

BACTERIAS REDUCTORAS DE SULFATO (BRS): EFECTO SOBRE LOS METALES PESADOS PRESENTES EN AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

*SULFATE-REDUCING BACTERIA (SRB): EFFECT ON HEAVY
METALS PRESENT IN INDUSTRIAL WASTEWATER*

REYNA ORSUA GAONA

ROSA I. NARRO
CÉSPEDES

BRENDA R. CRUZ ORTIZ

YADIRA K. REYES
ACOSTA

GUADALUPE NEIRA
VELÁZQUEZ

Facultad de Ciencias
Químicas, Unidad Sureste,
UAdeC.

Correspondencia
rinarro@uadec.edu.mx

RESUMEN

La contaminación de aguas residuales con metales pesados es un grave problema ambiental que genera efectos perjudiciales en la salud del hombre y de los organismos vivos que se encuentran en contacto con este medio. Existen distintos métodos para el tratamiento de los metales pesado, tanto físicos como químicos, sin embargo, en las últimas dos décadas se han desarrollado ampliamente tratamientos biológicos, los cuales hacen uso de organismos vivos para su biorremediación. Los tratamientos biológicos han ganado la atención científica debido a que, comparados con los tratamientos convencionales, son más rentables en economía y eficiencia, además de que son ecológicamente responsables al no generar una posterior contaminación. Algunos organismos vivos reportados en estos tratamientos son plantas terrestres y acuáticas, hongos, levaduras y bacterias, todos éstos de diversas especies. En cuanto a bacterias se refiere, existe un grupo llamado Bacterias Reductoras de Sulfato (denominadas en lo sucesivo como BRS) que poseen una alta capacidad para bio precipitar iones metálicos en suelos y agua. Por lo anterior, se realizó una búsqueda en la base de datos ScienceDirect para detectar los avances de estas bacterias en materia de biorremediación de metales pesados. La base datos mostró 3570 resultados (palabras clave: bacterias reductoras sulfato, metales pesados, aguas residuales industriales). De estos resultados, solamente once publicaciones hacen referencia a las BRS utilizadas para la remoción de metales pesados en aguas residuales, el resto estaban enfocadas al tratamiento de suelos contaminados con estos

contaminantes y/o al empleo de otros organismos descontaminantes. En este trabajo se pretende informar el proceso de bio-precipitación de iones metálicos por efecto de las BRS en aguas residuales industriales y al mismo tiempo dar a conocer algunos aspectos relevantes que deben revisarse durante tal proceso.

Palabras clave: bacterias reductoras; sulfato; metales pesados; aguas residuales industriales.

ABSTRACT

Contamination of wastewater with heavy metals is a serious environmental problem that generates harmful effects on the health of humans and living organisms that are in contact with this environment. There are different methods for the treatment of heavy metals, both physical and chemical, however, in the last two decades biological treatments have been widely developed, which make use of living organisms for their bioremediation. Biological treatments have gained scientific attention because, compared to conventional treatments, they are more cost-effective and efficient, in addition to being ecologically responsible by not generating subsequent contamination. Some living organisms reported in these treatments are terrestrial and aquatic plants, fungi, yeasts and bacteria, all of these of various species. As far as bacteria are concerned, there is a group called Sulfate-Reducing Bacteria (hereinafter referred to as BRS) that has a high capacity to bio-precipitate metal ions in soils and water. For this reason, a search was carried out in the ScienceDirect database to detect the advances of these bacteria in the bioremediation of heavy metals. The database showed 3570 results (keywords: sulfate-reducing bacteria, heavy metals, industrial wastewater). Of these results, only eleven publications refer to the BRS used for the removal of heavy metals in wastewater, the rest were focused on the treatment of soils contaminated with these contaminants and/or the use of other decontaminating organisms. This work aims to report the process of bio-precipitation of metal ions by the effect of BRS in industrial wastewater and at the same time to make known some relevant aspects that should be reviewed during such a process.

Keywords: sulfate-reducing bacteria; heavy metals; industrial

wastewater.

INTRODUCCIÓN

El agua residual industrial es uno de los grandes conflictos ambientales que se ha intentado contrarrestar debido a que contiene compuestos tóxicos que perjudican la salud del hombre, la conservación y la preservación de la flora y fauna. La falta de suministro de este recurso a nivel mundial es alarmante ya que, según una estimación emitida por el Consejo Mundial del Agua, para el año 2030 una población de 3.900 millones no tendrá acceso al líquido vital en zonas con escasas de agua (Vardhan y col., 2019).

