

EFICIENCIA EN LA ELIMINACIÓN DE METALES PESADOS POR MEDIO DE BACTERIAS
EN TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES NO DOMESTICAS PROVENIENTES DE
PROCESOS MINEROS

Luisa Fernanda López Coronel

Trabajo de Grado para Optar al Título de
Especialista en Química Ambiental

Directora

Yaneth Quintero López

MSc. Química.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Química Especialización en

Química Ambiental Bucaramanga

2024

Agradecimientos

El reconocimiento a Dios se formula en agradecimiento por la orientación divina que ha guiado mi trayectoria hasta este punto de mi existencia y por la providencia de rodearme de individuos cuya contribución ha sido fundamental en términos de apoyo y sabiduría.

La Universidad Industrial de Santander merece un especial reconocimiento por su participación significativa en mi desarrollo tanto profesional como personal.

Expreso mi profundo agradecimiento a mi respetada directora de monografía, Yaneth Quintero López, cuya dedicación, enseñanzas y estímulo han sido esenciales en el proyecto que emprendí bajo su guía. Su compromiso con la academia ha dejado una huella imborrable, y agradezco su enseñanza de que siempre debemos erigirnos sobre los hombros de aquellos que nos precedieron.

Agradezco a mi madre, mi primera maestra en la vida, por ser la luz y la conciencia que ha iluminado mi sendero. Su enseñanza más valiosa ha sido el amor incondicional que ha permeado cada paso de mi jornada.

Mi gratitud se extiende a mi padre, cuyo empeño me ha capacitado para superar los desafíos de la vida, inculcándome la capacidad de vislumbrar más allá de lo evidente y demostrando constantemente que siempre podemos aspirar a más.

A mi hermana, le agradezco por brindar siempre palabras de apoyo y por servir como un ejemplo inspirador que me impulsa a esforzarme diariamente por ser una versión mejor de mí mismo

Tabla de Contenido

RESUMEN	7
INTRODUCCIÓN	9
1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO.....	13
1.1 Planteamiento del problema.....	13
1.2 Justificación	14
1.3 OBJETIVOS	16
1.3.1 Objetivo General.....	16
1.3.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Marco teórico	17
2.1 Tratamientos Físicos	18
2.2 Tratamientos Químicos.....	18
2.3 Tratamientos Biológicos	18
2.4 Sistema De Tratamiento Anaeróbico	18
2.5 Sistema De Tratamiento Aeróbico.....	20
2.6 Normativa Colombiana para vertimientos	22
2.6.1 Marco Regulatorio.....	23
2.6.2 Parámetros Establecidos.....	23
2.6.3 Implicaciones para la Industria:.....	23
3. METODOLOGÍA	24
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30

5.	CONCLUSIONES	47
6.	RECOMENDACIONES.....	49
7.	REFERENCIAS.....	50

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Ecuaciones de búsqueda</i>	24
Tabla 2 <i>Número de artículos encontrados con las ecuaciones</i>	25
Tabla 3 <i>Clasificación de citaciones por países</i>	27
Tabla 4 <i>Síntomas de la intoxicación típicos y los niveles de contaminación máximos</i>	34
Tabla 5 <i>Valores límites máximos permisibles-Metales y Metaloides</i>	35
Tabla 6 <i>Valores límites máximos permisibles-Metales y Metaloides</i>	36
Tabla 7 <i>Consortio Rizobacterias</i>	38
Tabla 8 <i>Métodos de eliminación de metales más utilizadas</i>	44
Tabla 9 <i>Sistemas de tratamiento con microorganismos</i>	46

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Esquema general de un reactor UASB</i>	19
Figura 2 <i>Esquema general de lodos activados</i>	21
Figura 3 <i>Esquema general de Biofiltro</i>	21
Figura 4 <i>Mapa de coautoría por países</i>	26
Figura 5 <i>Mapa de co-ocurrencia de palabras claves</i>	28
Figura 6 <i>Preparación inoculo</i>	41
Figura 7 <i>Proceso adsorción de Cr(VI)</i>	42

RESUMEN

Título: Eficiencia en la eliminación de metales pesados por medio de bacterias en tratamientos de aguas residuales no domésticas provenientes de procesos mineros*

Autor: Luisa Fernanda López Coronel **

Palabras Clave: Bacterias, metales pesados, aguas residuales no domésticas y procesos mineros

Uno de los grandes problemas en la minería es el manejo inadecuado de los efluentes generados por los procesos mineros. Estas aguas a menudo contienen contaminantes como los metales pesados. La eliminación eficiente de estos de las aguas residuales no domésticas es esencial para mitigar el impacto ambiental negativo de la minería en cuerpos hídricos.

El tratamiento de aguas residuales no domésticas mediante el uso de bacterias, para la eliminación de metales pesados es una de las alternativas más rentables actualmente. La simbiosis planta-bacteria es un método relevante en la acumulación de metales pesados en humedales. La biorremediación microbiana, ejemplificada por cepas como *Rheinheimera tangshanensis* y *Bacillus* en la adsorción de mercurio, destaca la influencia significativa de factores microbiológicos y ambientales en los diseños de tratamiento sostenible. Este enfoque emerge como una solución crucial para abordar la problemática de los metales pesados en aguas residuales industriales, subrayando la necesidad de considerar aspectos microbiológicos y ambientales en estas estrategias. Las investigaciones respaldan la eficacia de esta metodología, abriendo el camino hacia soluciones más efectivas y respetuosas con el medio ambiente. Las referencias pertinentes respaldan esta información. En este trabajo se evaluará la eficiencia en la eliminación de metales pesados por medio de bacterias en tratamientos de aguas residuales no domésticas del sector minero, con el fin de brindar una herramienta técnica que permita orientar sobre el uso de las bacterias.

* Trabajo de Grado: Eficiencia en la eliminación de metales pesados por medio de bacterias en tratamientos de aguas residuales no domésticas provenientes de procesos mineros

** Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Especialización en Química Ambiental. Director: Yaneth Quintero López. Magíster en Química.

Abstract

Title: Efficiency of heavy metal removal by bacteria in the treatment of non-domestic wastewater from mining processes.*

Author(s): Luisa Fernanda López Coronel **

Key Words: Bacteria, heavy metals, non-domestic wastewater and mining processes

One of the major issues in mining is the inadequate management of effluents generated by mining processes. These waters often contain contaminants such as heavy metals. The efficient removal of these contaminants from non-domestic wastewater is essential to mitigate the negative environmental impact of mining on water bodies.

The treatment of non-domestic wastewater using bacteria for the removal of heavy metals is currently one of the most cost-effective alternatives. The plant-bacteria symbiosis is a relevant method in the accumulation of heavy metals in wetlands. Microbial bioremediation, exemplified by strains such as *Rheinheimera tangshanensis* and *Bacillus* in mercury adsorption, highlights the significant influence of microbiological and environmental factors in sustainable treatment designs. This approach emerges as a crucial solution to address the issue of heavy metals in industrial wastewater, emphasizing the need to consider microbiological and environmental aspects in these strategies. Research supports the effectiveness of this methodology, paving the way for more efficient and environmentally friendly solutions. Relevant references support this information.

This study will assess the efficiency of heavy metal removal through bacteria in non-domestic wastewater treatments in the mining sector, aiming to provide a technical tool to guide the use of bacteria.

* Degree work: Efficiency of heavy metal removal by bacteria in the treatment of non-domestic wastewater from mining processes

** Science Faculty. Chemistry School. Specialization in Environmental Chemistry. Director: Yaneth Quintero López. Master in Chemistry

INTRODUCCIÓN

A nivel global, la producción de carbón supera los 4.030 millones de toneladas, evidenciando un aumento del 38% en las últimas dos décadas. Este incremento se ha concentrado en Asia, mientras que en países europeos se ha observado una disminución significativa. China, EE.UU., India, Australia y Sudáfrica, se destacan como los cinco principales productores de carbón en el mundo. El carbón, es el segundo recurso natural no renovable después del petróleo, desempeña un papel crucial en procesos tecnológicos e industriales, siendo vital para el sustento económico y el desarrollo de naciones a nivel mundial

El sector minero en Colombia es una actividad económica muy importante, pero su desarrollo ha tenido como consecuencia la generación de aguas residuales no domésticas altamente contaminadas con metales pesados (Veiga & Marshall, 2019). Estos residuos tóxicos se vierten sin tratamiento adecuado a cuerpos de agua receptores, como ríos y lagos, generando consecuencias ambientales tales como: la muerte de diversas especies de plantas y animales acuáticos, la desaparición de ecosistemas enteros, problemas de salud pública; por lo tanto, la exposición a altas concentraciones de metales pesados como plomo, mercurio, cadmio y arsénico; puede tener efectos adversos en la salud humana. (Ariza et al., 2020; Prieto et al., 2022) (Ariza et al., 2020; Prieto et al., 2022). Metales pesados contenidos en las aguas residuales no domésticas son ingeridos por peces y otros organismos acuáticos. Estos metales se acumulan en los tejidos de los peces, generándose la bioacumulación por metales (Vélez et al., 2021; Vélez-Torres & Méndez, 2022).

La supervisión y regulación de las operaciones mineras y el tratamiento de aguas residuales suelen ser responsabilidad de las autoridades ambientales. Sin embargo, debido a factores como la escasez de recursos y la falta de conciencia ambiental, a menudo hay deficiencias en el seguimiento y control de las actividades mineras y en la gestión de sus residuos. Aunque se ha demostrado que el uso de bacterias y otros microorganismos es prometedor para la eliminación de metales pesados en el tratamiento de aguas residuales, su aplicación en el sector minero colombiano es limitada o prácticamente inexistente (Cordero et al., 2010; Mao et al., 2021; Martínez Meza et al., 2017). La falta de investigación y desarrollo en esta área restringe la implementación de tecnologías más sostenibles y eficaces para reducir la contaminación de los cuerpos de agua receptores por metales pesados.

El tratamiento de aguas residuales es un problema ambiental importante, especialmente en sectores industriales como la minería, que generan grandes volúmenes de aguas residuales contaminadas con compuestos tóxicos y metales pesados. (Bydalek et al., 2023). Estas aguas residuales no domésticas requieren métodos especiales de tratamiento y desinfección, y las bacterias juegan un papel fundamental en este proceso ((Mateos et al., 2016; Maziotis et al., 2023).

El tratamiento de aguas residuales no domésticas en el sector minero está diseñado para eliminar o reducir en gran medida los contaminantes presentes para que el agua pueda devolverse al medio ambiente de manera segura y sostenible o reutilizarse en los procesos mineros (Abu Tawila et al., 2019; Alvillo-Rivera et al., 2022). En el sector minero se han desarrollado diversas tecnologías biológicas para la depuración de aguas residuales contaminadas, y el manejo de diferentes tipos de bacterias ha demostrado ser una opción eficaz y sostenible (Singh et al., 2021; Somani et al., 2023).

Las bacterias cuentan con la facultad de descomponer y transformar los contaminantes presentes en las aguas residuales, lo que contribuye a la reducción de la carga contaminante antes de ser liberadas al ambiente (Gill et al., 2023; Golab et al., 1995) La capacidad de ciertos microorganismos para

descomponer compuestos tóxicos, transformándolos en productos más simples, revela una variabilidad intrínseca basada en sus requerimientos de oxígeno. En el ámbito de las actividades mineras, se destaca el empleo estratégico de bacterias aeróbicas para la degradación de compuestos orgánicos, como los hidrocarburos. En contraste, las bacterias anaeróbicas demuestran una eficiencia sobresaliente en la eliminación de contaminantes inorgánicos, tales como metales pesados y sulfatos, presentes en las aguas residuales asociadas al sector minero. Este grupo microbiano desempeña un papel crucial, metabolizando compuestos sin la presencia de oxígeno, lo que contribuye de manera significativa a la depuración de aguas residuales mineras. (Gawali Ashruta et al., 2014; Gerber et al., 2016).

