

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## FITORREMEDIACIÓN Y MICRORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR PLOMO (Pb) Y CADMIO (Cd)

\* Antônio Rony da Silva Pereira Rodrigues <sup>1</sup>

### PHYTOREMEDIATION AND MICROREMEDIATION OF SOILS CONTAMINATED BY LEAD (Pb) AND CADMIUM (Cd)

Recibido el 21 de mayo de 2023. Aceptado el 22 de agosto de 2023

#### Abstract

Heavy metals such as lead and cadmium can cause serious damage to human health, since, not being dissolved by the human body, sustainable ways to remove heavy metals from the soil are phytoremediation and microremediation. The present study aimed to evaluate in the literature the species involved in the sustainable removal of lead and cadmium from contaminated soils. We chose to carry out an integrative review of the literature, through an extensive search of studies in the Scopus and Web of Science databases. The results show that species such as *Chrysopogon zizanioides* and *Paspalum fasciculatum* can be an alternative for the elimination of Cd and Pb, because they have resistance and act as bioaccumulators of these compounds, in addition to having a rapid growth. The *Trichoderma asperellum* fungus was also viable, as it has a maximum removal efficiency rate of 76.17% and 68.4% for cadmium and lead, respectively. The use of phytoremediation and microremediation are essential to ensure the health of soils and the quality of cultivated food, as it is a low-cost and sustainable technology, it can be easily inserted by rural producers and researchers.

**Keywords:** bioremediation, environmental contamination, heavy metals.

<sup>1</sup> Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Ceará, Brasil.

\* *Autor correspondente:* Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Ceará. Av. Dr. Silas Munguba, 1700 - Itaperi, Fortaleza, Ceará, 60714-903. Brasil. Email: [rony346silva@gmail.com](mailto:rony346silva@gmail.com)

## Resumen

Los metales pesados como el plomo y el cadmio pueden causar graves daños a la salud humana, ya que, al no ser disueltos por el cuerpo humano, las formas sostenibles de eliminar metales pesados del suelo son la fitorremediación y la microrremediación. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar en la literatura las especies involucradas en la eliminación sostenible de plomo y cadmio de suelos contaminados. Se optó por realizar una revisión integradora de la literatura, a través de una amplia búsqueda de estudios en las bases de datos Scopus y Web of Science. Los resultados muestran que especies como *Chrysopogon zizanioides* y *Paspalum fasciculatum* pueden ser una alternativa para la eliminación de Cd y Pb, porque tienen resistencia y actúan como bioacumuladores de estos compuestos, además de tener un rápido crecimiento. El hongo *Trichoderma asperellum* también fue viable, ya que tiene una tasa máxima de eficiencia de eliminación de 76.17% y 68.4% para cadmio y plomo, respectivamente. El uso de la fitorremediación y la microrremediación son esenciales para garantizar la salud de los suelos y la calidad de los alimentos cultivados, ya que es una tecnología de bajo costo y sostenible, puede ser fácilmente insertada por productores rurales e investigadores.

**Palabras clave:** biorremediación, contaminación ambiental, metales pesados.

## Introducción

Con el avance de la urbanización y la industrialización, los niveles de metales pesados y metaloides también han aumentado, causando un daño inmenso a todo el ecosistema (Sharma *et al.*, 2022). Cobbina *et al.* (2015), definen los metales pesados como un grupo de compuestos químicos ubicuos y no biodegradables. La concentración de estos elementos en el suelo se encuentra de manera natural, debido a la erosión de la roca madre y otros procesos pedogenéticos en el material originario del suelo, estos metales juegan un papel geoquímico durante la cristalización de los elementos mineralógicos de la roca (De Oliveira y Marins, 2011).

La alta concentración de metales pesados en los suelos agrícolas puede interferir negativamente con la fertilidad, inhibir el crecimiento, modificar la morfología y fisiología de las plantas, amenazando la seguridad alimentaria (Saleem *et al.*, 2020). Los suelos agrícolas no solo son una fuente de nutrientes para las especies de plantas, sino que también transfieren contaminantes a las plantas a través de sus raíces. La contaminación de los suelos con metales pesados ha aumentado dramáticamente en los últimos años, principalmente con metales como plomo (Pb), cadmio (Cd), cobre (Cu) y níquel (Ni) (Mahmoud y Ghoneim, 2016).

Algunos metales pesados juegan un papel esencial para el crecimiento de las plantas cuando están en concentración adecuada, entre estos metales se encuentran el hierro (Fe), el magnesio (Mg), el zinc (Zn) y el molibdeno (Mo), pero también pueden causar toxicidad a concentraciones superiores a las requeridas (Rehman *et al.*, 2019).