Dentro de los contaminantes más peligrosos en el agua residual industrial se encuentran los metales pesados, cuya densidad es superior a 4 g/cm^3 . Los metales pesados son severamente tóxicos inclusive en concentraciones bajas; no son biodegradables, se acumulan en la cadena alimenticia y se auto transportan dentro de organismos vivos como las plantas (Kolluru y col., 2021). La ingesta oral, la exposición dérmica y/o la inhalación prolongada de metales pesados en el organismo humano afectan el comportamiento de orgánulos celulares que a su vez produce alteraciones genéticas: aparición de diferentes tipos de cáncer y/o enfermedades de Menkes y de Alzheimer, entre otras (Yin y col., 2019); también pueden inducir esclerosis múltiple, disminución de la actividad mental, daños en el sistema nervioso central, pulmones, hígado, riñones y otros órganos, además de cambiar la composición de la sangre (Vardhan y col., 2019).

Existen tratamientos convencionales y no convencionales para la remediación de metales pesados en agua. En los convencionales se incluyen la precipitación química, coagulación-flotación, tecnología de membranas, intercambio iónico y tecnología electroquímica; por su parte, en los no convencionales se encuentran la adsorción (carbón activado, materiales poliméricos, residuos agrícolas, residuos industriales, adsorbentes magnéticos y compósitos adsorbentes), celdas de combustible microbianas, reacciones tipo Fenton, nanotecnología (nano carbón, materiales 2D, nanopartículas) y

fitorremediación. Derivado de los tratamientos no convencionales, surgen los Tratamientos Biológicos, los cuales desde hace varios años han sido estudiado ampliamente debido a su alta eficiencia a costos bajos y principalmente, porque favorecen el medio ambiente al no generar residuos contaminantes (Zamora-Ledezma y col., 2021).

Los tratamientos biológicos tienen presentan ventajas importantes en comparación con el resto de las técnicas de remediación de metales pesados: operación de bajo riesgo, viables económicamente y adaptabilidad, sin embargo, la ventaja más relevante en términos ambientales es que hacen uso de organismos vivos, principalmente hongos, levaduras y bacterias, los cuales transforman los contaminantes metálicos en especies que se remueven fácilmente (Sharma y col., 2021).

En cuanto a bacterias se refiere, se han reportado diversas especies en la biorremediación de metales pesados, tales como *Bacillus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Zooglea spp.*, *Citrobacter spp.*, *Chlorella vulgaris*, *Aspergillus Niger*, *Pleurotus ostreatus*, *Rhizopus arrhizus*, *Stereum hirsutum*, *Phormidium valderium* y *Ganoderma applantus* (Verma y Kuila, 2019), sin embargo, existe un grupo de bacterias llamadas Bacterias Reductoras de Sulfato (BRS) que son conocidas entre la comunidad bacteriana como las predominantes en el tratamiento de metales pesados debido a que poseen la capacidad de bio-precipitar iones metálicos (Kiran y col., 2017).

Este trabajo pretende informar con mayor detalle el efecto que tienen las BRS en el proceso de bio-precipitación de iones metálicos en aguas residuales industriales, así como también aspectos importantes a considerar durante dicho proceso. Toda la información aquí presentada se obtuvo a partir de una revisión bibliográfica, cuyos criterios de búsqueda y selección se muestran más adelante.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó una revisión bibliográfica sobre el uso de BRS para el tratamiento de metales pesados en aguas residuales industriales en la base de datos ScienceDirect. Los criterios de búsqueda y selección

de las publicaciones relevantes se enlistan en la Tabla 1.

Tabla 1. Criterios de búsqueda y selección de publicaciones en la revisión bibliográfica.

1. Palabras de búsqueda (en inglés): bacterias reductoras de sulfato, metales pesados, agua residual industrial (sulfate-reducing bacteria, heavy metals, industrial wastewater).
2. La antigüedad de las publicaciones no se delimitó.
3. Mediante una revisión rápida de los resultados de la búsqueda, se seleccionaron las publicaciones pertinentes al tema de interés.
4. Una vez seleccionadas las publicaciones, se analizaron con mayor profundidad para obtener la información necesaria.
5. Finalmente, se eligieron las publicaciones de BRS en la biorremediación de metales de la categoría artículos de resultados, con el propósito de generar un estado del arte. La cuantificación de estas publicaciones se presentó de forma gráfica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La base de datos ScienceDirect mostró resultados desde el año 2001 hasta el año 2024, de los cuales se revisaron las publicaciones del año 2016 al 2024, puesto que a partir del 2016 se observó un incremento cuantitativo de aproximadamente el doble que los años anteriores, manteniéndose en valores similares hasta el 2019; entre 2020 y 2022 se incrementaron 100 publicaciones por año, siendo el 2022 el año más publicado, con 613 trabajos. En el 2023 y 2024 se mantuvieron cercanamente entre sí, con 555 y 593 respectivamente, tal como se observa en la Figura 1.

