



# FITORREMEDIACIÓN DE METALES PESADOS EN AMBIENTES CONTAMINADOS: UNA REVISIÓN.

Daniel Santos Ubaldo, Raúl J. Delgado Macuil, Angélica Romero Rodríguez, Andrés Castro Sierra

Centro de investigación en Biotecnología Aplicada CIBA-IPN. Ex-Hacienda San Juan Molino Carretera Estatal Tecuexcomac-Tepetitla Km 1.5, Tlaxcala C.P. 90700, México.

[dsantosu1900@alumno.ipn.mx](mailto:dsantosu1900@alumno.ipn.mx)

## RESUMEN

Los metales pesados son una gran amenaza para las plantas y los animales, debido a las actividades antropogénicas se han convertido en una preocupación primordial a nivel mundial. Se han desarrollado diferentes metodologías para eliminar la toxicidad de los metales, pero estas técnicas son costosas. Actualmente las investigaciones se centran en desarrollar nuevas tecnologías para la biorremediación que sean novedosas, de fácil aplicación, rentables y que no generen contaminantes para recuperar los ambientes con altos niveles de metales pesados. La fitorremediación es una técnica ecológica en la que se utilizan plantas para reducir las concentraciones de metales pesados en ambientes contaminados, estabilizando el suelo e inhibiendo la movilización de metales en las raíces y las hojas, todo esto con la asociación de microorganismos presentes en el suelo. Además de que esta técnica se realiza in situ, permite la disminución de costos en el transporte y el procesamiento de la muestra.

## ABSTRACT

Heavy metals are a major threat to plants and animals, due to anthropogenic activities they have become a primary concern worldwide. Different methodologies have been developed to eliminate metal toxicity, but these techniques are expensive. Currently, research focuses on developing new technologies for bioremediation that are novel, easy to apply, profitable and do not generate contaminants, to recover environments with high levels of heavy metals. Phytoremediation is an ecological technique in which plants are used to reduce the concentrations of heavy metals in contaminated environments, stabilizing the soil and inhibiting the mobilization of metals in the roots and leaves, all with the association of microorganisms present in the soil. In addition to the fact that this technique is performed in situ, it allows for reduced costs in transportation and sample processing.

Palabras Clave: Metales pesados, fitorremediación, plantas, contaminación

## 1. INTRODUCCIÓN

La superficie terrestre es rica en minerales y nutrientes, de los metales que se han identificado 23 de estos son considerados “metales pesados” elementos con un peso molecular comúnmente entre 63.5-200.6 g mol<sup>-1</sup> y densidad mayor a 5 g cm<sup>-3</sup>, lo que los hace muy tóxicos y difíciles de eliminar de los ambientes contaminados (Shadman et al., 2019; Velusamy et al., 2022). A nivel mundial la contaminación por metales pesados aumenta diariamente,