La diferencia de la mayoría de las sustancias tóxicas que se degradan en el cuerpo humano y se metabolizan en metabolitos inofensivos, los metales pesados cuando se ingieren a través de los

alimentos son persistentes, uniéndose a los órganos del cuerpo, como el plomo en los huesos y el cadmio en los riñones (Kan *et al.*, 2007).

A fin de mantener el suelo y la salud humana, se han evaluado cada vez más los estudios sobre técnicas para eliminar el cadmio y el plomo. Con respecto al tratamiento del plomo en el suelo, los procesos actuales agrupan técnicas de conversiones térmicas, electrocinéticas o fisicoquímicas que son rápidas, pero requieren una alta inversión, debido a la necesidad de equipos de alto costo (Rai *et al.*, 2019).

Debido al costo de realizar procesos de remediación mecánica, las nuevas investigaciones se centran en el estudio de técnicas sostenibles, como la fitorremediación y la microrremediación del suelo, porque tienen un bajo costo. Se encontró que el uso de técnicas de fitorremediación para limpiar metales pesados tóxicos se puede utilizar para eliminar estos contaminantes del suelo (Nouri *et al.*, 2009).

Los consorcios microbianos también demuestran potencial para la eliminación de metales pesados en el suelo. Las reacciones redox que utilizan sistemas microbianos pueden convertir hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales pesados en compuestos no tóxicos o menos tóxicos (Yin *et al.*, 2019). Los estudios demuestran que el uso de microrremediación es eficaz en la eliminación de metales pesados como el cromo (Cr), el consorcio microbiano de las cepas bacterianas YH-1 y YH-3 de los géneros *Pseudomonas sp.* y *Rhodococcus sp.*, respectivamente, mostró una eliminación de cromo del 76.67% (Su *et al.*, 2022).

Otras técnicas como la aplicación de Biochar en la eliminación de metales pesados también han demostrado ser viables y ampliamente estudiadas. El biochar puede convertir metales pesados de fracciones lábiles en fracciones estables en el suelo, reduciendo así la acumulación de metales pesados en las plantas (Faghih *et al.*, 2018).

En este contexto, evaluando el alto costo de las tecnologías actuales aplicadas para eliminar metales pesados del suelo y el alto impacto de esto en la salud humana y ambiental, especialmente compuestos como el plomo y el cadmio, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar a través de la literatura qué plantas y bacterias están involucradas y son viables en los procesos de fitorremediación y microrremediación de suelos contaminados por cadmio y plomo, con el fin de promover una síntesis de conocimientos sobre el tema.

## **Materiales y métodos**

### Tipo de estudio

El presente estudio es una revisión integradora de la literatura (RI). La revisión integradora de la literatura es un método integral de revisión, que proporciona una síntesis del conocimiento e incorpora la aplicabilidad de los resultados de estudios significativos sobre el tema evaluado (Souza *et al.*, 2010).

Para construir la revisión integradora es necesario realizar distintos pasos, que son la identificación del tema, establecimiento de criterios de inclusión y exclusión, categorización de estudios, resumen de estudios incluidos, interpretación y presentación de la revisión/síntesis del conocimiento (Mendes *et al.*, 2008).

### Estrategia de búsqueda

La búsqueda de artículos se realizó en las bases de datos Scopus (Elsevier) y Web of Science (Clarivate), a través de los siguientes conjuntos de términos: (('contamination'/exp OR contamination) AND soils AND ('phytoremediation'/exp OR phytoremediation) AND ('lead'/exp OR lead) AND ('cadmium'/exp OR cadmium) OR microremediation) AND ('Cd'/exp OR Cd) AND Pb). La búsqueda se realizó utilizando los operativos booleanos AND y OR, y los términos se buscaron en portugués, inglés y español, para ampliar el campo de búsqueda.

### Criterios de selección de los estudios

Para seleccionar los estudios, se aplicaron criterios de inclusión, incluyendo: artículos completos, en cualquier idioma, dentro del plazo de seis años (2018-2023) y el tema de estudio propuesto. Se excluyeron: artículos fuera de tema y con plazos determinados, tesis, disertaciones y monografías, libros y capítulos de libros, resúmenes, artículos incompletos y trabajos publicados en anales de eventos.

Inicialmente los trabajos fueron seleccionados a través de la aplicación de los criterios de inclusión y eliminación de duplicados a través del *software* libre *Rayyan*, según lo propuesto por los estudios de Ouzzani *et al.* (2016). Para eliminar los duplicados, se adoptó como criterio para comparar en qué base apareció primero el artículo (ejemplificando: el artículo Y se encontró en las bases Z y X. Sin embargo, en la lista de resultados proporcionados, fue destacado primero por la base Z). Posteriormente, los artículos fueron seleccionados mediante la lectura de los títulos y resúmenes y luego los textos fueron leídos minuciosamente, con el propósito de confirmar los artículos que respondían al objetivo del estudio.