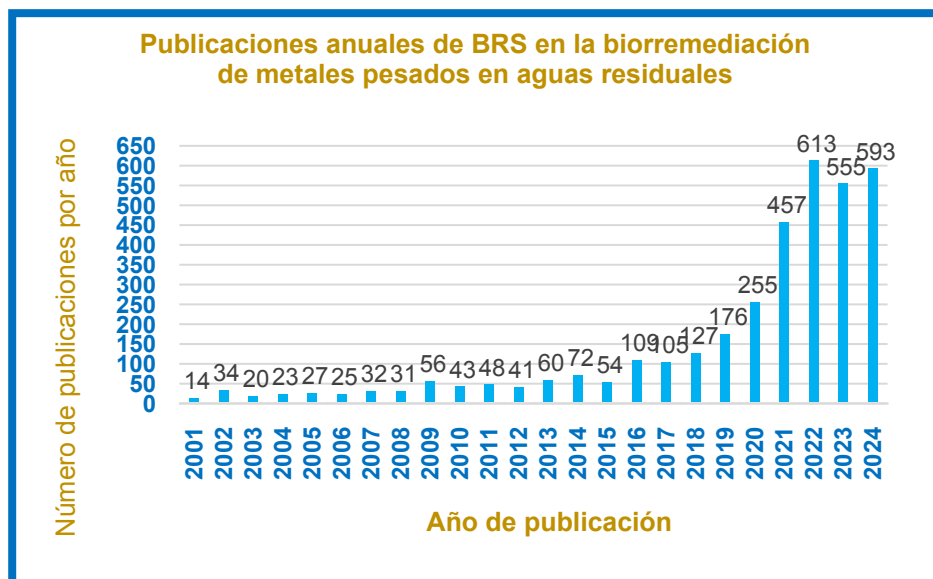


Figura 1. Cuantificación anual en la base de datos ScienceDirect, sobre las publicaciones de BRS como auxiliares en la biorremediación de metales pesados en aguas residuales industriales.

Del total de 3570 resultados obtenidos tras la revisión bibliográfica, solamente once publicaciones hicieron referencia a BRS utilizadas para la remoción de metales pesados en aguas residuales.

Clyde y col. (2016), quienes desarrollaron un sistema piloto a escala en una mina abandonada. El sistema consistió en 5 etapas: un canal de aireación; tanque de sedimentación; biofiltro de turba; reactor de BRS (géneros no descritos) para generar un ambiente alcalino con un incremento de pH; canal de piedra caliza de re-aireación. Con este sistema, los autores reportaron los siguientes porcentajes de remoción metálica: As 18%, Cu 2%, Fe 17% y Zn 31%.

Otra propuesta para el tratamiento del drenaje ácido de minas fue publicada por Zhang y col. (2016) quienes prepararon gránulos de BRS del género *Desulfovibrio desulfiricans* en un biorreactor anaeróbico de lecho empacado con flujo ascendente, para el tratamiento de agua residual del drenaje ácido de minas, obteniendo una remoción del 99.9% de Fe, Cu, Zn y Cd, mientras que para Mn lograron el 99.3%

Por su parte, Heravi y col. (2017) prepararon agua residual sintética con Pb, Cr (VI) y Ni para ser tratada con BRS (géneros no descritos) en un reactor anaeróbico de lecho empacado de flujo descendente.

Sus resultados fueron precipitados metálicos con eficiencias de remoción de 300 mg/l de Pb, 100 mg/l de Cr (VI) y 30 mg/l de Ni, durante 12 horas de operación. En el mismo año, Peng y col. (2017) trabajaron en la eliminación de Zn presente en el agua residual de producción de Piritiona de Zn (ZTP), cuya aplicación es como agente antibacteriano y antifúngico. Las condiciones de trabajo fueron 33.61 °C, pH 7.45 y concentración del inóculo de 0.62 mg/l, con lo cual lograron remover 250 mg/l de Zn⁺².

Kiran y col. (2018) estabilizaron el género *Desulfovibrio* de BRS en pellets obtenidos a partir de una suspensión de BRS, solución salina de un buffer de fosfato y alginato de sodio, que posteriormente se mezclaron gota a gota en una solución de cloruro cálcico para formar perlas. Estos autores reportaron remociones de Cu y Zn de 99% y 95.8%, respectivamente.