La descarga de metales pesados provenientes de diversas industrias, como minería, fundición, revestimiento de metales y procesamiento de minerales, plantea riesgos significativos para la salud humana, la fauna y el entorno ambiental.

Existen varios procesos para eliminar metales pesados del agua, incluyendo precipitación química, intercambio iónico, filtración por membrana, floculación, electrodiálisis, nanotecnología de carbono y adsorción. Sin embargo, muchos de estos métodos son costosos e ineficientes para concentraciones inferiores a 100 mg/L, generando residuos secundarios y aumentando el impacto ambiental (Balaji et al., 2015; Thakur et al., 2015).

En el caso específico de la eliminación de cromo, la coagulación-precipitación y la adsorción se han identificado como los métodos más eficaces, sin embargo, la eliminación de lodos representa un inconveniente significativo en estos procesos (Castro et al., 2022). El Mercurio, Plomo y Cadmio, conocidos como "los tres grandes", tienen un impacto sustancial en el medio ambiente. El Plomo, utilizado en diversas industrias, presenta riesgos a través de rutas de exposición como aire, agua, suelo y alimentos contaminados (Kumari et al., 2017).

El Mercurio, por su parte, es un metal pesado tóxico de origen natural, con propiedades volátiles y es una amenaza global. Las descargas industriales contienen Hg (II), que se acumula en el medio ambiente, afectando la salud humana, principalmente los riñones, y contribuyendo a enfermedades autoinmunes (Gallo Corredor et al., 2021).

La eficiencia de los sistemas de tratamiento de aguas residuales no domésticas es fundamental para garantizar la protección del medio ambiente y la salud pública (Northey et al., 2023). La necesidad de un tratamiento adecuado de las aguas residuales no domésticas se relaciona con contaminantes tóxicos, persistentes o biodegradables, y que, si no se tratan adecuadamente, pueden afectar de forma negativa el medio ambiente y la calidad del agua (Qiu et al., 2016; Wang et al., 2023).

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

1.1 Planteamiento del problema

El sector minero en Colombia ostenta una relevancia significativa en términos de actividad económica, si bien su expansión ha conllevado a la generación de aguas residuales no domésticas con elevados niveles de contaminación, especialmente por metales pesados. La descarga inapropiada de estos residuos tóxicos en cuerpos de agua receptores, tales como ríos y lagos, ha desencadenado consecuencias ambientales adversas, incluyendo la extinción de diversas especies acuáticas y la perturbación de ecosistemas completos, así como amenazas a la salud pública. La exposición a concentraciones elevadas de metales pesados, como Plomo, Mercurio, Cadmio y Arsénico, puede tener efectos perjudiciales para la salud humana (Javanbakht et al., 2014; Joshi, 2017; Zhang, Q. & Wang, 2020).

La presencia de metales pesados en las aguas residuales no domésticas es absorbida por organismos acuáticos, especialmente peces; desencadenando el proceso de bioacumulación en sus tejidos a través de la alimentación y la ingesta de agua contaminada (Dhir, 2018; Gao et al., 2018). Aunque las autoridades ambientales son responsables de la supervisión y regulación de las operaciones mineras, así como del tratamiento de las aguas residuales, diversos obstáculos como la escasez de recursos y la falta de conciencia ambiental generan deficiencias en el seguimiento, control y gestión adecuada de estas actividades y sus desechos.

El uso de bacterias y otros microorganismos para el tratamiento de aguas residuales se ha mostrado prometedor en la eliminación de metales pesados, su aplicación en el sector minero en Colombia es escasa (Mustapha & Halimoon, 2015; Tabak et al., 2005) La falta de investigación y

desarrollo en esta área limita la aplicación de tecnologías más sostenibles y eficaces para reducir la contaminación de los cuerpos de agua receptores por metales pesados

1.2 Justificación

La implementación de tratamientos biológicos basados en bacterias para la eliminación de metales pesados en aguas residuales se justifica en respuesta a la creciente preocupación ambiental y los riesgos asociados con la presencia de estos elementos en dichas aguas. Esta estrategia se fundamenta en la capacidad única de ciertos microorganismos para metabolizar y reducir eficazmente la concentración de metales pesados, contribuyendo así a la mitigación de la contaminación ambiental.

Existen diversas modalidades de tratamientos biológicos, como la bioprecipitación, la biosorción y la bioacumulación, que aprovechan las propiedades de ciertos microorganismos para adsorber, precipitar o acumular metales pesados. La bioprecipitación, por ejemplo, induce la formación de precipitados insolubles, facilitando la posterior separación de los metales del agua residual. En cambio, la biosorción se centra en la capacidad de las bacterias para adsorber metales en sus superficies celulares, y la bioacumulación implica la acumulación de metales dentro de los microorganismos a concentraciones superiores a las del entorno circundante. La identificación precisa de bacterias en el tratamiento de aguas residuales de procesos mineros es crucial en ingeniería química y tratamiento ambiental. La presencia de bacterias específicas puede impactar la eficacia del tratamiento al degradar compuestos tóxicos, reduciendo así la contaminación. La utilización de técnicas avanzadas como la secuenciación de ADN permite caracterizar la diversidad bacteriana, facilitando la optimización de procesos biológicos en plantas de tratamiento.

Desde una perspectiva normativa, la identificación de bacterias se alinea con estándares colombianos y normativas internacionales, asegurando el cumplimiento de regulaciones ambientales. Este enfoque no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también refleja la

responsabilidad ambiental en las operaciones mineras. El estudio propuesto busca determinar el sistema de tratamiento más eficiente para la eliminación de metales pesados, enfocándose en el uso de bacterias como agentes bio-remediadores. Dada la preocupación ambiental por los metales pesados, los enfoques biológicos emergen como opciones sostenibles capaces de abordar la complejidad de la contaminación metalúrgica.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

- Evaluar la eficiencia en la eliminación de metales pesados por medio de bacterias en tratamientos de aguas residuales no domesticas del sector minero

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificación de los diferentes tipos de bacterias utilizadas en el tratamiento de aguas residuales generadas en procesos mineros
- Establecer los diferentes tipos de tratamientos de aguas residuales que usan bacterias para la eliminación de metales pesados
- Determinar el sistema de tratamiento más eficiente para la eliminación de metales pesados mediante el uso bacterias

2. MARCO TEÓRICO

Las aguas residuales no domésticas son las resultantes de actividades industriales, comerciales o agrícolas, excluidas las producidas en los hogares. En la minería, este efluente se genera en varias etapas del proceso de extracción, como extracción, trituración, molienda, lixiviación y separación de minerales (Shi et al., 2013). Debido a la ocurrencia natural de estos elementos en los yacimientos minerales y la liberación de compuestos químicos durante las operaciones de procesamiento, estas aguas pueden contener altas concentraciones de sustancias tóxicas y metales pesados (Pu et al., 2022).

La presencia de metales en las aguas residuales de la minería es una gran preocupación debido a la toxicidad de muchos de estos elementos. Los metales pesados comunes incluyen plomo, mercurio, cadmio, zinc, cobre, arsénico y níquel, entre otros ((Javanbakht et al., 2014; Jayapal et al., 2022) Estos metales pueden ser altamente tóxicos para la vida acuática y la salud humana incluso en bajas concentraciones.

La gestión efectiva de la eliminación de metales de las aguas residuales y desechos industriales desempeña un papel fundamental en la prevención de la contaminación ambiental y la salvaguarda de la salud humana. Entre las metodologías actuales para la remoción de metales pesados, se incluyen los tratamientos químicos (precipitación química e intercambio iónico), tratamientos físicos (separación y filtración de sólidos) y tratamientos biológicos (microorganismos, lodos activos, filtros percoladores, biodigestión anaerobia y lagunas aireadas). Estos métodos abarcan tanto sistemas de tratamiento anaeróbicos como aeróbicos, destacando su diversidad y relevancia en la mitigación de impactos ambientales y la protección de recursos hídricos. (Sher et al., 2020).

2.1 Tratamientos Físicos

Los tratamientos físicos, segmento fundamental en el ámbito del tratamiento de aguas residuales, se caracterizan por la aplicación de procesos de separación física, principalmente dirigidos a sólidos. Estos métodos hallan su eficacia en propiedades físicas específicas de los contaminantes, como la viscosidad, tamaño de partículas y flotabilidad. Dentro de esta categoría, destacan técnicas como el tamizado, la precipitación, así como la separación y filtración de sólidos (Wu et al., 2012; Yu et al., 2020).

2.2 Tratamientos Químicos

Los métodos de tratamiento químico, vinculados a las propiedades químicas de contaminantes o reactivos, constituyen una faceta esencial en la purificación del agua. Entre estas estrategias, se destacan la eliminación de hierro y oxígeno, la supresión de fosfatos y nitratos, la coagulación, procesos electroquímicos, oxidación e intercambio de iones (Van Der Wal et al., 1997).

2.3 Tratamientos Biológicos

Los métodos de tratamiento biológico se basan en procesos biológicos para la eliminación de contaminantes coloidales. Microorganismos desempeñan un papel crucial al actuar sobre la materia en suspensión y transformarla en sólidos sedimentables. Estos procesos pueden ser aeróbicos o anaeróbicos e incluyen técnicas como lodos activos, filtros percoladores, biodigestión anaerobia y lagunas aireadas (Tak et al., 2013).

2.4 Sistema De Tratamiento Anaeróbico

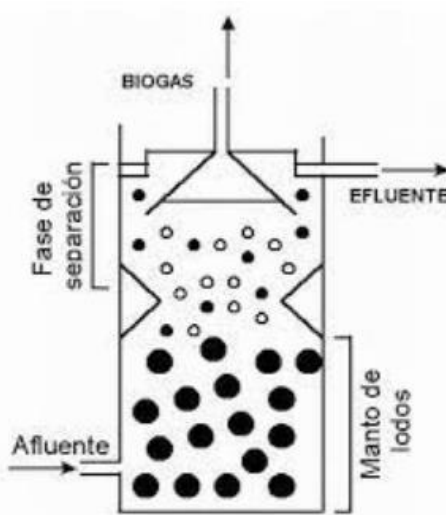
Los sistemas de tratamiento anaeróbico dependen de la actividad microbiana en ausencia de oxígeno para descomponer los contaminantes orgánicos en las aguas residuales (Yang et al., 2022). Este sistema es eficiente en la remoción de materia orgánica y la producción de subproductos como el biogás,

que puede ser utilizado como fuente de energía (Curiel-Alegre et al., 2022). Dentro de estos sistemas de tratamiento se encuentran:

- **Reactor anaeróbico de flujo superior (RAFA):** Este es uno de los sistemas más utilizados en el tratamiento de aguas residuales. En este sistema, las aguas residuales se dirigen a un tanque o reactor donde los microorganismos anaeróbicos descomponen los contaminantes orgánicos en productos más simples, como el metano y el dióxido de carbono (Ezzatahmadi et al., 2017; Fachini et al., 2021).
- **Reactor anaerobio de manto de lodos (UASB):** Este sistema utiliza un lecho de lodos o lodos granulares suspendidos en el reactor. Los microorganismos presentes en los lodos descomponen la materia orgánica, produciendo biogás. El lodo granular permite una alta concentración de microorganismos y mejora la eficiencia del proceso, este proceso se observa en la Figura 1. (Intanoo et al., 2016; Kalpana et al., 2018).

Figura 1

Esquema general de un reactor UASB.



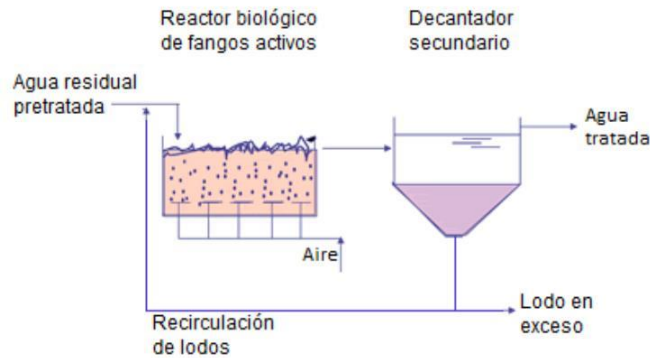
Nota: La imagen muestra el esquema general de un reactor UASB. Tomada de: Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA's o UASB) 2011: Revisión sistémica (p.20), por SSWM (2011).