### Procesamiento de datos

Los datos se presentaron a través del método de "nube de palabras", realizado con la ayuda del *software* *Wordle*. El método de la nube de palabras es una forma de demostrar resultados basados en la frecuencia de las palabras más citadas, en la que la mayor o menor cantidad de apariciones de un término dado viene dada proporcionalmente por el tamaño de la fuente (Dias *et al.*, 2014).

## **Resultados y discusión**

Un total de 3.207 artículos fueron recuperados de las fuentes primarias de investigación, de los cuales 1.286 eran artículos de Scopus y 1.921 de la Web of Science, 2.901 artículos fueron excluidos en la primera fase de selección porque no estaba dentro de los criterios de inclusión y

por duplicación, 306 estudios tenían sus títulos y resúmenes leídos, 53 de los cuales fueron seleccionados para lectura completa, donde se seleccionaron 13 estudios para componer la revisión integradora. La estrategia de búsqueda y selección de los estudios se puede ver en el diagrama de flujo PRISMA (Figura 1). El resumen de los estudios que forman parte de la revisión se puede ver en la Tabla 1.

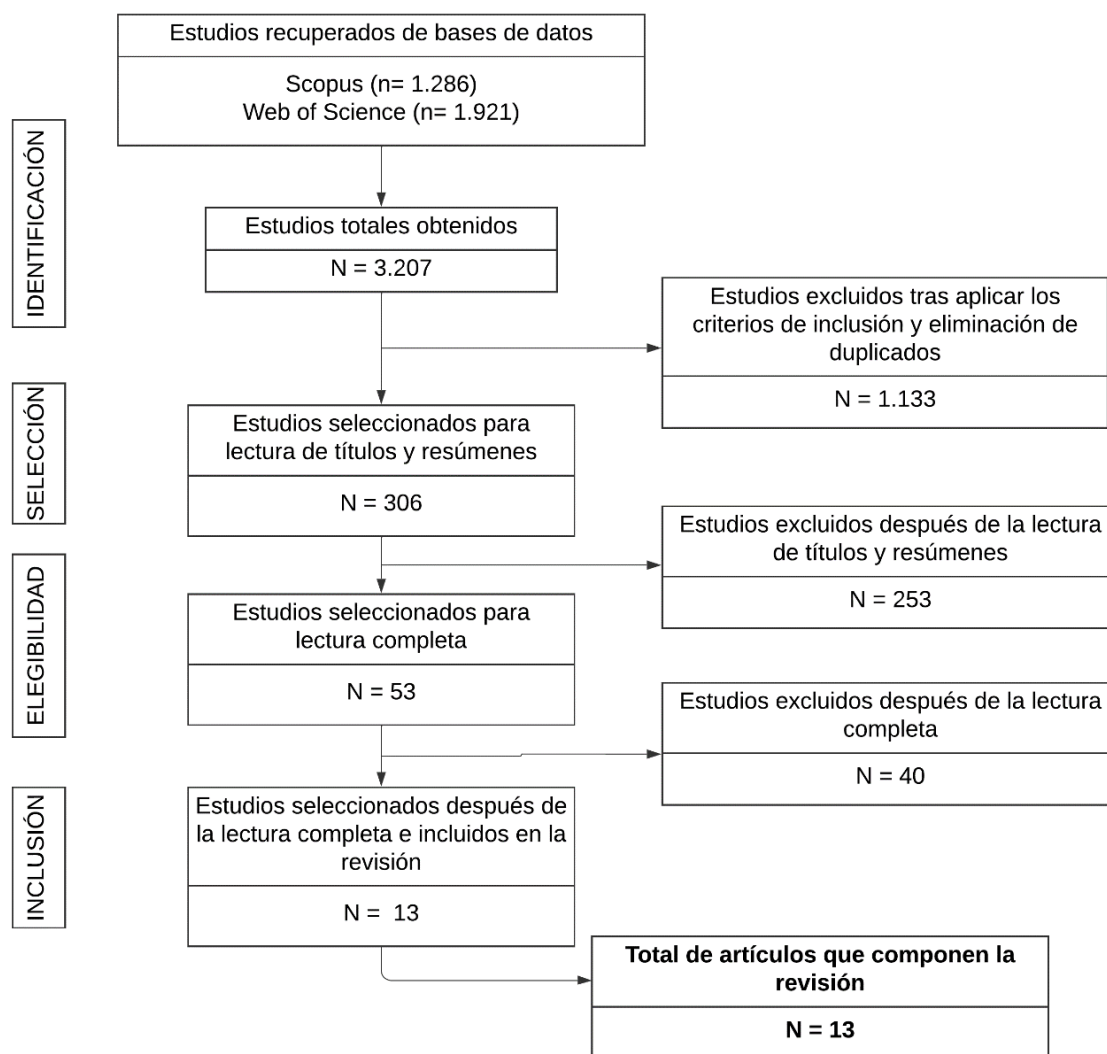


Figura 1. Diagrama de flujo Prisma de la estrategia de búsqueda y selección de estudios

**Tabla 1.** Caracterización de los estudios que componen la revisión

Autor, año	Ubicación del estudio	Especies evaluadas	Metal clasificado	Tipo de corrección
Debela <i>et al.</i> 2022	Etiopía	<i>Phytolacca dodecandra</i>	Cadmio y plomo	Fitorremediación
Doghbage <i>et al.</i> 2023	Argelia	<i>Atriplex halimus</i>	Cadmio	Fitorremediación
El-Mahrouk <i>et al.</i> 2020	Egipto	<i>Populus nigra</i>	Cadmio y plomo	Fitorremediación
Gravand <i>et al.</i> 2021	Irán	<i>Chrysopogon zizanioides</i>	Cadmio y plomo	Fitorremediación
Jan <i>et al.</i> 2022	Pakistán	<i>Brassica napus</i> , <i>Lysinibacillus macroides</i> y <i>Bacillus safensis</i>	Cadmio y plomo	Microrremediación Fitorremediación
Jin <i>et al.</i> 2019	China	<i>Simplicillium chinense</i>	Cadmio y plomo	Microrremediación
Moameri y Khalaki, 2019	Irán	<i>Secale montanum</i>	Cadmio y plomo	Fitorremediación
Orekanti <i>et al.</i> 2019	India	<i>Helianthus annuus</i> , <i>Vigna radiata</i> y <i>Macrotylo ma uniflorum</i>	Cadmio	Fitorremediación