las actividades como la minería, la agricultura, la industria y los residuos de las zonas urbanas generan gran cantidad de residuos combinados con metales pesados, Figura 1 (Karthik et al., 2021; Pouresmaeli et al., 2022). Naturalmente las plantas requieren de bajas cantidades de algunos metales pesados como Zn<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, para su crecimiento y desarrollo, estos elementos también desempeñan un papel importante en varios procesos fisiológicos, como el sistema de transferencia de electrones en la fotosíntesis, la respiración y actúan como activadores de muchas enzimas conjugadas, sin embargo, altos niveles pueden resultar tóxicos (Kassim et al., 2022; Patra et al., 2020). Por otro lado, algunos metales como Pb<sup>2+</sup>, Hg<sup>2+</sup>, As<sup>3+</sup> y Cd<sup>2+</sup> son considerados tóxicos inclusive en bajas concentraciones lo que puede considerarse como un riesgo grave para las plantas y en general para los seres vivos Figura 2 (Chávez, 2011; Malikula et al., 2022). Los principales mecanismos de los metales pesados en los organismos es la liberación de radicales libres, inhibición enzimática, lesión celular, apoptosis, destrucción del ácido desoxirribonucleico (ADN) y el cambio conformacional de las proteínas (Velusamy et al., 2022). En las plantas a través del sistema radicular que está en contacto con el suelo y el agua, los metales se acumulan en los tejidos de los organismos vivos lo que resulta en bioacumulación. En los animales pueden entrar a través de los alimentos y el agua aumentando sus concentraciones a medida que pasan de los niveles tróficos inferiores a superiores a este fenómeno se le conoce como biomagnificación (Ahmed et al., 2019; Ali, Khan, & Anwar, 2013; Jan et al., 2015). Muchos grupos de trabajo han realizado esfuerzos en reducir la toxicidad de los metales pesados en los ambientes contaminados (Ghughe et al., 2023), sin embargo, son técnicas muy costosas; como un enfoque alternativo la fitorremediación se propone como un método apropiado para la descontaminación y restauración de sitios contaminados con metales pesados, este tipo de tecnologías constan de diferentes pasos fitoextracción, rizofiltración, fitovolatilización y fitoestabilización. Se deben seleccionar plantas con el potencial para descontaminar el suelo y el agua mediante actividad de fitoacumulación, depositando los metales en los sitios rizosféricos, estabilizándolos en la rizosfera y posteriormente translocándolos a las partes aéreas. La biomasa contaminada se recolecta cuando las plantas están maduras.

En consecuencia, los contaminantes se eliminan de los suelos. La biomasa contaminada generalmente se destruye o se convierte en abono o rara vez se reprocesa para su uso posterior (Patra et al., 2020). El presente artículo es una revisión bibliográfica de los métodos de remediación convencionales de suelos contaminados con metales pesados haciendo énfasis en la fitorremediación como técnica alternativa para una biorremediación de bajo costo y amigable con el medio ambiente.



Figura 1. Los metales pesados en el medio ambiente. Modificado de (Mitra et al., 2022).

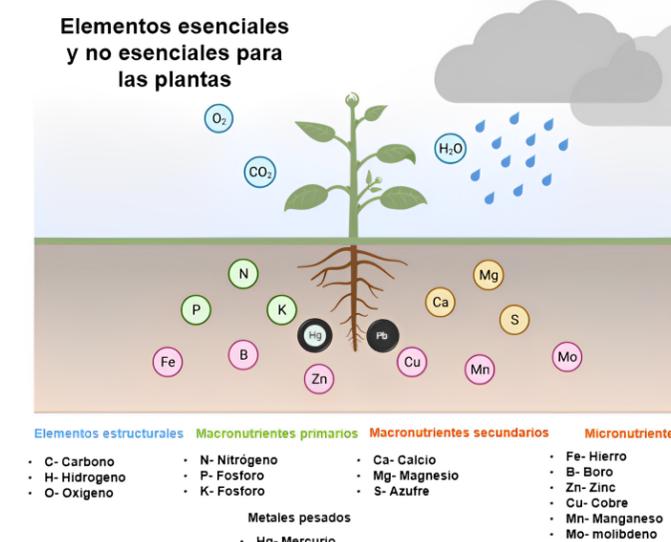


Figura 2. Los elementos esenciales y no esenciales para las plantas (elaboración propia).

## 2. PRINCIPALES FUENTES DE CONTAMINACIÓN DEL SUELO Y EL AGUA

Los metales pesados están presentes en el suelo, el agua, el aire y los alimentos en forma de hidróxidos, óxidos, sulfatos, fosfatos, silicatos y compuestos orgánicos. Los metales pesados se introducen en el medio ambiente principalmente mediante procesos naturales y antropogénicos. Existen diferentes fuentes de liberación de los metales pesados naturales y artificiales. Las fuentes naturales son la lixiviación, la erosión de rocas, incendios forestales, las inundaciones y las erupciones volcánicas (Velusamy et al., 2022). Por otro lado, los procesos antropogénicos son la principal