Zhang y col. (2019) sintetizaron un complejo de alcohol polivinílico y alginato de sodio impregnado con BRS y removieron 50 mg l⁻¹ Pb (II) de soluciones acuosas trabajando a 35 °C y pH 8.0.

Peng y col. (2020) bio estabilizaron BRS y redujeron Cd presente en sedimentos, sin embargo, observaron un aumento en la bio toxicidad del agua suprayacente ocasionada posiblemente por el medio de cultivo, por la propia bacteria y/o sus metabolitos, por lo que sugirieron evaluar con mayor atención la seguridad de los tratamientos con BRS en la biorremediación de matrices contaminadas con metales pesados. Por su parte, Nogueira y col. (2021) emplearon un biorreactor de lecho estructurado con flujo descendente con el cual lograron bio precipitar Cu, Fe y Zn, entre otros elementos, con 73%, 70% y 80%, respectivamente.

Huang y col. (2022) investigaron la bio estabilización de Pb presente en un gas de combustión simulado en un biorreactor reductor de sulfato, logrando eliminar 95.7%-98.7% de este metal pesado. Estos autores precipitaron micropartículas de galena (PbS) y de piromorfita (Pb₅(PO₄)₃Cl) dejando 53.4%-73.7% de Pb residual.

Finalmente, Yang y col. (2024) trabajaron en la eliminación de Cd y As mediante zeolitas modificadas con Fe/S combinadas con bacterias reductoras de sulfato, y reportaron para Cd (II) 10 mg/l-1 y As (III) 5 mg/l-1, el 93.4% y 39.9%, respectivamente, lo que después de 48

horas tras la adición de los metales pesados, agregando una dosis de BRS de 20% v/v y una dosis de Z-FeOS de 0.7% m/v, pH 8.0 y un tiempo de reacción de 168 h. En el mismo año, Xu y col. (2024), evaluaron la capacidad de un sistema in situ de bio-sulfuración de hierro cerovalente con BRS para la eliminación de Cr (VI), y encontraron una eficiencia de este sistema 2.5 veces mayor que la sulfuración química que puede ser usado durante 11 ciclos en la biorremediación de aguas subterráneas contaminadas con cromo. En la Tabla 2 se enlistan las referencias de las investigaciones seleccionadas.

Tabla 2. Publicaciones de biorremediación de metales pesados en aguas residuales con BRS.

BRS	Metales tratados	Referencia
Consorcio de BRS no especificado.	Zn, Fe, Cu.	(Clyde y col., 2016)
Consorcio de BRS no especificado	Pb, Cr (VI), Ni.	(Heravi y col., 2017)
Consorcio de BRS no especificado.	Pb (95.7%-98.7%)	(Huang y col., 2022)
<i>Desulfovibrio</i>	Cu (99%) Zn (95.8%)	(Kiran y col., 2018)
<i>Geobacter Desulfovibrio</i>	Cu (73%) Fe (70%) Zn (80%)	(Nogueira y col., 2021)
Consorcio de BRS no especificado.	Piritona de zinc.	(Peng y col., 2017)
Consorcio de BRS no especificado.	Cd	(Peng y col., 2020)
Consorcio de BRS no especificado.	Cr (VI) 100%	(Xu y col., 2024)
Consorcio de BRS no especificado.	Cd (II) 93.4% As (III) 39.9%	(Yang y col., 2024)
<i>Desulfovibrio desulfificans</i>	Fe, Cu, Zn, Cd (99.9%) Mn (99.3%)	(Zhang y Wang, 2016)
<i>Citrobacter freundii</i>	Pb (II)	(Zhang y col., 2019)

METALES PESADOS

Los metales pesados son elementos con densidad atómica mayor a 4 g/cm³, los cuales incluyen el cobre (Cu), cadmio (Cd), zinc (Zn), plomo (Pb), mercurio (Hg), arsénico (As), plata (Ag), cromo (Cr), hierro (Fe) y platino (Pt). Estos metales residuales provienen mayormente de actividades antropogénicas, tales como efluentes agrícolas (pesticidas, fertilizantes), efluentes industriales (petroquímicas,

petroleras, metalúrgicas, mineras, tintóreas), efluentes domésticos y combustiones fósiles (Vareda y col., 2019).