Salas-Moreno y Marrugo-Negrete, 2020	Colombia	<i>Paspalum fasciculatum</i>	Cadmio y plomo	Fitorremediación
Tang <i>et al.</i> 2019	China	<i>Vicia faba</i>	Cadmio y plomo	Fitorremediación
Wasino <i>et al.</i> 2019	Tailandia	<i>Chrysopogon zizanioides</i> y <i>Chrysopogon nemoralis</i>	Cadmio y plomo	Fitorremediación
Yousefi <i>et al.</i> 2023	Irán	<i>Portulaca oleracea</i>	Cadmio	Fitorremediación
Zhang <i>et al.</i> 2018	China	<i>Mucor circinelloides</i> y <i>Trichoderma asperellum</i>	Cadmio y plomo	Microrremediación

En la nube de palabra anterior (Figura. 2), fue posible notar términos destacados como contaminación, seguidos de los demás: suelo, cadmio, hongos, bacterias, plomo. Por lo tanto, hubo una mayor frecuencia de estos términos en el *corpus* textual de los estudios identificados y seleccionados en la literatura para componer la revisión.



Figura 2. Nube de palabras de los términos más frecuentes en los estudios.

### Fitorremediación de suelos contaminados por cadmio (Cd) y plomo (Pb)

Los estudios demuestran que el vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) es una alternativa para eliminar los metales pesados de los suelos. Los estudios de laboratorio de Wasino *et al.* (2019), simulando la contaminación del suelo por metales pesados, con la aplicación de 200 ppm  $PbCO_3$  y  $CdCl_2$  (concentración de  $180.42 \pm 2.63$  mg/kg de Pb y  $103.57 \pm 5.26$  mg/kg de Cd), se aplicaron a muestras de suelo, utilizando vetiver como especie fitorremedidora durante 4 meses, midiéndose su factor de bioacumulación a través de la ecuación 1.

$$BF_{raíz} = (Metal_{raíz}) / (Metal_{suelo}) \quad \text{Ecuación (1)}$$

Siendo, BF – factor de bioacumulación; Metal de raíz – concentración de metales en las raíces de la especie y Suelo metálico – concentración de metales en el suelo.

Los resultados mostraron que la concentración de Pb en las raíces de *C. zizanioides* aumentó de 2.22 mg/kg a 54.27 mg/kg durante el tratamiento, pero la acumulación más significativa fue en el brote, cuya

concentración de Pb aumentó de 0.91 mg/kg a 23.21 mg/kg. En cuanto a la bioacumulación de cadmio, en el cuarto mes de remediación se midió una concentración de 430.32 mg/kg en las raíces.