causa de contaminación por metales pesados, i) por la deposición de las partículas atmosféricas por la combustión de combustóleo, gasolinas y diésel, ii) eliminación de lodos y efluentes de depuradora, por ejemplo, industrias, emisiones de minería y automóviles; iii) los metales pesados del suelo y del aire finalmente también se descargan en los cuerpos de agua a través de la lluvia Figura 3. Cuando se exponen a la luz solar, los metales pesados presentes en el vapor de agua se mezclan con el aire que llega a la tierra durante la precipitación, se deposita en el suelo y los metales se escurren del suelo hacia los diferentes cuerpos de agua, como ríos, mares y lagos (Mohamed et al., 2022).

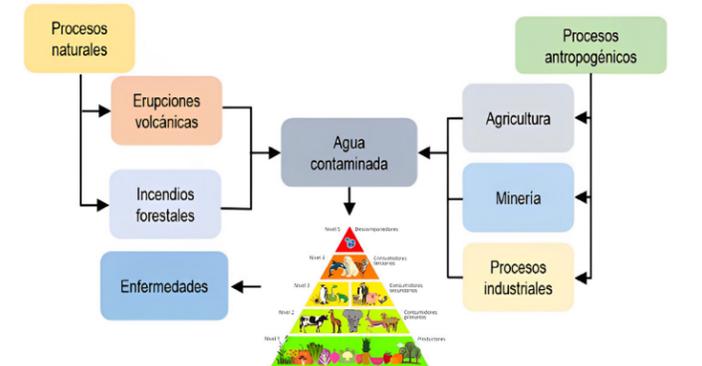


Figura 3. Diferentes fuentes de contaminación natural y antropogénica. Modificado de (Velusamy et al., 2022).

## 3. MÉTODOS CONVENCIONALES PARA EL TRATAMIENTO DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO

El suelo tiene la capacidad de filtrar los contaminantes inclusive a los metales pesados, pero cuando se tiene un problema de contaminación muy severa este ya no es capaz de filtrarlos y lo hace de forma gradual permitiendo así que estos se propaguen y causen un efecto negativo en la salud. Esta problemática ha sido un tema social y político a nivel mundial. Los procesos de remediación para la limpieza de ambientes contaminados puede ser in situ o ex situ, físicos, químicos y biológicos, algunas veces se utilizan en combinación para tener una remediación más económica y eficiente del sitio contaminado, las técnicas de remediación físicas incluyen el reemplazo del suelo, el aislamiento del suelo, la vitrificación y la remediación electrocinética, las técnicas de remediación químicas comprenden a las técnicas de inmovilización, la encapsulación y el lavado de suelos, las técnicas de remediación biológicas se incluyen la fitorremediación donde se implementan varias técnicas como la fitovolatilización, la fitoestabilización, la fitoextracción, en las tablas 1, 2 y 3 se muestran las características ventajas, desventajas y aplicación (Kaur et al., 2022; Lombi & Hamon, 2005). Estas tecnologías además de ser altamente eficientes algunas veces presentan la desventaja de tener altos costos de operación.

Tabla 1 Métodos de remediación física (modificado de Khalid et al., 2017).

Técnicas	Descripción	Ventajas	Desventajas	Aplicación
Remediación física Reemplazo de suelo	Excavación del suelo contaminado y se reemplaza con suelo no contaminado.	Eficaz para sitios altamente contaminados.	Producción de residuos peligrosos.	Limitado a suelos altamente contaminados.
Aislamiento de suelo	Se aísla el suelo contaminado del suelo no contaminado mediante barreras subterráneas.	Previene el transporte de metales pesados fuera del sitio contaminado.	Costosa y aún necesita más métodos de remediación.	Pequeña escala y de corto a largo plazo.
Vitrificación	Reducción de la biodisponibilidad del metal mediante la formación de material vítreo a alta temperatura.	Fácil aplicación se pueden remediar una variedad de contaminantes.	Altos costos debido al requerimiento de energía.	Pequeña escala a largo plazo.
Remediación electrocinética	Eliminación del suelo mediante electroforesis o electromigración mediante la aplicación de voltaje.	Fácil aplicación económicamente eficaz, no altera la naturaleza del suelo.	Requiere suelo con baja permeabilidad, es necesario controlar pH.	Pequeña escala, pero a largo plazo.