- ***Filtro anaeróbico de flujo ascendente (FAFA):*** En este sistema, las aguas residuales fluyen a través de un medio poroso, como la grava, en presencia de microorganismos anaeróbicos. Los contaminantes orgánicos se descomponen cuando el agua pasa a través del medio filtrante. Esto es útil para tratar aguas residuales con altas concentraciones de sólidos en suspensión (Ravikumar et al., 2017; Rekha & Lokeshappa, 2020)

2.5 Sistema De Tratamiento Aeróbico

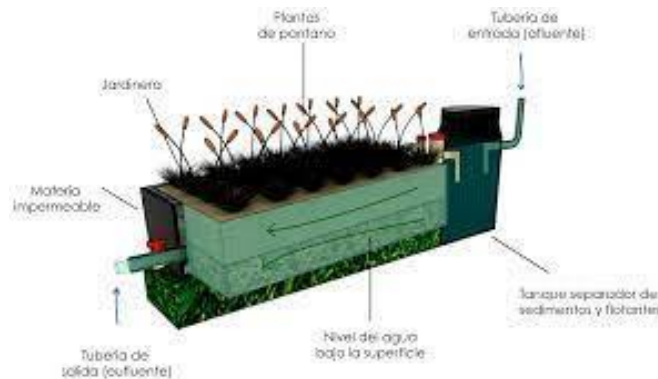
Los sistemas de tratamiento aeróbico utilizan oxígeno para permitir la actividad de los microorganismos aeróbicos que descomponen y eliminan los contaminantes orgánicos presentes en las aguas residuales. Este sistema es eficaz en la eliminación de materia orgánica, nutrientes y compuestos nitrogenados (Mishra et al., 2023).

- ***Lodos activados:*** Consiste en un tanque o reactor donde se mezclan aguas residuales con lodos activados, que es una mezcla de microorganismos aerobios. El oxígeno es suministrado por la aireación y los microorganismos descomponen los contaminantes orgánicos. Luego, el lodo se separa del agua y se recircula para mantener la actividad microbiana (Ma et al., 2021; Maarroof & Dursun, 2018).

Figura 2*Esquema general de lodos activados*

Nota: La imagen muestra el esquema general Lodos activados. Tomada de: CBR Ingeniería Expertos en el tratamiento del agua (2022)

- **Biofiltros:** Los biofiltros son sistemas en los que las aguas residuales pasan a través de un medio poroso, como grava o virutas de madera, al que se adhieren microorganismos aerobios. A medida que el agua fluye a través de los medios, los microorganismos descomponen los contaminantes orgánicos. El oxígeno requerido puede ser suministrado por aireación o por un difusor de oxígeno (Chen et al., 2019; Das et al., 2006; Mahapatra et al., 2022).

Figura 3*Esquema general de Biofiltro*

Nota: La imagen muestra el esquema general de los Biofiltros. Tomada de: Ecotec.Unam.Mx/Biofiltros (2022)

- **Laguna de estabilización:** Consiste en lagunas poco profundas donde las aguas residuales se almacenan por un período de tiempo, lo que permite la descomposición aeróbica. La luz del sol promueve la fotosíntesis de los microorganismos y ayuda en el proceso de curación (Das et al., 2006; Mahapatra et al., 2022).

Eficiencia de sistemas de tratamiento

La eficiencia del sistema de tratamiento se mide por la capacidad de eliminar una alta proporción de metales pesados presentes en el agua residual. Es importante evaluar cómo diferentes factores, como la concentración inicial de metales, el tipo de proceso de tratamiento y las condiciones operativas, afectan la eficiencia general del sistema, es decir, se deben controlar parámetros como parámetros como el pH, la temperatura, la concentración de metales y otros contaminantes, el tiempo de residencia y la velocidad de flujo para asegurar la máxima remoción de metales pesados (Arcentales-Ríos et al., 2022; Aryal & Liakopoulou-Kyriakides, 2015).

2.6 Normativa Colombiana para vertimientos

La Resolución número 0631 del 17 de marzo de 2015 se erige como una piedra angular en la gestión ambiental de Colombia al focalizarse en la reducción del aporte de sustancias contaminantes a los cuerpos de agua. Este análisis crítico examina detalladamente los aspectos más relevantes de esta normativa, con énfasis en su impacto en el control de vertimientos y la mejora consiguiente en la calidad de los mismos.

2.6.1 Marco Regulatorio

La resolución, que modifica el decreto 1594 de 1984 y reglamenta el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010, establece parámetros específicos para ocho sectores productivos, abarcando 73 actividades prioritarias. La normativa, al delimitar claramente las aguas residuales domésticas (ARD) y las aguas residuales no domésticas (ARnD), proporciona una guía crucial para los usuarios en términos de cumplimiento.

2.6.2 Parámetros Establecidos

Un punto central de la resolución radica en la definición de 56 parámetros que las actividades industriales, comerciales y de servicios deben cumplir. Estos parámetros, expresados en concentraciones máximas permisibles (mg/L), representan un cambio significativo respecto al antiguo enfoque basado en carga contaminante vertida (kg/día) del Decreto 1594 de 1984. Esta actualización refleja un avance hacia mecanismos de medición más precisos y directos en el control de vertimientos.

2.6.3 Implicaciones para la Industria:

Es imperativo que los industriales comprendan los cambios introducidos por la resolución publicada el 18 de abril de 2015. El desconocimiento de estos nuevos parámetros de medición podría resultar en sanciones, lo que subraya la importancia de la familiaridad y el cumplimiento riguroso de la normativa. La supervisión constante por parte de las autoridades ambientales no solo tiene un enfoque reactivo sino también preventivo. Buscan prevenir posibles impactos negativos en el medio ambiente al garantizar que las actividades generadoras de vertimientos cumplan con los estándares establecidos. Además, tienen la facultad de imponer sanciones en caso de incumplimiento, fortaleciendo así la aplicación efectiva de la Resolución 0631.

3. METODOLOGÍA

Como parte inicial de la investigación se desea profundizar en las investigaciones realizadas durante los últimos 10 años sobre los sistemas de tratamiento de aguas residuales y los estudios realizados sobre el tema. Este análisis se realiza mediante la utilización de las bases de datos disponibles en la Universidad Industrial de Santander, destacándose la base de datos Scopus de Elsevier como referencia principal. Scopus, reconocida por proporcionar soluciones avanzadas en investigación abstracta e indexada a nivel académico, ofrece herramientas que facilitan el análisis del comportamiento de las publicaciones.

Con el objetivo de abordar los aspectos de mayor relevancia en esta investigación, se plantean las siguientes ecuaciones de búsqueda, basadas en términos clave que encapsulan las dimensiones esenciales del fenómeno en cuestión. Este enfoque busca garantizar una cobertura exhaustiva y precisa de la literatura científica disponible.

Tabla 1

Ecuaciones de búsqueda

Nº	Ecuación
1	(TITLE-ABS-KEY(Mining processes, wastewater treatment, bacteria))
2	(TITLE-ABS-KEY("wastewater treatments" AND "removal of heavy metals"))

Nota: La tabla muestra las ecuaciones de búsqueda utilizadas para el desarrollo del trabajo

La estructura de las ecuaciones de búsqueda se focaliza en los tres ejes fundamentales de la investigación: " bacteria" " wastewater treatment " y " Mining processes ", con el objetivo de discernir aquellas publicaciones que establezcan una conexión entre la eliminación de metales pesados por medio

de bacterias en tratamientos de aguas residuales no domesticas del sector minero. Para lograr una cobertura más amplia en el análisis, se incorpora el carácter () en el término " wastewater treatment ", con la intención de abarcar diversas variaciones de este concepto en la búsqueda bibliográfica.

La cantidad total de resultados derivados de ambas ecuaciones se presenta en la Tabla 2, abarcando una diversidad de fuentes como artículos, revisiones y libros. Este estudio de búsqueda se lleva a cabo en un intervalo temporal de los últimos 10 años (2013-2023). Además, se restringe a las áreas de interés pertinentes para la investigación: Environmental Science, Engineering, Chemical Engineering.

Tabla 2

Número de artículos encontrados con las ecuaciones

Base De Datos	Scopus
Resultados Encontrados	230

Nota: Total de artículos encontrados en la base de datos Scopus

Luego de la aplicación de los filtros, se identifica un número sustancial de documentos que abordan la temática de investigación. A través del empleo del software VOSviewer, se procede a expandir el análisis, brindando una visión más detallada. Este análisis adicional tiene como objetivo examinar las tendencias de publicación a nivel global, considerando campos bibliográficos tales como autores destacados, países de origen, palabras clave relevantes y distribución temporal por años de publicación.

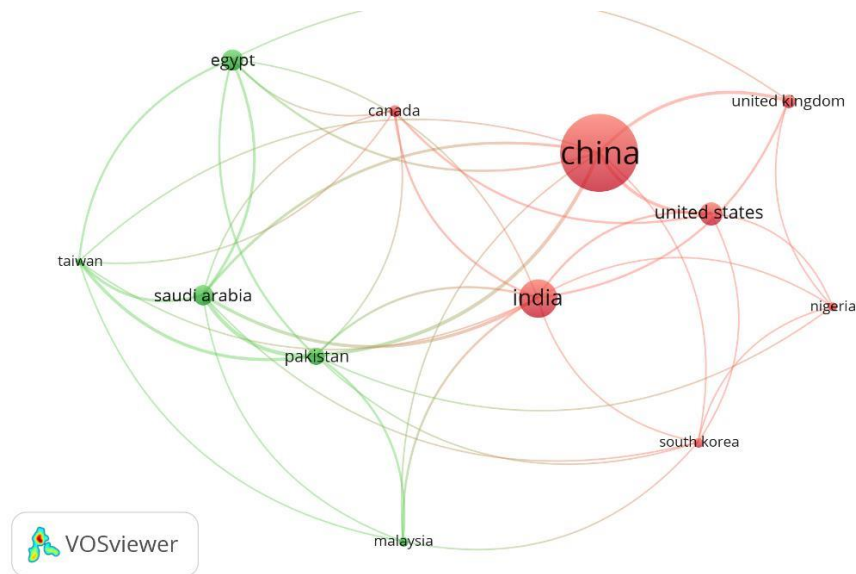
En la representación gráfica presentada en la Figura 4, se exhibe el mapa que detalla los países con mayor prevalencia en la generación de publicaciones relacionadas con el ámbito del tratamiento de aguas residuales no domésticas. En este contexto, destaca la destacada participación de Pakistán y

Arabia Saudita en las investigaciones pertinentes. Es pertinente subrayar que Pakistán no solo encabeza la lista en términos de volumen de documentos y citas, sino que también evidencia una considerable fuerza de enlace con diversas naciones, incluyendo, pero no limitándose a, China, India, Taiwán, Egipto, Estados Unidos, Canadá, entre otros.

Por otra parte, la Tabla 3 proporciona una clasificación detallada de los países según la cantidad de documentos publicados, el número de citas obtenidas y la fuerza de enlace manifestada en sus relaciones internacionales. Esta información aporta una visión más precisa y cuantitativa de la contribución de cada país en el panorama de la investigación sobre tratamientos de aguas residuales no domésticas.

Figura 4

Mapa de coautoría por países



Nota: La figura muestra los países con mayor impacto. Tomado: se realizó en el programa VOSviewer

Tabla 3

Clasificación de citas por países

Países	Documentos	Citaciones	Fuerza Total De Enlace
Pakistán	13	325	24
Arabia Saudita	15	711	22
China	67	2164	21
India	31	786	18
Taiwán	5	230	13
Egipto	16	759	12
Estados Unidos	18	657	10
Canadá	8	423	8
Malasia	7	214	8
Reino Unido	10	314	8
Sur Corea	7	219	7
Nigeria	6	190	5

Nota: *Adaptado de los datos obtenidos por el software VOSviewer

Asimismo, en la Figura 5 se lleva a cabo un análisis de co-ocurrencia en los documentos seleccionados, el cual contrasta las palabras clave asociadas al tema en cuestión, aquellas referenciadas por los autores, las palabras indexadas por las revistas en el proceso editorial y los años con mayor número de publicaciones. Como resultado de este análisis, se identificaron 9 palabras significativas entre los documentos, las cuales se detallan a continuación.

puntos específicos donde se generan estas aguas residuales para comprender mejor los desafíos ambientales.