Los tratamientos existentes (convencionales y no convencionales) para la remoción de estos contaminantes presentan generalmente varias limitaciones, incluidas los altos costos de operación, generación de lodos que produce consecuentemente una contaminación secundaria, tratamiento incompleto de metales pesados traza en área grandes, entornos altamente ácidos en los que únicamente tienen efectividad, entre otros. Por lo tanto, son necesarios tratamientos descontaminantes más simples, de bajo costo, efectivos y amigables con el ambiente (Yin y col., 2019).

TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS

Los tratamientos biológicos por su parte ofrecen algunas ventajas considerables contra los tratamientos existentes: la mayoría de los microorganismos se obtienen en tiempo corto, responden rápidamente a nuevas condiciones lo que permite detectar a corta instancia su adaptación metabólica y fisiológica para desarrollar resistencia en el entorno, se observa una descontaminación acelerada, tienen alta eficiencia, son benignos ambientalmente, la operación es de bajo costo y los procesos son autosostenidos (Rahman, 2020).

Al usar microorganismos en los tratamientos biológicos, se habla entonces de biorremediación de metales pesados, en donde los microorganismos transforman los contaminantes en formas menos activas, no tóxicas y fácilmente removibles. La biorremediación se puede realizar mediante dos métodos, *in-situ* y *ex-situ*. Los métodos *in-situ* permiten que la biorremediación se lleve a cabo en el sitio contaminado, en el cual se estimula a los microorganismos a través del suministro de nutrientes adecuados para su crecimiento y/o se introducen microorganismos genéticamente modificados. En los métodos *ex-situ* se transporta el entorno contaminado a otra región para su tratamiento (Priyadarshanee y Das, 2021).

Dentro de los microorganismos empleados en la biorremediación de metales pesados se encuentran especies que tienen la capacidad de bio-precipitar metales pesados, como por ejemplo los hongos *Aspergillus* y *Penicillium* que producen ácido oxálico para precipitar Zn y Cu; y algunas bacterias como *Acinetobacter* y *Citrobacter* que

acumulan fosfatos y posteriormente precipitan cationes metálicos divalentes. Sin embargo, el ejemplo más relevante de bio-precipitación es el que llevan a cabo ciertas bacterias, las cuales producen sulfuro y son conocidas como reductoras de sulfato (Castro y col., 2019).

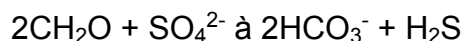
BACTERIAS REDUCTORAS DE SULFATO (BRS)

Las bacterias son microorganismos que se encuentran en todas partes. Fueron descubiertas en el siglo XVII después de la invención del microscopio (Singleton, 2004). Se clasifican de acuerdo con su tamaño, morfología, metabolismo y/o función de la estructura de su pared (Prat, 2005).

En la clasificación de la estructura de pared bacteriana, se distinguen dos grupos: Grampositivo y Gramnegativo, dentro de los cuales se encuentran las bacterias reductoras de sulfato. Las BRS poseen un género Grampositivo llamado *Desulfotomaculum* y distintos géneros Gramnegativos nombrados como *Desulfobulbus*, *Desulfobacterium*, *Desulfosarcina*, *Desulfobacter*, *Desulfococcus* y *Desulfovibrio*. Los géneros Gramnegativos tienen la capacidad de transformar químicamente los metales pesados en especies menos tóxicas a través de un proceso llamado bio-precipitación (Novair y col., 2024).

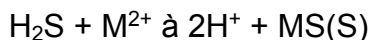
BIO-PRECIPITACIÓN DE IONES METÁLICOS

El mecanismo de bio-precipitación sigue dos etapas en general: (1) cuando el entorno es anaeróbico las BRS oxidan compuestos orgánicos simples, usando sulfatos como aceptores de electrones para producir sulfuro de hidrógeno y bicarbonato en forma de iones (Nagpal y col., 2000), tal como se observa en la Ecuación 1.



(1)

En la etapa (2) el sulfuro de hidrógeno producido tiende a reaccionar con el metal pesado disuelto y así se forman precipitados insolubles de sulfuro del metal (Nagpal y col., 2000), tal como se observa en la Ecuación 2. En la Figura 2 se muestra una representación gráfica del mecanismo descrito (Li y col., 2018).



(2)

Durante la bio-precipitación de iones metálicos por efecto de las BRS existe el riesgo de que las mismas BRS sean arrastradas con los efluentes y/o con los propios precipitados metálicos (Nagpal y col., 2000). Para contrarrestar este efecto, las bacterias pueden ser estabilizadas mediante un proceso llamado “Inmovilización Microbiana” (Beyenal y Lewandowski, 2004).