Gravand *et al.* (2021), demostraron resultados similares utilizando *C. zizaniodes*. La especie fue capaz de demostrar una tasa de absorción del 95% de plomo, cadmio, manganeso y níquel en las raíces y brotes. El tratamiento con plomo alcanzó una tasa de absorción promedio de 282.45 mg/kg. Para el cadmio, la tasa de absorción alcanza los 248.3 mg/kg, lo que representa el 65.5% del cadmio absorbido del suelo contaminado.

Otros estudios ya han descrito la actividad adsorbente de metales pesados para *Chrysopogon zizaniodes*, evaluando la especie como adsorbente de As, Cr, Cu, Zn, Fe y Hg, se obtuvieron tasas de adsorción de 100%, 33.4%, 67.8%, 58.3%, 29.4% y 67.2%, respectivamente (Alberto *et al.*, 2022).

El uso de la especie *Paspalum fasciculatum* contra suelos contaminados por plomo y cadmio (15, 30 y 50 mg kg<sup>-1</sup>), reveló que *P. fasciculatum* actúa como modificador de la rizosfera, disminuyendo la acidez y aumentando el contenido de materia orgánica, lo que condujo a una disminución en la biodisponibilidad de Cd y Pb en el suelo, debido a una disminución de 2 grados de acidez en el pH del suelo o por el aumento de materia orgánica ( $p \leq 0.05$ ) (Salas-Moreno y Marrugo-Negrete, 2020).

Concentración de 20, 40, 60 y 80 mg/kg de suelo de cloruro de cadmio [CdCl<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O], que corresponde a 3.9, 7.8, 11.9 y 15.6 mg Cd/kg suelo y 250, 450, 650 y 850 mg/kg de suelo de acetato de plomo [(CH<sub>3</sub> COO) 2 Pb.3H<sub>2</sub>O], igual a 50, 91.1, 132.1 y 173.3 mg Pb/kg suelo y evaluó la capacidad de fitorremediación del chopo negro (*Populus nigra*). El potencial de fitoextracción de metales pesados se evaluó mediante el factor de bioconcentración de calcactiva (BCF), el porcentaje del factor de translocación (TF), el índice de tolerancia del bioma (Tlb) y el índice de tolerancia radicular (Tlr), dado por la siguiente Ecuación 2.

Ecuación (2)

$$BCF = \frac{CO}{CS}$$

Donde CO es la concentración de metal en el órgano vegetal (mg/kg DW) y CS es la concentración de metal en el suelo (mg/kg de DW en el suelo).

Dependiendo de los valores de BCF, la eficiencia de acumulación se evaluó utilizando la clasificación de grupos: BCF < 1 (intensivo), 1 a 0.1 (medio), 0.1 a 0.01 (débil) y 0.01 a 0.001 (sin acumulación), estimándose a través de la Ecuación. 3.

$$TF\% = \frac{CH}{CR} \times 100 \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde CH es el contenido metálico en el brote (mg/kg DW) y CR es el contenido metálico en las raíces (mg/kg DW).

Los resultados muestran un efecto significativo ( $p \leq 0.05$ ) para todos los tratamientos evaluados para Cd y Pb. La absorción de cadmio alcanzó 0.017, 0.107 y 0.180 mg y de plomo 0.25, 1.48 y 2.13 mg en las hojas, tallos y raíces, respectivamente. La parte de la planta con mayor absorción fueron las raíces, seguidas de las hojas y tallos, excepto para dosis de 2 a 20 y 40 mg/kg de suelo CdCl, donde se observó un mayor contenido de cadmio en los tallos que en las hojas (El-Mahrouk *et al.*, 2023).

Otras especies vegetales han demostrado ser habitables para la fitorremediación de suelos contaminados con cadmio y plomo, como *Secale montanum* (Moameri y Abassi Khalaki, 2019), *Portulaca oleracea* (Yousefi *et al.*, 2023), *Vicia faba* (Tang *et al.*, 2019), *Phytolacca dodecandra* (Debela *et al.*, 2022) y *Atriplex halimus* (Doghbage *et al.*, 2023), especialmente *A. halimus* que mostró resultados significativos para la acumulación de cadmio en sus raíces aumentando de 0.36 mg/L a 13.66 mg/L.