Tabla 2 Métodos de remediación química (modificado de Khalid et al., 2017).

Técnicas	Descripción	Ventajas	Desventajas	Aplicación
Remediación Química Inmovilización	Reducción de la movilidad del metal mediante la formación de complejos estables e inmóviles mediante adsorción.	Aplicación rápida y sencilla se pueden remediar un gran número de metales pesados.	Es necesaria una solución temporal y un seguimiento permanente.	Pequeña a mediana escala y a corto plazo.
Lavado de suelos	Eliminación de metales pesados mediante extractantes (orgánicos e inorgánicos), formación de complejos estables y móviles.	Removible, elimina completamente los metales.	Los extractantes del lavado pueden causar problemas ambientales.	Pequeña escala, pero puede ser a largo plazo.
Encapsulación	Inmovilización de metales pesados mediante bloques sólidos manejables.	Altamente eficiente y efectivo.	Altos costos, parches aleatorios de asfalto y concreto.	Pequeña escala y corto plazo.

Tabla 3 métodos de remediación biológica (modificado de Khalid et al., 2017).

Técnicas	Descripción	Ventajas	Desventajas	Aplicación
Remediación Biológica Fitovolatilización	Captación de metales pesados del suelo por parte de las plantas y liberación en forma de vapor a la atmósfera.	Económico y menos disruptivo.	Restringido a metales volátiles, puede causar otros problemas ambientales, no hay control después de la liberación del metal a la atmósfera.	De pequeña a mediana escala y a largo plazo.
Fitobioestabilización	Uso de plantas para disminuir la biodisponibilidad y movilidad de los metales en los suelos mediante el secuestro en las raíces de las plantas.	Económico, menos disruptivo.	Solución temporal, la efectividad varía según el tipo de suelo, planta y metal.	De pequeña a mediana escala y a corto plazo.
Fitoeextracción	Uso de plantas hiperacumuladoras para absorber, trasladar y concentrar metales pesados del suelo a las partes de plantas cosechables sobre el suelo.	Altamente económico, ecológico, menos disruptivo.	La eficacia depende de las condiciones de crecimiento, la tolerancia de la planta y la biodisponibilidad de los metales en el suelo. Las plantas de acumulación de metales son generalmente muy pocas.	A gran escala y a largo plazo.

## 4. FITORREMEDIACIÓN DE AMBIENTES CONTAMINADOS CON METALES PESADOS

La biorremediación es una de las opciones más viables para restablecer la condición natural del suelo mediante el uso de microorganismos y plantas para desintoxicar o eliminar metales pesados es una tecnología rentable, no invasiva y proporciona una solución permanente.

### 4.1 Fitorremediación

La fitorremediación, conocida como botanoremediación, remediación vegetativa, remediación verde o agrorremediación, está basada en el uso de plantas para remediar y revegetar sitios contaminados con metales pesados, el concepto de utilizar plantas acumuladoras de metales pesados se presentó por primera vez en 1983. Considerada una tecnología respetuosa con el medio ambiente, energéticamente eficiente y rentable para limpiar sitios con niveles bajos a moderados de metales pesados esta técnica se ha ido consolidando al grado de aplicarse en la industria mostrando resultados muy prometedores (Ghugue et al., 2023). Para realizar correctamente la fitorremediación se debe hacer un análisis de las propiedades del suelo para así establecer las propiedades químicas y físicas; con la finalidad de evitar demandas sociales, saber la naturaleza de la contaminación, es decir que contaminante se encuentra