Finalmente, se revisará la normatividad ambiental vigente relacionada con el sector minero y el tratamiento de ARnD. Esto permitirá evaluar cómo se están abordando actualmente los problemas relacionados con la contaminación por metales pesados en el país y cómo se regulan los sistemas de tratamiento. Esta comparación puede revelar la eficacia de diferentes tecnologías y proporcionar información valiosa para futuras investigaciones. Con base a los resultados se procederá a analizarlos y extraer conclusiones significativas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La minería, una actividad económica ancestral, ha evolucionado significativamente desde las herramientas manuales hasta la implementación de tecnologías avanzadas. Este proceso ha permitido una explotación técnica, económica, social y ambientalmente responsable, estableciendo así la base para una minería sostenible (Sánchez-Castro et al., 2021). La extracción y explotación de minerales, junto con la agricultura, forman los pilares más antiguos de la sociedad, siendo esenciales para su funcionamiento (Pat-Espadas et al., 2018).

De acuerdo con la investigación de Poirier, los minerales, fundamentales para la vida humana, desempeñan un papel crucial en diversos aspectos. Desde su presencia en los alimentos hasta su aplicación en productos comerciales, los minerales son un recurso estratégico de gran importancia económica. Además, el cuerpo humano requiere minerales para su funcionamiento, lo que resalta aún más la relevancia de la minería en nuestra vida diaria (Poirier et al., 2023).

En el contexto colombiano, el sector minero abarca la producción de diversos minerales, como el carbón, mineral de níquel, hierro, cobre, metales preciosos (oro, plata, platino), esmeraldas y materiales para la industria y la construcción. El desarrollo de esta actividad sigue un proceso definido, desde la exploración hasta el cierre y abandono, según lo establecido en la Ley 685 de 2001, el Código de Minas.

Por otro lado, la industria minero-energética despliega un impacto sustancial en la economía colombiana, representando el 7% del Producto Interno Bruto (PIB) nacional. Su contribución se refleja en el 33% de la inversión extranjera, el 56% de las exportaciones y la generación de más de 500,000 puestos de trabajo formales. En el año 2021, este sector aportó aproximadamente \$8.8 billones de pesos en regalías, siendo el 26% proveniente de la minería y el 74% de los hidrocarburos.

En el marco del Decreto 1666 de 2016, el sector minero se clasifica en minería de subsistencia, minería en etapa de explotación y minería en etapa de exploración, o construcción y montaje, subdividida en pequeña, mediana y de gran escala, reflejando los esfuerzos del país por abordar las distintas dimensiones de esta industria. Este enfoque permite una gestión más eficiente y adaptada a las características específicas de cada segmento.

La problemática de la minería ilegal en Colombia presenta desafíos significativos en términos de control ambiental, así como infracciones a normativas laborales, sociales, tributarias, técnicas y ambientales. Esta actividad informal y no regulada contribuye al agotamiento de recursos y plantea riesgos considerables (Li et al., 2018).

Dos sectores destacados en la contribución a la contaminación por metales pesados, no solo en Colombia sino a nivel global, son la actividad industrial y la actividad minera. Estas prácticas aportan cantidades significativas de estos elementos al medio ambiente, generando preocupación (Truu et al., 2015). En el caso específico de Colombia, a pesar de contar con una extensa red de fuentes hídricas, se ha observado una preocupante generación de contaminación por mercurio. En el año 2010, el país llegó a ocupar el segundo lugar a nivel mundial en la generación de este metal pesado, principalmente debido a su uso irresponsable en la explotación de minería artesanal de oro, con una extracción de 36,9 toneladas de oro en el año 2011 (Poirier et al., 2023)

En el contexto actual, la contaminación ambiental se erige como uno de los desafíos más destacados que afectan a la sociedad del siglo XXI. La degradación de la calidad del aire, del recurso hídrico y de los suelos destinados a actividades agrícolas ha experimentado un aumento exponencial (Yaqub & Lee, 2019; Zong et al., 2023). La tasa de contaminación del agua, estimada en 2000 millones de metros cúbicos diarios, refleja una crisis inminente que podría comprometer la realización de los Objetivos de Desarrollo del Milenio de la Organización de Naciones Unidas (ONU) (ONUDAES, 2005-

2015). En septiembre de 2015, la Asamblea General de la ONU estableció como objetivo prioritario "asegurar la disponibilidad y la gestión sostenible de agua y saneamiento para todos".

Según lo señalado por Yaqub & Lee, en el caso específico de las aguas subterráneas, los impactos suelen ser más significativos, especialmente debido a afectaciones químicas derivadas del vertido de desechos líquidos y sólidos generados por actividades mineras, tales como aguas ácidas, hidrocarburos y aceites de equipos. La magnitud de estos impactos se incrementa con la permeabilidad del suelo, la profundidad de los niveles freáticos y la presencia o ausencia de medidas de recubrimientos naturales o artificiales que aislen los desechos y materiales contaminantes generados por la actividad minera. (Yaqub & Lee, 2019)

Los efectos derivados de la actividad minera se consideran con implicaciones a mediano plazo y abarcan diversas etapas del proceso, desde la exploración hasta la cianuración para la extracción del mineral (Javanbakht et al., 2014) (Pat-Espadas et al., 2018; Zhang, J. et al., 2022) Algunos de los efectos más representativos incluyen:

- Alteraciones fisicoquímicas en la calidad del agua, destacando el incremento en la turbidez debido al vertimiento de aguas residuales mineras y la acidificación por aportes químicos en diversas fases del proceso (Zhang, Q. & Wang, 2020).
- Cambios en la dinámica de los cuerpos de agua superficiales, así como su interacción con las aguas subterráneas y los procesos de recarga.
- Sedimentación de los cuerpos de agua con posibilidad de taponamiento de los cauces.
- Disminución de la cantidad del recurso hídrico disponible, limitando su aprovechamiento en otros usos.
- Limitación en la capacidad de autodepuración de los cuerpos de agua.

En el caso de las aguas superficiales, el impacto directo de la actividad minera se manifiesta en cuerpos de agua loticos, donde pueden observarse cambios en el curso de los cauces, rectificación de los mismos y modificaciones en el perfil natural de los ríos

De acuerdo con la investigación de Zhang los elementos metálicos, al encontrarse en ecosistemas acuáticos a concentraciones ínfimas, son conocidos como elementos traza. Algunos de estos elementos, como Mn (Manganeso), Mo (Molibdeno), Cu (Cobre), Co (Cobalto), Zn (Zinc), Sc (Escandio) y V (Vanadio), son esenciales como micronutrientes para plantas y animales. Sin embargo, otros elementos como Ni (Níquel), Sn (Estaño) y Cr (Cromo) son esenciales únicamente para los animales (Poirier et al., 2023; Zhang, J. et al., 2022). Cuando estos elementos trazas, superan ciertos niveles debido a desequilibrios naturales o intervenciones antropogénicas, pueden volverse tóxicos para los organismos vivos (Hossain et al., 2018).

El término "metales pesados" se refiere a aquellos que, debido a su toxicidad, causan impacto ambiental (Qin et al., 2020). Estos metales, con una densidad superior a 6 g/cm³ (excepto Ti y As), son liberados en ambientes acuáticos y terrestres principalmente por actividades industriales (Bazrafshan et al., 2015). En el medio hidrosférico, se estima que alrededor de 109 Kg/año de metales traza, como Mn, Zn, Cr, Pb, Ni, Cu, Se, As, Sb, V, Mo, Cd y Hg, son vertidos, siendo las aguas residuales no domésticas, plantas térmicas, fundiciones y acerías las fuentes predominantes (Fu & Wang, 2011; O'Connell et al., 2008).

La toxicidad de los metales pesados está intrínsecamente relacionada con su movilidad en el medio ambiente. Esta movilidad, a su vez, depende de su especiación química, persistencia y su tendencia a acumularse o bioacumularse (Malik et al., 2017). La Tabla 4 presenta los síntomas típicos de intoxicación, dosis letal en la dieta humana y los niveles de contaminación máximos (NCM) según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) (Yaqub & Lee, 2019) y la

legislación colombiana a través del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible para algunos metales pesados.

Tabla 4

Síntomas de la intoxicación típicos y los niveles de contaminación máximos

Metal	Toxicidad	Dosis Letal En Dieta Humana mg/día	Ncm (mg/L)	
			Usepa	Colombia
As	Manifestaciones Cutáneas, Cánceres Viscerales, Enfermedad Vascular	50-340	0.05	0.1-0.5
Cd	Daño Renal, Trastorno Renal Y Efectos Cancerígenos	1.5-9	0.01	0.1
Cr	Dolor De Cabeza, Vómitos, Carcinógeno	3-8	0.05	0.5
Cu	Insomnio, Afectaciones Hepáticas Y Enfermedad De Wilson	175-250	0.25	1
Ni	Asma Crónico, Tos, Dermatitis Y Cáncer	-----	0.2	0.5
Zn	Signos Neurológicos, Afectaciones Al Sistema Nervioso Y Depresión	6	0.8	3
Pb	Enfermedades Vasculares, Renales Y Neuronales	10	0.006	0.2

Nota: La tabla muestra los síntomas de la intoxicación típicos y los niveles de contaminación máximos. Tomado de Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2023)

La problemática de la contaminación ambiental por metales pesados se caracteriza por su efecto silencioso, dado que no es perceptible a simple vista, lo que dificulta la identificación oportuna de los daños, representando así riesgos para la salud (Mendoza-Castillo et al., 2015) . A pesar de los esfuerzos realizados para mitigar este problema, su implementación ha resultado desafiante en algunos países

industrializados, ya que requiere una colaboración efectiva entre el gobierno, la sociedad civil y el sector privado (Wang et al., 2023).

La Resolución 0631 de 2015, en su ARTÍCULO 10, presenta una detallada especificación de los parámetros fisicoquímicos que deben ser monitoreados, junto con sus respectivos valores límites máximos permisibles, en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas (ARnD) a cuerpos de aguas superficiales derivados de actividades mineras.

La normativa establece una lista exhaustiva de parámetros fisicoquímicos cruciales que deben ser objeto de monitoreo riguroso. Estos parámetros abarcan desde características básicas como la temperatura y el pH, hasta componentes más específicos como metales pesados, sustancias orgánicas y nutrientes. Como se muestra en las tablas 5 y 6 se establecen límites permisibles de metales pesados y metaloides para actividades de extracción de carbón de piedra y lignito, extracción de minerales de hierro, extracción de oro y otros metales preciosos extracción de minerales de níquel y otros minerales metalíferos no ferrosos y extracción de minerales de otras minas y canteras.