#### Microrremediación de suelos contaminados por cadmio (Cd) y plomo (Pb)

El uso de la especie fúngica *Simplicillium chinense* como remediador de plomo y cadmio en suelos contaminados con concentraciones de Cd: 10, 30, 50, 100, 150 y 200 mg/L y Pb: 10, 30, 50, 100, 150 y 200 mg/L, reveló resultados significativos. El análisis de los datos se realizó mediante isotermas de absorción (Ecuación 4):

$$Q_e = Q_{\max} \frac{K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde  $Q_e$  (g/kg DCW) es los metales absorbidos en *S. chinense*,  $C_e$  (g/L) la concentración de equilibrio del metal en el sobrenadante,  $Q_{\max}$  (g/kg DCW) la capacidad máxima de biosorción,  $K_L$  (L/mg) es la constante de Langmuir, que está asociada con la energía de adsorción.

A través de la microscopía electrónica de barrido antes y después de la biosorción de los metales, se observó que antes de que la superficie de *S. chinense* fuera lisa, y sin la presencia de Cd y Pb, se observó la presencia de Cd y Pb en forma de cristales. En cuanto a la biosorción de metales por *S. chinense*, las isotermas de biosorción alcanzaron tasas de 88.5 y 57.8 g/kg para Cd y Pb, respectivamente (Jin *et al.*, 2019).

La asociación fúngica de *Mucor circinelloides* y *Trichoderma asperellum* como agentes remediadores de plomo y cadmio fue evaluada por Zhang *et al.* (2018). La inoculación de *M. circinelloides* y *T. asperellum* redujo las concentraciones de formas disponibles de Cd o Pb en el suelo, la reducción de la especiación disponible de Cd y Pb fue de hasta 42.46% y 47.51%, respectivamente. Otros estudios ya han demostrado la eficacia de *T. asperellum* en la eliminación de cadmio y plomo, con una eficiencia máxima de eliminación de 76.17% y 68.4%, para cadmio y plomo, respectivamente (Mohsenzadeh y Shahrokhi, 2014; Hoseinzadeh *et al.*, 2017).

El tratamiento asociado de *Brassica napus* y el consorcio fúngico-bacteriano de *Lysinibacillus macroides* y *Bacillus safensis* tuvo su eficacia evaluada contra los metales plomo y cadmio, y la tolerancia de las cepas se calculó a través de Ecuación 5.

$$PR (\%) = (CIMS - CFMS) / CIMS \times 100 \quad \text{Ecuación (5)}$$

Siendo PR (%), porcentaje de reducción, CIMS - concentración inicial de metales en el suelo y CFMS - concentración final de metales en el suelo.

La resistencia más baja encontrada contra el cadmio fue de 137 ppm, mientras que la resistencia máxima observada para el plomo fue de 537 ppm. *B. napus* alcanzó una tasa de germinación en suelos contaminados por plomo y cadmio e inoculados por *L. macroides* y *B. safensis* del 63%, demostrando que la inoculación ayuda en el crecimiento de las plantas, aumentando la resistencia a los metales analizados (Jan *et al.*, 2022).

Rajesh *et al.* (2014), identificaron en sus estudios que *B. safensis* tiene un alto potencial en la eliminación de cadmio del suelo, presentando una tasa de reducción máxima de 83% y 98% para 40 y 60 ppm de cadmio, respectivamente a pH 7.

### Conclusiones

Tras el análisis de los estudios que componen la revisión es destacable que las tecnologías de fitorremediación y microrremediación en la eliminación de plomo y cadmio de suelos contaminados, es factible y eficiente. El uso de plantas y microorganismos en la degradación o absorción de estos elementos químicos y la tecnología con menor costo y sostenible para mantener la calidad y salud del suelo.

El uso de especies como *Chrysopogon zizanioides* y *Paspalum fasciculatum* son alternativas para mantener la salud del suelo, pues además de eliminar metales pesados, actúan como

moduladores de la rizosfera, actuando en el aumento de materia orgánica y reducción de la acidez del suelo, favoreciendo así el crecimiento y desarrollo de las plantas.

El avance de los estudios sobre fitorremediación y microrremediación de suelos contaminados por metales pesados es esencial para garantizar la salud ambiental, así como la salud humana. El presente estudio contribuye a un amplio estudio sobre especies vegetales, fúngicas y bacterianas que pueden usarse como remedidores de cadmio y plomo en suelos contaminados, y puede ayudar en futuras investigaciones y contribuir como aspecto bibliográfico a otros investigadores que trabajan dentro del tema.