presente y establecer su grado de toxicidad, de que fuente surgió la contaminación, los riesgos que puede ocasionar, las condiciones climáticas del área, uso de la tierra, límites de tiempo, aceptación de la comunidad y costos requeridos (Pouresmaeli et al., 2022). Las plantas utilizadas para realizar la fitorremediación deben ser de rápido crecimiento, poseer abundante biomasa, raíces extensas, fáciles de cosechar, fibrosas, fáciles de manipular y que sean altamente tolerantes a los metales pesados (Timalsina et al., 2022). Debido a la naturaleza de los metales, estos no pueden ser descompuestos ni degradados, pero se pueden transformar a un estado de oxidación menos dañino; además podemos calcular la cantidad de metales absorbidos por la planta multiplicando la concentración de contaminantes en tejido de la planta por la cantidad de biomasa formada (Bhargava et al., 2012). Los mecanismos de captación y translocación de los metales pesados varía debido a elementos presentes en el suelo, afectando su enlace con otras macromoléculas, además, factores como la materia orgánica, el pH, la conductividad eléctrica, el potencial redox y la naturaleza catiónica de los metales son atraídos por grupos carboxílicos aniónicos acumulándose en la membrana plasmática facilitando el movimiento hacia el interior de la célula, la mayoría de los metales se absorben pasivamente mediante difusión y flujo de masa a través de la raíz y se secretan en forma de exudados radiculares en el suelo. Metales como el cobre y el zinc se logra mediante procesos regulatorios a través de un sistema bifásico dependiente de ATP y utilizando transportadores de zinc. Procesos activos absorben cromo y plomo acomplejándolos en los exudados radiculares o a través de canales de transporte de calcio. Las hojas también absorben metales como mercurio en forma gaseosa. La absorción de metales pesados se produce a través de las vías de apoplasto y simplasto utilizando varios canales iónicos y transportadores de metales en las raíces, seguido de una mayor translocación a las partes comestibles de la planta a través del xilema y el floema. Los metales penetran el xilema mediante el movimiento simplástico debido al gradiente electroquímico generado mediante la membrana plasmática (Ghugue et al., 2023; Hameed et al., 2016).

### 4.1. Fitoextracción

La fitoextracción es una técnica in situ, amigable con el medio ambiente, es un método comúnmente utilizado para la eliminación de metales en suelos y aguas contaminadas, es mucho más factible que los métodos fisicoquímicos, el nivel de éxito depende de las cantidades de metales presentes en el sitio ya que de eso depende la cantidad de metales que va a absorber la planta. La selección de la planta juega un papel muy importante ya que tiene que ser una planta hiperacumuladora de metales, algunas especies como *Sedum alfredii*, *Phytolacca americana*, *Thlaspi caerulescens* entre otras pueden acumular en sus brotes hasta >100 mg Kg<sup>-1</sup> en la materia seca (Wang et al., 2023). Como resultado, es más adecuado para uso comercial e implica la

siguiente secuencia de procesos : (i) Movilización de metales pesados en la rizósfera, (ii) Absorción por las raíces de las plantas, (iii) iones de metales pesados, translocación de las raíces a las porciones aéreas de la planta, (iv) secuestro y compartimentación de iones de metales pesados en tejidos vegetales figura 4 y es aplicable para la eliminación de metales como Ag, Co, Cu, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Mo, Mn, Zn, As y Se, así como no metales como Boro y radionúclidos como Sr, Cs, y U. Plantas como *Viola baoshanensis*, *Sedum alfredii* y *Rumex crispusson* (Jacob et al., 2018). (González et al., 2011) se puede utilizar la fitoextracción para la remediación de plomo con *Brassica juncea* en sitios cuyo nivel de plomo es menor a 1500 mg/kg. Otro ejemplo importante es *Sedum alfredii* (Crassulaceae) recientemente ha ganado mayor atención como hiperacumulador multimetalico Zinc, plomo y cadmio con un nivel que alcanza alrededor del 2% de peso en los brotes (Khalid et al., 2017). Figura 4