Tabla 5

Valores límites máximos permisibles-Metales y Metaloides

Parámetro	Unidades	Extracción De Carbón De Piedra Y Lignito	Extracción De Minerales De Hierro	Extracción De Oro Y Otros Metales Preciosos
Arsénico (As)	mg/L	0,10	0,10	0,10
Cadmio (Cd)	mg/L	0,05	0,05	0,05
Cinc (Zn)	mg/L	3,00	3,00	3,00
Cobre (Cu)	mg/L	1,00	1,00	1,00
Cromo (Cr)	mg/L	0,50	0,50	0,50
Hierro (Fe)	mg/L	2,00	2,00	2,00
Mercurio (Hg)	mg/L	0,002	0,002	0,002

Miguel (Ni)	mg/L	0,50	0,50	0,50
Plata (Ag)	mg/L			0,50
Plomo (Pb)	mg/L	0,20	0,20	0,20

Nota: La tabla muestra los valores límites máximos permisibles-Metales y Metaloides. Tomado de Resolución 0631 de 2015 (2015)

Tabla 6

Valores límites máximos permisibles-Metales y Metaloides

Parámetro	Unidades	Extracción De Minerales De Níquel Y Otros Minerales Metalíferos No Ferrosos	Extracción De Minerales De Otras Minas Y Canteras
Aluminio (Al)	mg/L		Análisis y Reporte
Arsénico (As)	mg/L	0,10	0,10
Cadmio (Cd)	mg/L	0,05	0,05
Cinc (Zn)	mg/L	3,00	3,00
Cobre (Cu)	mg/L	1,00	1,00
Cromo (Cr)	mg/L	0,50	0,50
Hierro (Fe)	mg/L	5,00	2,00
Manganeso (Mn)	mg/L		Análisis y Reporte
Mercurio (Hg)	mg/L	0,002	0,002
Molibdeno (Mo)	mg/L		Análisis y Reporte
Níquel (Ni)	mg/L	0,50	0,50
Plata (Ag)	mg/L		0,50
Plomo (Pb)	mg/L	0,20	0,20

Nota: La tabla muestra los valores límites máximos permisibles-Metales y Metaloides. Tomado de Resolución 0631 de 2015 (2015)

Tratamiento de aguas no domésticas

Según el estudio de Jayapal la depuración de aguas residuales constituye un componente esencial en la gestión sostenible del recurso hídrico, dado el crecimiento exponencial de las actividades antropogénicas (Jayapal et al., 2022). Este proceso implica una sucesión ordenada de etapas, cada una diseñada para abordar específicamente ciertos contaminantes presentes en el agua residual. Desde compuestos químicos hasta microorganismos patógenos, la complejidad de los contaminantes demanda una estrategia integral que combine diversas disciplinas científicas (Li et al., 2018).

Los tratamientos biológicos se valen de microorganismos aeróbicos y/o anaeróbicos, cultivables y/o no cultivables, los cuales constituyen consorcios y comunidades microbianas especializadas en diversos tipos de biorreactores (Truu et al., 2015). La remoción de metales pesados por parte de microorganismos, ya sea en entornos naturales o en sistemas de tratamiento abiertos, puede involucrar bacterias, microalgas (especialmente del género *Chlorella*), bacteriófagos y/o protozoos (Mubashar et al., 2020). No obstante, cabe destacar que los protozoos exhiben una notable susceptibilidad ante la presencia de metales pesados, como el zinc y el cobre, por lo que se han empleado como bioindicadores de contaminantes metálicos en el agua. Este fenómeno subraya la importancia de considerar la sensibilidad diferencial de los microorganismos en los procesos de tratamiento biológico, especialmente en relación con la presencia de metales pesados (Poirier et al., 2023).

La simbiosis entre plantas y bacterias rizosféricas ha demostrado ser crucial durante el proceso de biorremediación de aguas acidomineras (ADM) en sistemas de humedales construidos (CW) (Wei et al., 2020). La acumulación de metales pesados por parte de las plantas se ve facilitada por la presencia de bacterias rizosféricas, especialmente aquellas que han desarrollado mecanismos de tolerancia hacia estos metales, estableciendo relaciones desde simbiosis hasta sinergismo (Pat-Espadas et al., 2018).

Las Rizobacterias Promotoras del Crecimiento Vegetal (PGPR) desempeñan un papel fundamental en este proceso al promover el crecimiento de organismos fotosintéticos mediante la secreción de compuestos como el ácido indolacético (IAA), ácido abscísico (AA) y auxinas. Además de actuar como hormonas vegetales, estas bacterias ofrecen protección contra el estrés ambiental y sustancias tóxicas, incluyendo metales pesados (Pashkevich & Korotaeva, 2022). Diversos géneros de bacterias, como *Flavobacterium*, *Klebsella*, *Rhizobium*, *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Actinoplanes*, *Agrobacterium*, *Azotobacter* y *Bacillus*, han sido identificados en diferentes ubicaciones geográficas, los consorcios más comunes se muestran en la tabla 7. (Akkurt et al., 2023).

Tabla 7*Consortio Rizobacterias*

Consortios de algas y bacterias	Tipo de agua	Eficiencia del tratamiento (%)
<i>Chlorella vulgaris</i> y <i>Bacillus licheniformis</i>	Aguas residuales	98.5%
<i>Rhodobacter</i> , <i>Scenedesmus</i> , <i>Alinarimonas</i> , <i>Cecembia</i> , <i>Phreatobacter</i> y <i>Catalinimonas</i>	Aguas residuales	40.84%
Cultivo mixto de <i>Chlorella vulgaris</i> y lodos activados	Aguas residuales	54.9%
Fotobiorreactor algal-bacteriano anóxico y aeróbico	Aguas residuales	87%

Nota: La tabla muestra los consorcios de Rizobacterias.

El desarrollo de microorganismos en forma de biopelícula es una característica destacada en el tratamiento de aguas residuales mediante humedales construidos (CW). La biopelícula, compuesta por un 15% de células bacterianas y un 85% de matriz celular, principalmente sustancias poliméricas extracelulares (EPS), como polisacáridos, proteínas, lípidos y ácidos húmicos, exhibe una capacidad

adsorbente de metales pesados a través de fenómenos superficiales como fuerzas de Van der Waals y quimisorción (Singh et al., 2021) (Zhao et al., 2023).

Esta matriz celular también actúa como un medio donde diferentes especies de células bacterianas, establecen relaciones simbióticas y dependencias a través de canales que permiten el flujo de agua, enzimas y nutrientes. La comunicación entre estas células, regulada por señales químicas llamadas detección de quórum (QS), desencadena cambios en el metabolismo bacteriano, incluyendo mecanismos de desintoxicación de metales pesados (Sanwani et al., 2022).

El mecanismo ampliamente reconocido y estudiado para la eliminación de metales pesados por microorganismos implica la reducción de sulfato (SO_4^{2-}) a sulfuro (S^{2-}) y la subsiguiente precipitación de iones inorgánicos mediada por azufre, destacándose como un proceso fundamental en los humedales artificiales de flujo superficial.

En las investigaciones de Park y Vishan, se analizan las zonas anaeróbicas. El azufre experimenta una reducción a sulfuro de hidrógeno (H_2S), el cual reacciona con los metales pesados, liberando moléculas de hidrógeno y formando sulfuros metálicos (por ejemplo, FeS , ZnS) que precipitan de manera eficiente. La reducción de la acidez en el sistema, derivada de la reducción bacteriana del sulfato a sulfuro, puede inducir una mayor precipitación de metales en forma de hidróxidos (por ejemplo, $\text{Pb}(\text{OH})_3$, $\text{Cd}(\text{OH})_2$) y carbonatos (por ejemplo, MgCO_3) (Vishan et al., 2017) (Park & Chon, 2016).

Los mecanismos de desintoxicación incluyen la reducción de metales pesados a través de enzimas específicas, como la de la mercúrica reductasa para Hg^{2+} y la enzima reductasa para Cr^{6+} . Además, la producción de polipéptidos de politiol por bacterias en ambientes con metales tóxicos, como Cd^{2+} , Ag , Cu y Zn , ha demostrado una eficaz salida de las proteínas que mantiene bajos niveles de toxinas inorgánicas intracelulares.

Es relevante destacar que la tolerancia y desintoxicación de metales pesados a menudo están mediadas por especies bacterianas mutantes, como *Arthrobacter* spp. y *Bacillus* spp., que han incorporado plásmidos de cepas resistentes. Ejemplos específicos incluyen los plásmidos y *Alcaligenes eutrophus*, que confieren resistencia a diversos metales pesados.

Estudios recientes, como el de Simmons et al. (2008), han evidenciado procesos evolutivos rápidos en biopelículas desarrolladas en condiciones de drenaje ácido de mina. La reconstrucción de secuencias de ADN reveló variaciones genómicas en el género *Leptospirillum* en un corto período de tiempo, destacando la capacidad de adaptación de las bacterias en entornos contaminados.

La remediación microbiana emerge como una alternativa segura, eficiente y económica en comparación con los métodos tradicionales. Este estudio se centra en la evaluación de la cepa bacteriana *Rheinheimera tangshanensis* (RTS-4) para la biorremediación de aguas residuales contaminadas con mercurio (Hg). A través de investigaciones previas, se ha identificado la importancia de las bacterias reductoras de sulfato en el control de la metilación del Hg y la degradación del metilmercurio (CH_3Hg)

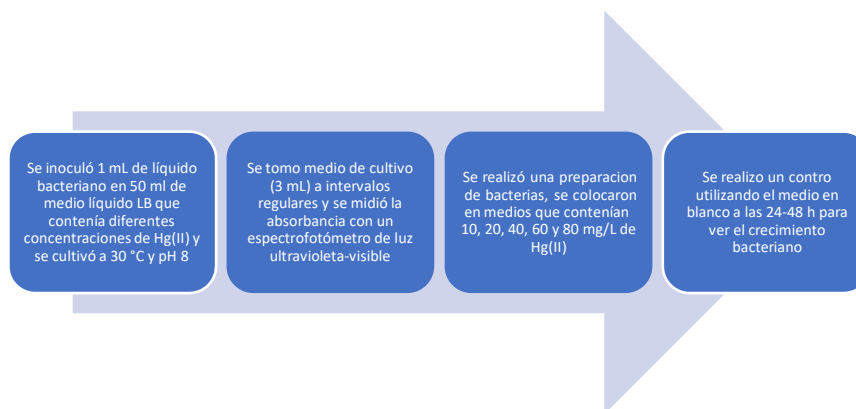
En el año 2022, se descubrió que el polímero extracelular de *Bacillus* exhibe una notable capacidad de adsorción de Hg, alcanzando una cantidad de adsorción de 123,40 mg/g. Además, la cepa de *Acinetobacter indicus* yy-1 demostró efectividad en la eliminación tanto de Cromo (Cr) como de Hg. Estudios adicionales revelaron que *Pseudomonas*, al mostrar resistencia al Hg, tiene el potencial de transformar Hg (II) en Hg (0), ofreciendo perspectivas prometedoras para la remediación de suelos contaminados con metales pesados.

Aunque muchos estudios han enfocado la atención en microorganismos autóctonos del suelo para la remediación de la contaminación por Hg, es crucial destacar que el agua, como principal entorno natural, desempeña un papel clave en la aceptación, degradación y transformación de diversas formas de Hg. Por lo tanto, se sugiere que futuras investigaciones también deben dirigirse al entorno acuático.

Se procedió al aislamiento de diez cepas bacterianas capaces de tolerar concentraciones de 120 mg/L de mercurio (II) de un medio sólido. Dentro de estas cepas, se identificó una con un 100 % de similitud genética con la cepa JA3-B52 de *Rheinheimera tangshanensis*, siendo denominada como RTS-4. Es conocido que las bacterias del género *Rheinoniae*, como *Rheinheimera tangshanensis*, desempeñan funciones significativas en el crecimiento y desarrollo de las plantas, actuando como microorganismos en la rizósfera o endófitos. La elaboración del inoculo empleado se muestra en la Figura 6.