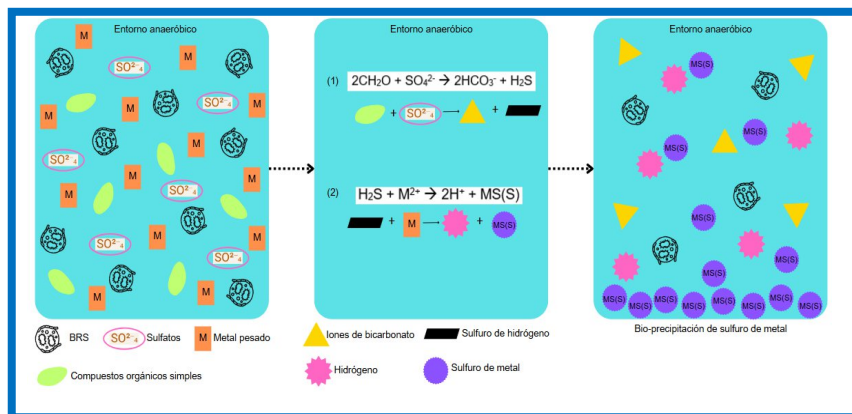


Figura 2. Etapas de bio-precipitación de iones metálicos por acción de las BRS (Adaptado de la referencia (Nagpal y col., 2000).

INMOVILIZACIÓN MICROBIANA

La inmovilización tanto de las bacterias como de otros microorganismos se ha denominado “Tecnología de Inmovilización Bacteriana” y se ha convertido en una tendencia de investigación mundial científica debido a que gracias a la estabilidad que proporciona, los microorganismos se ven protegidos del entorno y se incrementa la actividad microbiana (Li y col., 2022).

Un factor vital para la inmovilización microbiana es el material en el cual se lleva a cabo. Este material recibe el nombre de medio, soporte o transportador y dependiendo del tipo de agua residual, del contaminante y de la aplicación del agua postratamiento, el material debe cumplir con los siguientes criterios para ser elegido: ligero, liviano, flexible, inerte, mecánica y químicamente estable, no contaminante, no biodegradable, insoluble en medios acuosos, susceptible para un método simple de inmovilización y además debe tener buena capacidad de transferencia de masa (Mehrotra y col., 2021).

Los materiales utilizados como medios de inmovilización son clasificados en polímeros naturales, polímeros sintéticos y materiales inorgánicos. Cuando se trata de inmovilizar células completas, se opta por elegir polímeros naturales y/o sintéticos. Los naturales incluyen pectato, agar, carragenina, agarosa, carbón, quitosano, gelatina, celulosa, colágeno y alginato, entre otros. Por su parte, los sintéticos incluyen algunos geles como poliacrilamida (PAM), alcohol polivinílico (PVA), polietilenglicol (PEG) y policarbamoil sulfonato (PCS); y algunos plásticos sintéticos que predominan son polietileno (PE), poliuretano (PU), polipropileno (PP), poliacrilonitrilo (PAN) y cloruro de polivinilo (PVC). Sin embargo, para aprovechar los beneficios de ambos tipos de polímeros sería prescindible fusionarlos (Das y Adholeya, 2015).

Los métodos de inmovilización microbiana más comunes y básicos son la adsorción y la unión covalente. En el caso de la adsorción, que es la más usada, la fuerza de unión bacteria/medio es débil y por su parte, la unión covalente disminuye la actividad bacteriana; como la reticulación entre moléculas, catalizadores, bacterias y el medio de estabilización, sin embargo, existen otros métodos que exhiben algunas ventajas sobre los comunes, tales como la encapsulación por membranas, atrapamiento en una matriz porosa, gelificación ionotrópica, sol-gel, tecnología LentiKats y electrohilado (Suzana y col., 2013).

CONCLUSIONES

Se observaron los avances de investigación en materia de biorremediación de metales pesados en aguas residuales industriales por efecto de las BRS, en cuyos resultados demostraron la efectividad de aplicar este tipo de tratamiento biológico para la descontaminación de efluentes residuales. Si bien todas estas publicaciones en la literatura reportan diversos mecanismos de acción por parte de las BRS sobre los metales, el proceso de bio-precipitación promete ser uno de los mecanismos más efectivos para tal fin, puesto que la mayoría de los trabajos analizados en esta revisión han mencionado sus ventajas con respecto a otros procesos. Por lo tanto, las proyecciones sobre la bio-precipitación de metales pesados causada por las BRS sugieren que continúe el desarrollo de este tipo de investigaciones, para dar soluciones tecnológicas y a su vez

ecológicas, al grave problema de metales pesados en agua residual a nivel industrial.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo otorgado través de la beca nacional de posgrado con el número 1000741. Asimismo por el apoyo técnico al programa de posgrado de doctorado Ciencia y Tecnología de Materiales perteneciente a la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Coahuila, por proveer las instalaciones, las herramientas electrónicas y los recursos necesarios para realizar esta revisión bibliográfica.