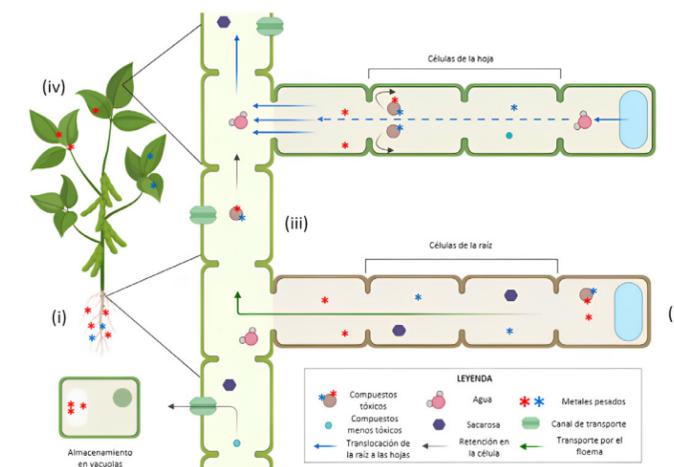


Figura 4. Fitorremediación de ambientes contaminados con metales pesados (modificado de Ghuge et al., 2023).

### 4.2. Rizofiltración

Esta técnica se utiliza para la eliminación de metales tóxicos de ecosistemas acuáticos y terrestres mediante técnicas de adsorción. Se utilizan tanto hidrófitos como mesófitos, pero el más preferible es el mesófito porque tiene un sistema de raíces extenso y fibroso. También se puede aplicar para la eliminación de elementos radiactivos de sitios contaminados. Las técnicas de rizofiltración se pueden utilizar con éxito en Cherbonyl, Ucrania, para la eliminación de cesio y estroncio. La ventaja de esta técnica es la transferencia de metales al sitio rizosférico y su posterior translocación a las partes aéreas de las plantas (Patra et al., 2020; Zhang et al., 2010).

### 4.3. Fitoestabilización

La fitoestabilización es el mecanismo por el cual las plantas restringen la movilidad y biodisponibilidad de los contaminantes por inmovilización (Ansari et al., 2015). La fitoestabilización evita que los metales pesados se acumulen en la biota y se filtren en las aguas subterráneas. Especies de plantas como *Anthyllis vulneraria* y *Festuca arvensis* se

utilizan para reducir la biodisponibilidad de los contaminantes en el suelo (Wani et al., 2017).

### 4.4. Fitofiltración

La fitofiltración se refiere a la eliminación de contaminantes del agua superficial por parte de las plantas en donde los contaminantes son adsorbidos, limitando su flujo al agua subterránea (Ali, Khan, & Sajad, 2013). Abarca la rizofiltración (usando raíces), la blastofiltración (usando plántulas) o la caulofiltración (usando brotes). La rizofiltración es el mecanismo de eliminación de contaminantes en aguas superficiales, aguas subterráneas extraídas o aguas residuales a través de la adsorción o precipitación de los contaminantes en las raíces de ciertas plantas. La rizosfera de la planta o los exudados de las raíces pueden crear entornos biogeoquímicos, lo que da como resultado la precipitación de contaminantes en las raíces. Las briófitas acuáticas como *Monosoleum tenerum* y *Eichhornia crassipes* son plantas novedosas de rápido crecimiento para la remediación de Zn, Cu, Ni, Mn, Fe y Cd mediante fitofiltración (Timalsina et al., 2022).