## Referencias

- Alberto, Á.A., Sugely, L.M.R., Ana, R.L., Eduardo, M.L.H, Carlos, M.B., Emanuel, H.N. (2022) Analysis of *Chrysopogon zizanioides* used as floating treatment wetlands in the removal of heavy metals present in leachate. *Remediation.*, **33**(1), 77-86. <https://doi.org/10.1002/rem.21739>
- Cobbina, S.J., Chen, Y., Zhou, Z., Wu, X., Zhao, T., Zhang, Z., Feng, W., Wang, W., Li, Q., Wu, X., Yang, L. (2015) Toxicity assessment due to sub-chronic exposure to individual and mixtures of four toxic heavy metals. *J. Hazard. Mater.*, vol. **294** 109-120. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.03.057>
- De Oliveira, R.C., Marins, R.V. (2011) Dinâmica de metais-traço em solo e ambiente sedimentar estuarino como um fator determinante no aporte desses contaminantes para o ambiente aquático: revisão. *Rev. Virt. de Quím.*, **3**(2), 88-102. <https://doi.org/10.5935/1984-6835.20110014>
- Debela, A.S., Dawit, M., Tekere, M., Itanna, F. (2022) Phytoremediation of soils contaminated by lead and cadmium in Ethiopia, using *Endod* (*Phytolacca dodecandra* L) *Int. J. Phytoremediation.*, **24**(13), 1339-1349. <https://doi.org/10.1080/15226514.2021.2025336>
- Dias, M.S.D.A., Parente, J.R.F., Vasconcelos, M.IO., Dias, F.A.C. (2014) Intersetorialidade e Estratégia Saúde da Família: tudo ou quase nada a ver?. *Cien Saude Colet.*, vol. **19**(11), 4371-4382. <https://doi.org/10.1590/1413-812320141911.11442014>
- Doghbage, A., Boukerker, H., Abdellatif Belhouadje, F., Nedjimi, B. (2023) Phytoremediation by using *Atriplex halimus* subsp. *Schweinfurthii* as a bio-absorbent of Cadmium in the soil. *Environ. Health Eng. Manag.*, **10**(1), 17-22. <https://doi.org/10.34172/EHEM.2023.02>
- El-Mahrouk, E.M., Eisa, E.A.E., Ali, H.M., Hegazy, M.A.E., Abd El-Gayed, M.E.S. (2020) *Populus nigra* as a phytoremediator for Cd, Cu, and Pb in contaminated soil. *BioRes.*, **15**(1), 869-893. <https://doi.org/10.15376/biores.15.1.869-893>
- Faghih, F., Emadi, M., Sadegh-Zadeh F., Bahmanyar, M.A. (2018) Long-term charcoal-induced changes to soil properties in temperate regions of northern Iran. *J. For. Res.*, **30**, 1063-1071. <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0641-6>
- Gravand, F., Rahnavard, A., Pour, G.M. (2021) Investigation of vetiver grass capability in phytoremediation of contaminated soils with heavy metals (Pb, Cd, Mn, and Ni) *Soil Sediment Contam.*, **30**(2), 163-186. <https://doi.org/10.1080/15320383.2020.1819959>
- Hoseinzadeh, S., Shahabivand, S., Aliloo, A.A. (2017) Toxic metals accumulation in *Trichoderma asperellum* and *T. harzianum*. *Microbiology*, vol. **86**(6), 728-736. <https://doi.org/10.1134/S0026261717060066>
- Jan, S.U., Rehman, M., Gul, A., Fayyaz, M., Rehman, S.U., Jamil, M. (2022) Combined application of two *Bacillus* species enhance phytoremediation potential of *Brassica napus* in an industrial metal-contaminated soil. *Int. J. Phytoremediation*, **24**(6), 652-665. <https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1962797>