REFERENCIAS

- Bagheri Novair, S., Biglari Quchan Atigh, Z., Asgari Lajayer, B., Shu, W., & Price, G. W. (2024). The role of sulphate-reducing bacteria (SRB) in bioremediation of sulphate-rich wastewater: Focus on the source of electron donors. *Process Safety and Environmental Protection*, 184: 190–207. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2024.01.103>
- Beyenal, H., & Lewandowski, Z. (2004). Dynamics of lead immobilization in sulfate reducing biofilms. *Water Research*, 38(11), 2726–2736. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.03.023>
- Castro, C., Urbieto, M. S., Plaza Cazón, J., & Donati, E. R. (2019). Metal biorecovery and bioremediation: Whether or not thermophilic are better than mesophilic microorganisms. *Bioresource Technology*, 279: 317–326. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2019.02.028>
- Clyde, E. J., Champagne, P., Jamieson, H. E., Gorman, C., & Sourial, J. (2016). The use of a passive treatment system for the mitigation of acid mine drainage at the Williams Brothers Mine (California): Pilot-scale study. *Journal of Cleaner Production*, 130: 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.145>
- Das, M., & Adholeya, A. (2015). Potential Uses of Immobilized Bacteria, Fungi, Algae, and Their Aggregates for Treatment of Organic and Inorganic Pollutants in Wastewater. *ACS Symposium Series*, 1206: 319–337. <https://doi.org/10.1021/BK-2015-1206.CH015>
- Fakhri Heravi, M. R., Gharibi, H., Jaafari, J., Mesdaghinia, A., & Mahvi, A. H. (2017).

Performance evaluation of sulfate reducing bacteria in removing lead, chromium and nickel by anaerobic packed bed reactor. *Desalination and Water Treatment*, 59: 154–159. <https://doi.org/10.5004/DWT.2016.1743>

Gopi Kiran, M., Pakshirajan, K., & Das, G. (2017). An overview of sulfidogenic biological reactors for the simultaneous treatment of sulfate and heavy metal rich wastewater. *Chemical Engineering Science*, 158: 606–620. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.11.002>

Gopi Kiran, M., Pakshirajan, K., & Das, G. (2018). Heavy metal removal from aqueous solution using sodium alginate immobilized sulfate reducing bacteria: Mechanism and process optimization. *Journal of Environmental Management*, 218: 486–496. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.020>

Huang, Z., Wei, Z., Jiao, H., Chen, Z., Wu, Z., & Huang, W. (2022). Mechanistic insights into bio-stabilization of lead (II) in flue gas by a sulfate-reducing bioreactor. *Chemical Engineering Journal*, 450: 137564. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2022.137564>

Kolluru, S. S., Agarwal, S., Sireesha, S., Sreedhar, I., & Kale, S. R. (2021). Heavy metal removal from wastewater using nanomaterials-process and engineering aspects. *Process Safety and Environmental Protection*, 150: 323–355. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2021.04.025>

Li, R., Wang, B., Niu, A., Cheng, N., Chen, M., Zhang, X., Yu, Z., & Wang, S. (2022). Application of biochar immobilized microorganisms for pollutants removal from wastewater: A review. *Science of The Total Environment*, 837: 155563. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.155563>

Li, X., Lan, S. ming, Zhu, Z. ping, Zhang, C., Zeng, G. ming, Liu, Y. guo, Cao, W. cheng, Song, B., Yang, H., Wang, S. fan, & Wu, S. hua. (2018). The bioenergetics mechanisms and applications of sulfate-reducing bacteria in remediation of pollutants in drainage: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 158: 162–170. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2018.04.025>

Mehrotra, T., Dev, S., Banerjee, A., Chatterjee, A., Singh, R., & Aggarwal, S. (2021). Use of immobilized bacteria for environmental bioremediation: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5): 105920. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2021.105920>

Nagpal, S., Chuichulcherm, S., Peeva, L., & Livingston, A. (2000). Microbial Sulfate Reduction in a Liquid-Solid Fluidized Bed Reactor. In *Biotechnol Bioeng* (Vol. 70).