Diversos trabajos han demostrado la eficacia de estas tecnologías González y colaboradores probaron un quelato biodegradable para mejorar la fitoextracción de cobre por *Oenothera picensis* para remediar suelos contaminados con cobre, utilizando un experimento ex situ el quelato biodegradable (ácido metilglicinodiacético) MGDA se aplicó en cuatro dosis: 0 (control), 2, 6 y 10 mmol de planta<sup>-1</sup>. La aplicación de MGDA aumentó significativamente la producción de biomasa y la concentración foliar, permitiendo un aumento efectivo en la extracción de cobre, de 0.09 mg planta<sup>-1</sup> en el control, a 1.3 mg planta<sup>-1</sup> en los tratamientos de 6 y 10 mmol planta<sup>-1</sup>. Con una tasa de MGDA de 10 mmol planta<sup>-1</sup> la concentración de cobre en el lixiviado de las columnas de 30 cm fue 20 veces mayor que en el control. Para las columnas de 60 cm, la concentración de cobre fue 2 veces mayor que la del control (González et al., 2011). Wu y colaboradores probaron la achicoria *Cichorium intybus* L. para remediar sitios contaminados con cadmio los experimentos hidropónicos y en maceta mostraron que la concentración final de cadmio en las hojas de achicoria fue de 100 mg kg<sup>-1</sup> en maceta y demostraron que no había efectos significativos sobre el crecimiento de la achicoria, concluyendo que esta planta podría aliviar la toxicidad del cadmio en sitios perturbados con altas concentraciones de este metal pesado (Wu et al., 2023).

## 5. CONCLUSIÓN

La contaminación por metales pesados es una preocupación crítica para la producción agrícola y la seguridad alimentaria debido a sus efectos tóxicos y su rápida deposición en el medio ambiente. Es esencial determinar el estándar mínimo y máximo de metales pesados para el agua de

riego y las tierras agrícolas, ya que los metales pesados son micronutrientes esenciales para las plantas, pero tóxicos cuando se exponen a los seres vivos a límites más altos. La fitorremediación se considera un enfoque prometedor para la revegetación de suelos contaminados con metales pesados, con un alto nivel de aceptación pública y varios beneficios sobre otros tratamientos fisicoquímicos. Sin embargo, considerando ciertas limitaciones de las técnicas tradicionales de fitorremediación, como la larga duración de la limpieza de los sitios contaminados, la lenta tasa de crecimiento de los hiperacumuladores y la limitada producción de biomasa, los métodos de mejora son esenciales para una fitorremediación eficiente. Además, para que los metales pesados sean fácilmente absorbidos por la planta se requiere el uso de algunas técnicas como la ingeniería genética y el uso de microbios para mejorar la disponibilidad de los metales pesados en un futuro deberían tomarse en cuenta al momento de elegir un método para la fitorremediación adecuado.

## 6. Agradecimientos

Al CONAHCyT por la beca otorgada con número de registro 896752 a la SIP-IPN por el apoyo otorgado mediante el proyecto SIP-20230938.

## 7. Referencias

Ahmed, S., Shaikh, N., Pathak, N., Sonawane, A., Pandey, V., & Maratkar, S. (2019). An overview of sensitivity and selectivity of biosensors for environmental applications. In *Tools, Techniques and Protocols for Monitoring Environmental Contaminants*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814679-8.00003-0>

Ali, H., Khan, E., & Anwar, M. (2013). Chemosphere Phytoremediation of heavy metals — Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869–881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>

Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869–881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>

Ansari, A. A., Gill, S. S., Gill, R., Lanza, G. R., & Newman, L. (2015). Phytoremediation: Management of environmental contaminants, volume 2. *Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants, Volume 2*, 2, 1–366. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-10969-5>

Bhargava, A., Carmona, F. F., Bhargava, M., & Srivastava, S. (2012). Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. *Journal of Environmental Management*, 105, 103–120. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.04.002>

Chávez, C. (2011). Detección de metales pesados en agua. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, 0, 51–54. <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/>

[bitstream/1009/671/1/ChavezVC.pdf](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131039)