Figura 6

Preparación inoculo



Nota: La figura muestra el proceso de preparación del inoculo. Tomado: Elaborado por el autor

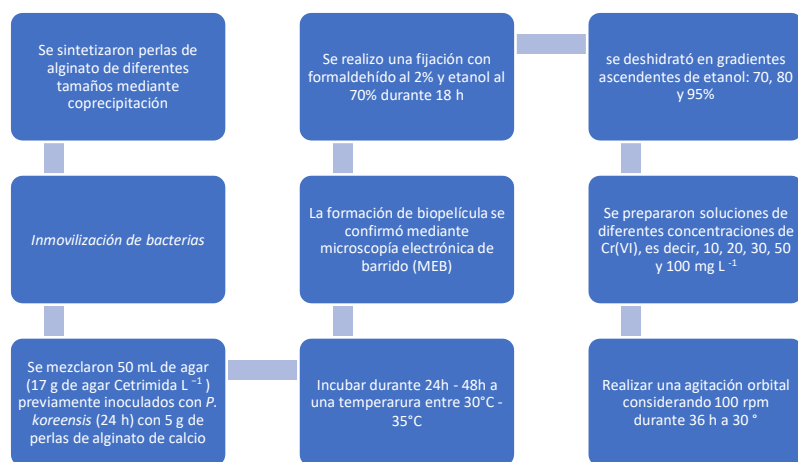
Cabe destacar que la cepa RTS-4 posee propiedades notables en la eliminación de pectina, lo cual presenta un amplio potencial de aplicación en el tratamiento de aguas residuales, así como en procesos de biopulping en la industria del papel. Además, estas bacterias exhiben la capacidad de producir enzimas de ADN, lo que podría contribuir a mitigar posibles efectos pleiotrópicos asociados a nuevas tecnologías de protección de cultivos, como la interferencia de ARN. A pesar de estos atributos, se observa una escasa exploración de su fuerte tolerancia al mercurio y su habilidad de conversión, resultando inusual su aplicación en el tratamiento de aguas residuales de metales pesados.

Agregando a lo anterior, se aborda el estudio de la bacteria nativa *Pseudomonas koreensis* (*P. koreensis*), aislada de cuerpos de agua en una zona minera, con el propósito de evaluar su viabilidad en la eliminación de cromo a través de un sistema de biosorción. La investigación comprendió experimentos a escala de laboratorio, en los cuales se sintetizaron lechos de alginato para ser utilizados como portadores de microorganismos, con el objetivo de minimizar los desafíos asociados al tamaño de las partículas y la resistencia mecánica de las bacterias.

En la siguiente fase, se llevaron a cabo pruebas bajo diversas condiciones operativas en reactores discontinuos, con el fin de evaluar la capacidad de las bacterias inmovilizadas para eliminar Cr(VI). Los datos experimentales obtenidos fueron empleados para determinar la capacidad máxima de adsorción (q_{max}) de Cr(VI), utilizando los modelos de isoterma de adsorción de Langmuir y Freundlich. Además, se exploraron los modelos de pseudoprimer y pseudosegundo orden para identificar la cinética involucrada en la adsorción de cromo en el sistema conformado por las perlas de *P. koreensis*/alginato. En la Figura 7 se simplifica el proceso de la eliminación de adsorción de Cr(VI).

Figura 7

Proceso adsorción de Cr(VI)



Nota: La figura muestra el proceso de adsorción de Cr(VI). Tomado: Elaborado por el autor

Es crucial destacar que la presencia de otros elementos en el agua, como aniones, cationes y otros metales, genera competencia por los sitios activos del biofiltro, afectando la selectividad y, por ende, el rendimiento de las bacterias en la sorción de cromo. No obstante, en este estudio se excluyeron otros elementos con el fin de evaluar la eficiencia de *P. koreensis* en la eliminación de cromo sin interferencias, proporcionando información de referencia aplicable en investigaciones futuras. El objetivo a largo plazo de la investigación consiste en desarrollar un biofiltro destinado a la eliminación de metales pesados del agua potable, especialmente en el caso de México, donde se enfoca en aguas subterráneas.

Como complemento al estudio, se emplearon técnicas analíticas, tales como microscopía electrónica de barrido (MEB), microscopía electrónica de transmisión (SEM), espectroscopía de dispersión de energía (EDS) y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), con el propósito de profundizar en la comprensión del proceso de eliminación de Cr(VI) por *P. koreensis* inmovilizado en perlas de alginato.

En este estudio, se investigó la eficacia de un sistema que emplea vetiver y una variada comunidad microbiana, compuesta por miembros prominentes como *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Serratia*, *Staphylococcus*, *Flaviobacterium*, *Arthobacter*, *Enterobacter*, para la degradación de metales pesados en aguas residuales industriales. Se implementaron reacciones anaeróbicas-aeróbicas secuenciales en el tratamiento de aguas residuales no domésticas (ARN), aprovechando la participación de azo reductasas sensibles al oxígeno en la escisión inicial de enlaces azo. Estas reacciones llevan a la formación de aminas aromáticas, que son degradadas posteriormente en condiciones aeróbicas.

El sistema demostró su capacidad para degradar contaminantes mixtos presentes en aguas residuales, gracias a las reacciones redox facilitadas por la microbiota en la rizósfera. Este proceso se

vio favorecido por la disponibilidad de nutrientes y la aireación en la región, así como por la adsorción de compuestos a las superficies de las raíces de vetiver. La instalación de tratamiento comprendió reactores anaeróbicos y aeróbicos con capacidades de 0,5 m³. Los reactores anaeróbicos, sin oxígeno disuelto (OD = 0 mg/L), se sellaron completamente y se equiparon con agitadores intermitentes para garantizar la mezcla adecuada de contenidos. Por otro lado, los reactores aeróbicos albergaban plantas de vetiver sobre flotadores y estaban equipados con aireadores, manteniendo niveles de OD entre 5 y 6,5 mg/L de O₂.

El inóculo microbiano, desarrollado a partir de purines de estiércol de vaca, se aclimató durante tres meses antes de su implementación en el tratamiento. El estiércol de vaca se utilizó como inóculo al 1% (p/v) en los tanques anaeróbicos y se aclimató para optimizar su eficacia en la degradación de metales pesados.

Como se muestra en las tablas 8 y 9, se proporciona evidencia prometedora sobre la viabilidad de sistemas integrados de vetiver y microorganismos para abordar la problemática de los metales pesados en aguas residuales industriales, destacando la importancia de considerar factores microbiológicos y ambientales en el diseño de sistemas de tratamiento sostenibles.

Tabla 8

Métodos de eliminación de metales más utilizadas

Proceso	Metal	Bacteria	Procedimiento	% de eficiencia
Adsorción de Cr(VI) con perlas de alginato	Cr(VI)	Pseudomonas koreensis	Se emplean perlas de alginato como medio de encapsulamiento para las bacterias empleadas, con esto se realiza un biofiltro por el cual se filtra el agua a analizar, posteriormente se analiza el alginato	hasta un 96% de Cr(VI) en una solución acuosa a 30 °C

<p>Reducción de Hg(II) a Hg(II) Hg(0)</p>	<p>Rheinheimera tangshanensis</p>	<p>mediante espectroscopía de barrido con el fin de determinar el porcentaje de adsorción del Cr(VI)</p> <p>Fueron obtenidas diez cepas bacterianas que exhiben una capacidad de tolerancia al mercurio (Hg), a partir de un medio sólido que contenía una concentración de 120 mg/L de Hg (II). Estas bacterias manifiestan la capacidad de reducir el Hg (II) a Hg (0) mediante la acción de la enzima Hg reductasa, con el propósito de mitigar la toxicidad asociada al Hg (II). Asimismo, presentan la capacidad de adsorber el Hg (II), generando polímeros extracelulares y biomasa muerta, con el fin de disminuir la concentración de Hg(II) en el entorno ambiental</p>	<p>Hasta un 86 % de Hg(II) en medios sólidos y líquidos</p>
<p>Remediación microbiana</p>	<p>As Acinetobacter gandensis y Delftiatsuruhatensis</p>	<p>Las bacterias resistentes al As se examinaron mediante medio mínimo Luria-Bertani (LB) que contenía diferentes concentraciones de As (III), se determinaron las propiedades de oxidación de las bacterias mediante el método del azul de Molibdeno.</p> <p>Las cepas de bacteria se agitaron en una incubadora a 30 °C y 150 rpm durante 24 h y luego se centrifugaron a 6000 rpm. Se descartó el sobrenadante, se añadió solución de glutaraldehído al 2,5% y se dejó durante la noche, para luego centrifugarse a 6000 rpm durante 10 min. Finalmente, las muestras se liofilizaron, se rociaron con oro y se colocaron en un microscopio electrónico de barrido por emisión de campo</p>	<p>76,46%</p>

Tabla 9*Sistemas de tratamiento con microorganismos*

Sistema de Tratamiento	Uso de microorganismos	Método empleado
Reactor Anaeróbico	El lecho de lodo se impregna con microorganismos previamente acondicionados para el metal pesado a eliminar. Así mismo, se puede emplear una biopelícula compuesta 15 % por microorganismos y 85% por lípidos o enzimas	Remediación microbiana
Filtro Anaeróbico	El material filtrante empleado se reemplaza por un encapsulamiento de microorganismos, donde los metales son absorbidos generando una remediación microbiana	Adsorción de Cr(VI) con perlas de alginato Remediación microbiana
Lodos Activados	Se adiciona una solución de microorganismos (especies bacterianas mutantes, como <i>Arthrobacter</i> spp. y <i>Bacillus</i> spp), se realiza una aireación con el fin de tener un constante movimiento	Reducción de Hg(II) a Hg(0)

5. CONCLUSIONES

El tratamiento de las aguas residuales no domésticas (ARnD) de los procesos mineros mediante el uso de microorganismos, representa una estrategia para la eliminación o reducción de metales pesados; esto mediante el uso de tratamientos biológicos que aprovechan la capacidad de microorganismos aeróbicos y anaeróbicos, empleados en distintos tipos de reactores, filtros de flujo ascendente, lodos activados, biofiltros y lagunas de estabilización, ya que son fundamentales para abordar la complejidad de los contaminantes presentes en el agua del sector minero .

Teniendo en cuenta la revisión documental, la remoción de metales pesados se lleva a cabo mediante distintos procesos, donde se destaca la simbiosis entre plantas y bacterias rizosféricas, especialmente aquellas tolerantes a metales pesados; destacándose géneros de bacterias como *Flavobacterium*, *Kleibsellia*, *Rhizobium*, *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Actinoplanes*, *Agrobacterium*, *Azotobacter* y *Bacillus*. En este proceso se genera una acumulación de metales pesados en las plantas, facilitando la eliminación de Cromo (Cr). Este enfoque es particularmente idóneo para su implementación en procesos aeróbicos como los biofiltros, gracias a la necesidad de oxígeno que estos requieren. De igual manera este proceso cuenta con una eficiencia del 96% en la remoción de Cr(VI), en solución acuosa a 30 °C. Además, la aplicación de la remediación microbiana se presenta como una opción segura, eficaz y rentable en comparación con los métodos convencionales para la eliminación del Mercurio de aguas residuales, donde se emplea una cepa bacteriana de *Rheinheimera tangshanensis*, generando una eficiencia de 86 % de Hg(II) en medios sólidos y líquidos. Asimismo, la cepa de *Acinetobacter indicus* ha demostrado ser efectiva en la eliminación de Cromo (Cr). Esta alternativa resulta especialmente adecuada para su uso en tratamientos aeróbicos, como los sistemas de lodos activados.

Sin embargo, la susceptibilidad diferencial de estos microorganismos ante la presencia de metales pesados como Cromo y Mercurio, destaca la necesidad de considerar cuidadosamente su sensibilidad en los procesos de tratamiento biológico para tener un control de los mismos.

No obstante, la contaminación por metales pesados representa un riesgo considerable para la salud humana y el ecosistema. La presencia de metales pesados en las fuentes de agua puede tener efectos perjudiciales en la fauna acuática y en última instancia, afectar a las comunidades que dependen de este recurso. Hay soluciones que contribuyen a la comprensión de la viabilidad y eficacia de los tratamientos biológicos en la remoción de contaminantes metálicos en aguas residuales del sector minero tal como se muestra en el documento, donde la identificación de microorganismos eficaces para el tratamiento de aguas residuales no domésticas en la industria minera se lleva a cabo para minimizar el impacto ambiental y reducir los costos de ejecución.

6. RECOMENDACIONES

Como recomendación, se sugiere ampliar la investigación sobre la diversidad microbiana en distintos sistemas de tratamiento biológico. Explorar y comprender los microorganismos específicos en respuesta a diferentes contaminantes proporcionaría información valiosa para mejorar la eficacia de los procesos de eliminación de metales pesados en el tratamiento de aguas residuales no domésticas, así como realizar pruebas piloto de los sistemas propuestos en entornos industriales reales. Evaluar la viabilidad económica y la escalabilidad de las tecnologías es crucial para su implementación a gran escala y para asegurar su aplicabilidad en diferentes sectores industriales.

