environment*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163385>
- Simarro, R., Gonzáles, N., Bautista, L., & Molina, M. C. (2019). Assessment of the efficiency of in situ bioremediation techniques in a creosote polluted soil: Change in bacterial community. *Journal of hazardous materials*, 262, 158-167. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.08.025>
- Stabili, L., Quarta, E., & Giotta, L. (2024). The seaweed *Chaetomorpha linum* cultivated in an integrated multitrophic aquaculture system: A new tool for microplastic bioremediation? *Science of The Total Environment*, 954. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176262>
- Torres, L. (2024). Cultivos de microalgas: una alternativa de tratamiento biológico de aire y valorización de emisiones. CIACTEC.
- Velasco, J., & Volke, T. (2020). El composteo: una alternativa tecnológica para la biorremediación de suelos en México. *Gaceta ecologica*.
- Villarroel, R. (2024). Sistemas de biopilas para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en la Zona del Campo Carrasco basado en el análisis de velocidad de biodegradación. Universidad mayor de San andres.
- Villaverde, J., Rubio Bellido, M., Lara Moreno, A., Merchan, F., & Morillo, E. (2019). Combined use of microbial consortia isolated from different agricultural soils and cyclodextrin as a bioremediation technique for herbicide contaminated soils. *Chemosphere*, 193, 118-125. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.172>
- Yepez, D. (2024). APLICACIÓN DE MICROALGAS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES Y LA GENERACIÓN DE ENERGÍA SOSTENIBLE. *Tecnología de Antioquia*.
- Zhang, M., Liu, Z., Han, F., Cong, H., & Zhou, W. (2024). Co-application of phytoremediation with iron-loaded biochar in petroleum and zinc co-contaminated soil. *Environmental Research*, 263. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120037>