Nogueira, E. W., Gouvêa de Godoi, L. A., Marques Yabuki, L. N., Brucha, G., & Zamariolli Damianovic, M. H. R. (2021). Sulfate and metal removal from acid mine drainage using sugarcane vinasse as electron donor: Performance and microbial community of the down-flow structured-bed bioreactor. *Bioresource*

Technology, 330: 124968. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.124968>

- Peng, W., Li, X., Lin, M., Gui, H., Xiang, H., Zhao, Q., & Fan, W. (2020). Biosafety of cadmium contaminated sediments after treated by indigenous sulfate reducing bacteria: Based on biotic experiments and DGT technique. *Journal of Hazardous Materials*, 384: 121439. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2019.121439>
- Peng, Z. Xiong, HE, H. Jun, Yang, C. Ping, Zeng, G. Ming, Wen, S., Yan, Z., Xiang, H. Hong, Cheng, Y., Tarre, S., & Green, M. (2017). Biological treatment of wastewater with high concentrations of zinc and sulfate ions from zinc pyrrithione synthesis. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 27(11): 2481–2491. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60275-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60275-9)
- Prat, G. (2005). *Microbiología Clínica : Vol. XII*. Editorial Medical Panamericana.
- Priyadarshane, M., & Das, S. (2021). Biosorption and removal of toxic heavy metals by metal tolerating bacteria for bioremediation of metal contamination: A comprehensive review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1): 104686. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2020.104686>
- Rahman, Z. (2020). An overview on heavy metal resistant microorganisms for simultaneous treatment of multiple chemical pollutants at co-contaminated sites, and their multipurpose application. *Journal of Hazardous Materials*, 396: 122682. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.122682>
- Sharma, P., Pandey, A. K., Kim, S. H., Singh, S. P., Chaturvedi, P., & Varjani, S. (2021). Critical review on microbial community during in-situ bioremediation of heavy metals from industrial wastewater. *Environmental Technology and Innovation*, 24: 1826. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101826>
- Silveira Martins, S.C., Martins, C.M., Cidrao Guedes Fiúza, L.M., Tédde Santaella, S. (2013). Immobilization of microbial cells: A promising tool for treatment of toxic pollutants in industrial wastewater. *African Journal of Biotechnology*, 12(28): 4412–4418. <https://doi.org/10.5897/AJB12.2677>
- Singleton, P. (2004). *Bacterias en biología, biotecnología y medicina*. Acribia Editorial.
- Vardhan, K. H., Kumar, P. S., & Panda, R. C. (2019). A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives. *Journal of Molecular Liquids*, 290: 111197. <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2019.111197>
- Vareda, J. P., Valente, A. J. M., & Durães, L. (2019). Assessment of heavy metal pollution from anthropogenic activities and remediation strategies: A review. *Journal of Environmental Management*, 246, 101–118. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2019.121439>

1016/ j.jenvman.2019.05.126

- Verma, S., & Kuila, A. (2019). Bioremediation of heavy metals by microbial process. *Environmental Technology and Innovation*, 14: 100369 Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100369>
- Xu, H., Qin, C., Zhang, H., & Zhao, Y. (2024). New insights into long-lasting Cr(VI) removal from groundwater using in situ biosulfidated zero-valent iron with sulfate-reducing bacteria. *Journal of Environmental Management*, 355: 120488. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2024.120488>
- Yang, W., Wen, J., Zhou, Y., Cheng, W., & Zheng, Y. (2024). Simultaneous removal of cadmium and arsenic co-contamination by iron/sulfur-modified zeolites combined with sulfate-reducing bacteria. *Journal of Water Process Engineering*, 67: 106236. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2024.106236>
- Yin, K., Wang, Q., Lv, M., & Chen, L. (2019). Microorganism remediation strategies towards heavy metals. *Chemical Engineering Journal*, 360: 1553–1563. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2018.10.226>
- Zamora-Ledezma, C., Negrete-Bolagay, D., Figueroa, F., Zamora-Ledezma, E., Ni, M., Alexis, F., & Guerrero, V. H. (2021). Heavy metal water pollution: A fresh look about hazards, novel and conventional remediation methods. In *Environmental Technology and Innovation* (Vol. 22). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101504>
- Zhang, H., Su, M., Li, M., Yan, J., Tang, J., Gong, C., Chen, D., Xiao, T., & Chen, Y. (2019). Efficient removal of Pb (II) ions from aqueous solution by novel PVA-sodium alginate immobilized sulfate reducing bacteria. *Desalination and Water Treatment*, 138: 280–290. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23256>
- Zhang, M., & Wang, H. (2016). Preparation of immobilized sulfate reducing bacteria (SRB) granules for effective bioremediation of acid mine drainage and bacterial community analysis. *Minerals Engineering*, 92: 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.02.00>