- Jin, Z., Deng, S., Wen, Y., Jin, Y., Pan, L., Zhang, Y., Zhang, D. (2019) Application of *Simplicillium chinense* for Cd and Pb biosorption and enhancing heavy metal phytoremediation of soils. *Sci. Total Environ.*, **697**, e134148. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134148>
- Kan, C.A., Meijer, G.A.L. (2007) The risk of contamination of food with toxic substances present in animal feed. *Anim. Feed Sci. Technol.*, **133**(1-2), 84-108. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.08.005>
- Mahmoud, E.K., Ghoneim, A.M. (2016) Effect of polluted water on soil and plant contamination by heavy metals in El-Mahla El-Kobra, Egypt. *Solid Earth*, **7**(2), 703-711. <https://doi.org/10.5194/se-7-703-2016>
- Mendes, K.D.S., Silveira, R.C.C.P., Galvão, C.M. (2008) Revisão integrativa: método de pesquisa para a incorporação de evidências na saúde e na enfermagem. *Texto Cont. Enferm.*, **17**(4), 758-64. <https://doi.org/10.1590/S0104-07072008000400018>
- Moameri, M., Abbasi Khalaki, M. (2019) Capability of *Secale montanum* trusted for phytoremediation of lead and cadmium in soils amended with nano-silica and municipal solid waste compost. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **26**, 24315-24322. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0544-7>
- Mohsenzadeh, F., Shahrokhi, F. (2014) Biological removing of Cadmium from contaminated media by fungal biomass of *Trichoderma* species. *J. environ. health sci. eng.*, vol. **12**(1-7). <https://doi.org/10.1186/2052-336X-12-102>
- Nouri, J., Khorasani, N., Lorestani, B., Karami, M., Hassani, A.H., Yousefi, N. (2009) Accumulation of heavy metals in soil and uptake by plant species with phytoremediation potential. *Environ. Earth Sci.*, **59**, 315-323. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0028-2>
- Orekanti, E.R., Muni, K.M., Devarajan, S.K. (2019) Pilot study on phytoremediation of contaminated soils with different plant species. *J Hazard Toxic Radioact Waste.*, **23**, nº. (4), e04019021. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000462](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000462)
- Ouzzani, M., Hammady, H., Fedorowicz, Z., Elmagarmid, A. (2016) Rayyan—a web and mobile app for systematic reviews. *Syst. Rev.*, **5**, 1-10. <https://doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4>
- Rai, P.K., Lee, S.S., Zhang, M., Tsang, Y.F., Kim, K.H. (2019) Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management. *Environ. Int.*, **125**, 365-385. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.067>
- Rajesh, P., Athiappan, M., Paul, R., Raj, K.D. (2014) Bioremediation of cadmium by *Bacillus safensis* (JX126862), a marine bacterium isolated from mangrove sediments. *Int. j. curr. microbiol. appl. sci.*, **3**(12), 326-335.
- Rehman, M., Liu, L., Wang, Q., Saleem, M.H., Bashir, S., Ullah, S., Peng, D. (2019) Copper environmental toxicology, recent advances, and future outlook: A review. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **26**, 18003-18016. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05073-6>
- Salas-Moreno, M., Marrugo-Negrete, J. (2020) Phytoremediation potential of Cd and Pb-contaminated soils by *Paspalum fasciculatum* Willd. *Ex Flügge. Int J Phytoremediation*, **22**(1), 87-97. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1644291>
- Saleem, M.H., Ali, S., Rehman, M., Hasanuzzaman, M., Rizwan, M., Irshad, Qari, S.H. (2020) Jute: A potential candidate for phytoremediation of metals—a review. *Plants (Basel)*, **9**(2), 258. <https://doi.org/10.3390/plants9020258>
- Sharma, U., Sharma, J.G. (2022) Nanotechnology for the bioremediation of heavy metals and metalloids. *J Appl Biol Biotechnol*, **10**(5), 34-43. <https://doi.org/10.7324/JABB.2022.100504>
- Souza, M.T., Silva, M.D., Carvalho, R. (2010) Revisão integrativa: o que é e como fazer. *Einstein*, **8**(1), 102-106. <https://doi.org/10.1590/s1679-45082010rw1134>
- Su, Y., Sun, S., Liu, Q., Zhao, C., Li, L., Chen, S., Tang, F. (2022) Characterization of the simultaneous degradation of pyrene and removal of Cr (VI) by a bacteria consortium YH. *Sci. Total Environ.*, **853**. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158388>
- Tang, L., Hamid, Y., Zehra, A., Sahito, Z.A., He, Z., Hussain, B., Yang, X. (2019) Characterization of fava bean (*Vicia faba* L.) genotypes for phytoremediation of cadmium and lead co-contaminated soils coupled with agro-production. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **171**, 190-198. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.12.083>

- Wasino, R., Likitlersuang, S., Janjaroen, D. (2019) The performance of vetivers (*Chrysopogon zizanioides* and *Chrysopogon nemoralis*) on heavy metals phytoremediation. *Int J Phytoremediation*, **21**(7), 624-633. <https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1546275>
- Yin, K., Wang, Q., Lv, M., Chen, L. (2019) Microorganism remediation strategies towards heavy metals. *Chem. Eng. J.*, **360**, 1553-1563. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.226>
- Yousefi, Z., Babanejad, E., Mohammadpour, R., Esbokolae, H.N. (2023) Evaluation of Cd phytoremediation by *Portulaca oleracea* irrigated by contaminated water. *Environ. Health Eng. Manag.*, **10**(1), 67-73. <https://doi.org/10.34172/EHEM.2023.08>
- Zhang, X., Li, X., Yang, H., Cui, Z. (2018) Biochemical mechanism of phytoremediation process of lead and cadmium pollution with *Mucor circinelloides* and *Trichoderma asperellum*. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **157**, 21-28. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.047>