Además, se recomienda llevar a cabo investigaciones adicionales para evaluar los residuos que se puedan generar en cada uno de los procesos donde se emplean los microorganismos, con el fin de proporcionar información valiosa sobre la durabilidad y eficiencia a largo plazo de los sistemas de tratamiento biológico, especialmente en entornos industriales donde la contaminación puede ser constante.

7. REFERENCIAS

- Abu Tawila, Z. M. M., Ismail, S., Abu Amr, S. S., & Abou Elkhair, E. K. (2019). A novel efficient biofloculant QZ-7 for the removal of heavy metals from industrial wastewater. *RSC Advances*, 9(48), 27825-27834. 10.1039/c9ra04683f
- Akkurt, Ş, Uçkun, A. A., Varınca, K., & Uçkun, M. (2023). Ability of *Cupriavidus necator* H16 to resist, bioremove, and accumulate some hazardous metal ions in water. *Water Science and Technology*, 87(12), 3017-3030. 10.2166/wst.2023.188
- Alvillo-Rivera, A., Garrido-Hoyos, S., & Buitrón, G. (2022). Cyanide treatment of mining tailings using suspended biomass and moving bed biomass reactors. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(25), 37458-37470. 10.1007/s11356-021-18166-y
- Arcentales-Ríos, R., Carrión-Méndez, A., Cipriani-Ávila, I., Acosta, S., Capparelli, M., Moulatlet, G. M., & Pinos-Vélez, V. (2022). Assessment of metals, emerging contaminants, and physicochemical characteristics in the drinking water and wastewater of Cuenca, Ecuador. *Journal of Trace Elements and Minerals*, 2, 100030. 10.1016/j.jtemin.2022.100030
- Ariza, J., Vargas-Prieto, A., & García-Estévez, J. (2020). The effects of the mining-energy boom on inclusive development in Colombia. *The Extractive Industries and Society*, 7(4), 1597-1606. 10.1016/j.exis.2020.10.002
- Aryal, M., & Liakopoulou-Kyriakides, M. (2015). Bioremoval of heavy metals by bacterial biomass. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(1)10.1007/s10661-014-4173-z
- Balaji, S., Kalaivani, T., Rajasekaran, C., Shalini, M., Vinodhini, S., Priyadharshini, S. S., & Vidya, A. G. (2015). Removal of heavy metals from tannery effluents of Ambur industrial area, Tamilnadu by *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(6), 1-10. 10.1007/s10661-015-4440-7
- Bazrafshan, E., Mohammadi, L., Ansari-Moghaddam, A., & Mahvi, A. H. (2015). Heavy metals removal from aqueous environments by electrocoagulation process - A systematic review. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 13(1)10.1186/s40201-015-0233-8
- Bydalek, F., Webster, G., Barden, R., Weightman, A. J., Kasprzyk-Hordern, B., & Wenk, J. (2023). Microplastic biofilm, associated pathogen and antimicrobial resistance dynamics through a wastewater treatment process incorporating a constructed wetland. *Water Research*, 235, 119936. 10.1016/j.watres.2023.119936
- Castro, A. R., Martins, G., Salvador, A. F., & Cavaleiro, A. J. (2022). Iron Compounds in Anaerobic Degradation of Petroleum Hydrocarbons: A Review. *Microorganisms*, 10(11), 2142. 10.3390/microorganisms10112142

- Chen, Z., Song, J., Zhu, Q., Li, Z., & Yang, R. (2019). Synthesis of Fe₃O₄@PVBC-TMT nanoparticles for the efficient removal of heavy metals ions. *RSC Advances*, 9(69), 40546-40552. 10.1039/c9ra08037f
- Cordero, A., García, M., Herradora, M., Ramírez, G., & Martínez, R. (2010). Bacteriological characterization of wastewater samples obtained from a primary treatment system on a small scale swine farm. *Bioresource Technology*, 101(9), 2938-2944. 10.1016/j.biortech.2009.11.072
- Curiel-Alegre, S., Velasco-Arroyo, B., Rumbo, C., Khan, A. H. A., Tamayo-Ramos, J. A., Rad, C., Gallego, J. L. R., & Barros, R. (2022). Evaluation of biostimulation, bioaugmentation, and organic amendments application on the bioremediation of recalcitrant hydrocarbons of soil. *Chemosphere*, 30710.1016/j.chemosphere.2022.135638
- Das, S., Lyla, P. S., & Khan, S. A. (2006). Marine microbial diversity and ecology: Importance and future perspectives. *Current Science*, 90(10), 1325-1335.
- Dhir, B. (2018). Biotechnological Tools for Remediation of Acid Mine Drainage (Removal of Metals From Wastewater and Leachate). *Bio-Geotechnologies for Mine Site Rehabilitation* (pp. 67-82). Elsevier. 10.1016/B978-0-12-812986-9.00004-X
- Ezzatahmedi, N., Ayoko, G. A., Millar, G. J., Speight, R., Yan, C., Li, J., Li, S., Zhu, J., & Xi, Y. (2017). Clay-supported nanoscale zero-valent iron composite materials for the remediation of contaminated aqueous solutions: A review. *Chemical Engineering Journal*, 312, 336-350. 10.1016/j.cej.2016.11.154
- Fachini, J., Figueiredo, C. C. d., Frazão, J. J., Rosa, S. D., da Silva, J., & Vale, A. T. d. (2021). Novel K-enriched organomineral fertilizer from sewage sludge-biochar: Chemical, physical and mineralogical characterization. *Waste Management*, 135, 98-108. 10.1016/j.wasman.2021.08.027
- Gallo Corredor, J. A., Lizeth Vargas González, G., Velasco Granados, M., Gutiérrez, L., & Pérez, E. H. (2021). Use of the gray water footprint as an indicator of contamination caused by artisanal mining in Colombia. *Resources Policy*, 73, 102197. 10.1016/j.resourpol.2021.102197
- Gao, Q., Tang, D., Song, P., Zhou, J., & Li, H. (2018). Bio-adsorption and Bio-transformation of Arsenic by *Acidithiobacillus ferrooxidans* BY3. *International Microbiology*, 21(4), 207-214. 10.1007/s10123-018-0017-y
- Gawali Ashruta, A., Nanoty, V., & Bhalekar, U. (2014). Biosorption of heavy metals from aqueous solution using bacterial EPS. *Int J Life Sci*, 2(3), 373-377.
- Gerber, U., Zirnstein, I., Krawczyk-Bärsch, E., Lünsdorf, H., Arnold, T., & Merroun, M. L. (2016). Combined use of flow cytometry and microscopy to study the interactions between the gram-negative betaproteobacterium *Acidovorax facilis* and uranium(VI). *Journal of Hazardous Materials*, 317, 127-134. 10.1016/j.jhazmat.2016.05.062

- Gill, L. W., Mac Mahon, J., Knappe, J., & Morrissey, P. (2023). Hydraulic conductivity assessment of falling head percolation tests used for the design of on-site wastewater treatment systems. *Water Research*, 236, 119968. 10.1016/j.watres.2023.119968
- Golab, Z., Breitenbach, M., & Jezierski, A. (1995). Sites of copper binding in *Streptomyces pilosus*. *Water, Air, & Soil Pollution*, 82(3-4), 713-721. 10.1007/BF00479421
- Hossain, M. I., Papparini, A., & Cord-Ruwisch, R. (2018). Direct oxygen uptake from air by novel glycogen accumulating organism dominated biofilm minimizes excess sludge production. *Science of the Total Environment*, 640-641, 80-88. 10.1016/j.scitotenv.2018.05.292
- Intanoo, P., Chaimongkol, P., & Chavadej, S. (2016). Hydrogen and methane production from cassava wastewater using two-stage upflow anaerobic sludge blanket reactors (UASB) with an emphasis on maximum hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(14), 6107-6114. 10.1016/j.ijhydene.2015.10.125
- Javanbakht, V., Alavi, S. A., & Zilouei, H. (2014). Mechanisms of heavy metal removal using microorganisms as biosorbent. *Water Science and Technology*, 69(9), 1775-1787. 10.2166/wst.2013.718
- Jayapal, M., Jagadeesan, H., Krishnasamy, V., Shanmugam, G., Muniyappan, V., Chidambaram, D., & Krishnamurthy, S. (2022). Demonstration of a plant-microbe integrated system for treatment of real-time textile industry wastewater. *Environmental Pollution*, 30210.1016/j.envpol.2022.119009
- Joshi, N. C. (2017). Heavy metals, conventional methods for heavy metal removal, biosorption and the development of low cost adsorbent. *Eur.J.Pharm.Med.Res.*, 4(2), 388-393.
- Kalpana, R., Angelaalincy, M. J., Kamatchirajan, B. V., Vasantha, V. S., Ashokkumar, B., Ganesh, V., & Varalakshmi, P. (2018). Exopolysaccharide from *Bacillus cereus* VK1: Enhancement, characterization and its potential application in heavy metal removal. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 171, 327-334. 10.1016/j.colsurfb.2018.07.043
- Kumari, S., Mangwani, N., & Das, S. (2017). Interaction of Pb(II) and biofilm associated extracellular polymeric substances of a marine bacterium *Pseudomonas pseudoalcaligenes* NP103. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 173, 655-665. 10.1016/j.saa.2016.10.009
- Li, Y., Wu, J., Hu, W., Ren, B., & Hursthouse, A. S. (2018). A mechanistic analysis of the influence of iron-oxidizing bacteria on antimony (V) removal from water by microscale zero-valent iron. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 93(9), 2527-2534. 10.1002/jctb.5606
- Ma, Q. -, Yuan, L. -, Niu, Z. -, Zhao, J., & Huang, C. (2021). Microbial Community Structure of Activated Sludge and its Response to Environmental Factors. *Huanjing Kexue/Environmental Science*, 42(8), 3886-3893. 10.13227/j.hjcx.202012191

- Maarroof, M., & Dursun, S. (2018). Review on Bioremediation Process of a Crude Oil in Contaminated Soil by Leaching and Toxicity Assessments. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science-Ijees*, 8(4), 675-678. 10.31407/ijeec8404
- Mahapatra, S., Samal, K., & Dash, R. R. (2022). Waste Stabilization Pond (WSP) for wastewater treatment: A review on factors, modelling and cost analysis. *Journal of Environmental Management*, 308, 114668. 10.1016/j.jenvman.2022.114668
- Malik, D. S., Jain, C. K., & Yadav, A. K. (2017). Removal of heavy metals from emerging cellulosic low-cost adsorbents: a review. *Applied Water Science*, 7(5), 2113-2136. 10.1007/s13201-016-0401-8
- Mao, M., Yan, T., Shen, J., Zhang, J., & Zhang, D. (2021). Capacitive removal of heavy metal ions from wastewater via an electro-Adsorption and electro-reaction coupling process. *Environmental Science and Technology*, 55(5), 3333-3340. 10.1021/acs.est.0c07849
- Martínez Meza, R. G., Certucha Barragán, M. T., Zavala Rivera, P., Gómez Álvarez, A., & Almazán Holguín, L. A. (2017). Removal of iron and manganese from a polluted effluent using a chelating resin. *Revista Internacional De Contaminacion Ambiental*, 33, 55-63. 10.20937/RICA.2017.33.esp02.05
- Mateos, L. M., Villadangos, A. F., Santana, L. K., Pereira, F. J., de la Rubia, A. G., Gil, J. A., & Aller, A. J. (2016). Comparative mathematical modelling of a green approach for bioaccumulation of cobalt from wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(23), 24215-24229. 10.1007/s11356-016-7596-y
- Maziotis, A., Sala-Garrido, R., Mocholi-Arce, M., & Molinos-Senante, M. (2023). A comprehensive assessment of energy efficiency of wastewater treatment plants: An efficiency analysis tree approach. *Science of the Total Environment*, 885, 163539. 10.1016/j.scitotenv.2023.163539
- Mendoza-Castillo, D., Rojas-Mayorga, C., García-Martínez, I. P., Pérez-Cruz, M. A., Hernández-Montoya, V., Bonilla-Petriciolet, A., & Montes-Morán, M. A. (2015). Removal of heavy metals and arsenic from aqueous solution using textile wastes from denim industry. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(5), 1657-1668. 10.1007/s13762-014-0553-8
- Miguel, A. B. R., Jetten, M. S. M., & Welte, C. U. (2020). The role of mobile genetic elements in organic micropollutant degradation during biological wastewater treatment. *Water Research X*, 9, 100065. 10.1016/j.wroa.2020.100065
- Mishra, S., Singh, V., Ormeci, B., Hussain, A., Cheng, L., & Venkiteshwaran, K. (2023). Anaerobic-aerobic treatment of wastewater and leachate: A review of process integration, system design, performance and associated energy revenue. *Journal of Environmental Management*, 327, 116898. 10.1016/j.jenvman.2022.116898
- Mubashar, M., Naveed, M., Mustafa, A., Ashraf, S., Baig, K. S., Alamri, S., Siddiqui, M. H., Zabochnicka-świątek, M., Szota, M., & Kalaji, H. M. (2020). Experimental investigation of

- chlorella vulgaris and enterobacter sp. Mn17 for decolorization and removal of heavy metals from textile wastewater. *Water (Switzerland)*, 12(11)10.3390/w121113034
- Mustapha, M. U., & Halimoon, N. (2015). Microorganisms and biosorption of heavy metals in the environment: A review paper. *J.Microb.Biochem.Technol.*, 7(5), 253-256.
- Northey, S. A., Klose, S., Pauliuk, S., Yellishetty, M., & Giurco, D. (2023). Primary Exploration, Mining and Metal Supply Scenario (PEMMSS) model: Towards a stochastic understanding of the mineral discovery, mine development and co-product recovery requirements to meet demand in a low-carbon future. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 17, 200137. 10.1016/j.rcradv.2023.200137
- Park, J. H., & Chon, H. -. (2016). Characterization of cadmium biosorption by *Exiguobacterium* sp. isolated from farmland soil near Cu-Pb-Zn mine. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(12), 11814-11822. 10.1007/s11356-016-6335-8
- Pashkevich, M. A., & Korotaeva, A. E. (2022). Evaluation of the efficiency of the phytoextraction process in the quarry wastewater treatment. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, (6-1), 349-360. 10.25018/0236_1493_2022_61_0_349
- Pat-Espadas, A., Portales, R. L., Amabilis-Sosa, L., Gómez, G., & Vidal, G. (2018). Review of constructed wetlands for acid mine drainage treatment. *Water (Switzerland)*, 10(11)10.3390/w10111685
- Poirier, A., Ozkaya, K., Gredziak, J., Talbot, D., & Baccile, N. (2023). Heavy metal removal from water using the metallogelation properties of a new glycolipid biosurfactant. *Journal of Surfactants and Detergents*, 26(2), 175-184. 10.1002/jsde.12629
- Prieto, A. V., García-Estévez, J., & Ariza, J. F. (2022). On the relationship between mining and rural poverty: Evidence for Colombia. *Resources Policy*, 75, 102443. 10.1016/j.resourpol.2021.102443
- Pu, M., Ailijiang, N., Mamat, A., Chang, J., Zhang, Q., Liu, Y., & Li, N. (2022). Occurrence of antibiotics in the different biological treatment processes, reclaimed wastewater treatment plants and effluent-irrigated soils. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107715. 10.1016/j.jece.2022.107715
- Qin, Y., Chen, Z., Ding, B., & Li, Z. (2020). Impact of sand mining on the carbon sequestration and nitrogen removal ability of soil in the riparian area of Lijiang River, China. *Environmental Pollution*, 26110.1016/j.envpol.2020.114220
- Qiu, A., Cai, Q., Zhao, Y., Guo, Y., & Zhao, L. (2016). Evaluation of the treatment process of landfill leachate using the toxicity assessment method. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(12)10.3390/ijerph13121262
- Ravikumar, S., Baylon, M. G., Park, S. J., & Choi, J. -. (2017). Engineered microbial biosensors based on bacterial two-component systems as synthetic biotechnology platforms in bioremediation and biorefinery. *Microbial Cell Factories*, 16(1)10.1186/s12934-017-0675-z

- Rekha, K. H., & Lokeshappa, B. (2020). Comparative studies on removal of heavy metals from electroplating wastewater through soil aquifer treatment (SAT) in conjunction with adsorbents. *Water Science and Technology*, 82(10), 2148-2158. 10.2166/wst.2020.494
- Sánchez-Castro, I., Martínez-Rodríguez, P., Abad, M. M., Descostes, M., & Merroun, M. L. (2021). Uranium removal from complex mining waters by alginate beads doped with cells of *Stenotrophomonas* sp. Br8: Novel perspectives for metal bioremediation. *Journal of Environmental Management*, 29610.1016/j.jenvman.2021.113411
- Sanwani, E., Jeremy, E., Chaerun, S. K., Mufakhir, F. R., & Astuti, W. (2022). Use of Mixotrophic Bacteria as Flocculating Agents to Separate Iron from Red Mud (Alumina Refinery Residue). *Journal of Sustainable Metallurgy*, 8(1), 443-457. 10.1007/s40831-021-00479-4
- Sher, S., Hussain, S. Z., & Rehman, A. (2020). Phenotypic and genomic analysis of multiple heavy metal-resistant *Micrococcus luteus* strain AS2 isolated from industrial waste water and its potential use in arsenic bioremediation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(5), 2243-2254. 10.1007/s00253-020-10351-2
- Shi, J., Chen, Q., Liu, X., Zhan, X., Li, J., & Li, Z. (2013). Sludge/water partition and biochemical transformation of estrone and 17 β -estradiol in a pilot-scale step-feed anoxic/oxic wastewater treatment system. *Biochemical Engineering Journal*, 74, 107-114. 10.1016/j.bej.2013.03.001
- Singh, V., Tripathi, G., & Mishra, V. (2021). Biological Treatment Advancements for the Remediation of Selenium from Wastewater. *Selenium Contamination in Water* (pp. 228-251). Wiley. 10.1002/9781119693567.ch12
- Somani, M., Hölzle, I., Datta, M., & Ramana, G. V. (2023). An investigation on mobility of heavy metals for assessing the reusability of soil-like material reclaimed from mining of municipal solid waste dumpsites. *Waste Management*, 167, 113-121. 10.1016/j.wasman.2023.05.028
- Tabak, H. H., Lens, P., Van Hullebusch, E. D., & Dejonghe, W. (2005). Developments in bioremediation of soils and sediments polluted with metals and radionuclides - 1. Microbial processes and mechanisms affecting bioremediation of metal contamination and influencing metal toxicity and transport. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 4(3), 115-156. 10.1007/s11157-005-2169-4
- Tak, H. I., Ahmad, F., & Babalola, O. O. (2013). *Advances in the application of plant growth-promoting rhizobacteria in phytoremediation of heavy metals* 10.1007/978-1-4614-5577-6_2
- Thakur, Y., Kumar, M., & Singh, S. (2015). Microbial biosorption as a green technology for bioremediation of heavy metals. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 6(3), 1717-1724. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84938805860&partnerID=40&md5=c934506326eb74f4060a3be2b14f6206>

- Truu, J., Truu, M., Espenberg, M., Nõlvak, H., & Juhanson, J. (2015). Phytoremediation and plant-assisted bioremediation in soil and treatment wetlands: A review. *Open Biotechnology Journal*, 9(1), 85-92. 10.2174/1874070701509010085
- Van Der Wal, A., Norde, W., Zehnder, A. J. B., & Lyklema, J. (1997). Determination of the total charge in the cell walls of Gram-positive bacteria. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 9(1-2), 81-100. 10.1016/S0927-7765(96)01340-9
- Veiga, M. M., & Marshall, B. G. (2019). The Colombian artisanal mining sector: Formalization is a heavy burden. *The Extractive Industries and Society*, 6(1), 223-228. 10.1016/j.exis.2018.11.001
- Vélez, J. M. B., Martínez, J. G., Ospina, J. T., & Agudelo, S. O. (2021). Bioremediation potential of *Pseudomonas* genus isolates from residual water, capable of tolerating lead through mechanisms of exopolysaccharide production and biosorption. *Biotechnology Reports*, 3210.1016/j.btre.2021.e00685
- Vélez-Torres, I., & Méndez, F. (2022). Slow violence in mining and crude oil extractive frontiers: The overlooked resource curse in the Colombian internal armed conflict. *The Extractive Industries and Society*, 9, 101017. 10.1016/j.exis.2021.101017
- Vishan, I., Laha, A., & Kalamdhad, A. (2017). Biosorption of Pb(II) by *Bacillus badius* AK strain originating from rotary drum compost of water hyacinth. *Water Science and Technology*, 75(5), 1071-1083. 10.2166/wst.2016.590
- Wang, K., Zhang, F., Xu, K., Che, Y., Qi, M., & Song, C. (2023). Modified magnetic chitosan materials for heavy metal adsorption: a review. *RSC Advances*, 13(10), 6713-6736. 10.1039/d2ra07112f
- Wei, F., Shahid, M. J., Alnusairi, G. S. H., Afzal, M., Khan, A., El-Esawi, M., Abbas, Z., Wei, K., Zaheer, I. E., Rizwan, M., & Ali, S. (2020). Implementation of floating treatment wetlands for textile wastewater management: A review. *Sustainability (Switzerland)*, 12(14), 1-29. 10.3390/su12145801
- Wu, F., Sun, F., Wu, S., Yan, Y., & Xing, B. (2012). Removal of antimony(III) from aqueous solution by freshwater cyanobacteria *Microcystis* biomass. *Chemical Engineering Journal*, 183, 172-179. 10.1016/j.cej.2011.12.050
- Yang, L., Liu, Y., Li, C., Liu, Z., Liu, X., Wei, C., Yang, Z., & Zhang, A. (2022). Biodegradation time series characteristics and metabolic fate of different aromatic compounds in the biochemical treatment process of coal chemical wastewater. *Bioresource Technology*, 361, 127688. 10.1016/j.biortech.2022.127688
- Yaqub, M., & Lee, S. H. (2019). Heavy metals removal from aqueous solution through micellar enhanced ultrafiltration: A review. *Environmental Engineering Research*, 24(3), 363-375. 10.4491/EER.2018.249

- Yu, Z., Han, H., Feng, P., Zhao, S., Zhou, T., Kakade, A., Kulshrestha, S., Majeed, S., & Li, X. (2020). Recent advances in the recovery of metals from waste through biological processes. *Bioresource Technology*, 29710.1016/j.biortech.2019.122416
- Zhang, J., Zhou, X., Zhou, Q., Zhang, J., & Liang, J. (2022). A study of highly efficient phenol biodegradation by a versatile *Bacillus cereus* ZWB3 on aerobic condition. *Water Science and Technology*, 86(2), 355-366. 10.2166/wst.2022.209
- Zhang, Q., & Wang, C. (2020). Natural and Human Factors Affect the Distribution of Soil Heavy Metal Pollution: a Review. *Water, Air, and Soil Pollution*, 231(7)10.1007/s11270-020-04728-2
- Zhao, M., Zheng, G., Kang, X., Zhang, X., Guo, J., Wang, S., Chen, Y., & Xue, L. (2023). Aquatic Bacteria *Rheinheimera tangshanensis* New Ability for Mercury Pollution Removal. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(5)10.3390/ijms24055009
- Zong, Y., Gong, J., Zhang, J., Su, Y., Hu, C., Li, T., Wu, Y., & Jiang, M. (2023). Research status of soda residue in the field of environmental pollution control. *RSC Advances*, 13(41), 28975-28983. 10.1039/d3ra04863b