Ghugre, S. A., Chandrakant, G., Sopanrao, U., Suprasanna, P., & Chan, J. (2023). Comprehensive mechanisms of heavy metal toxicity in plants, detoxification, and remediation. *Journal of Hazardous Materials*, 450(December 2022), 131039. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131039>

González, I., Cortes, A., Neaman, A., & Rubio, P. (2011). Chemosphere Biodegradable chelate enhances the phytoextraction of copper by *Oenothera picensis* grown in copper-contaminated acid soils. 84, 490–496. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.03.015>

Hameed, A., Rasool, S., Azooz, M. M., Hossain, M. A., Ahanger, M. A., & Ahmad, P. (2016). HEAVY METAL STRESS: PLANT. In *Plant Metal Interaction*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803158-2.00024-2>

Jacob, J. M., Karthik, C., Saratale, R. G., Kumar, S. S., Prabakar, D., Kadirvelu, K., & Pugazhendhi, A. (2018). Biological approaches to tackle heavy metal pollution: A survey of literature. *Journal of Environmental Management*, 217, 56–70. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.077>

Jan, A. T., Azam, M., Siddiqui, K., Ali, A., & Choi, I. (2015). Heavy Metals and Human Health: Mechanistic Insight into Toxicity and Counter Defense System of Antioxidants. 29592–29630. <https://doi.org/10.3390/ijms161226183>

Karthik, V., Periyasamy, S., J. B. I., & Temesgen, T. (2021). Restoration of Contaminated Agricultural Soils. Springer, 381–401.

Kassim, N. S. A., A. I. S. M. Ghazali, S., Liyana Bohari, F., & A. Z. Abidin, N. (2022). Assessment of heavy metals in wastewater plant effluent and lake water by using atomic absorption spectrophotometry. *Materials Today: Proceedings*, xxxx, 10–13. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.671>

Kaur, K., Chandra, L., Kant, C., & Kumar, M. (2022). Current Research in Microbial Sciences Perspective on the heavy metal pollution and recent remediation strategies. *Current Research in Microbial Sciences*, 3(September), 100166. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2022.100166>

Khalid, S., Shahid, M., Khan, N., Murtaza, B., Bibi, I., & Dumat, C. (2017). A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. *Journal of Geochemical Exploration*, 182, 247–268. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.11.021>

Lombi, E., & Hamon, R. E. (2005). *Lombi, Hamon 2005.pdf. Remediation of Polluted Soils*, 379–385.

Malikula, R. S., Kaonga, C. C., Mapoma, H. W. T., Chiipa, P., & Thulu, F. G. D. (2022). Heavy Metals and Nutrients Loads in Water, Soil, and Crops Irrigated with Effluent from WWTPs in Blantyre City, Malawi. *Water (Switzerland)*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/w14010121>

Mohamed, B. A., Fattah, I. M. R., Yousaf, B., & Periyasamy, S. (2022). Effects of the COVID - 19 pandemic on the environment, waste management, and energy sectors: a deeper look into the long-term impacts. *Environmental Science and Pollution Research*, 46438–46457. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20259-1>

Patra, D. K., Pradhan, C., & Patra, H. K. (2020). Environmental Technology & Innovation Toxic metal decontamination by phytoremediation approach: Concept, challenges, opportunities and future perspectives. *Environmental Technology & Innovation*, 18, 100672. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100672>

Pouresmaeli, M., Ataei, M., Forouzandeh, P., Azizollahi, P., & Mahmoudifard, M. (2022). Recent progress on sustainable phytoremediation of heavy metals from soil. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(5), 108482. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108482>

Shadman, S. M., Daneshi, M., Shafiei, F., Azimimehr, M., Khorasgani, M. R., Sadeghian, M., Motaghi, H., & Mehrgardi, M. A. (2019). Aptamer-based electrochemical biosensors. In *Electrochemical Biosensors*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816491-4.00008-5>

Timalsina, H., Gyawali, T., Ghimire, S., & Paudel, S. R. (2022). Potential application of enhanced phytoremediation for heavy metals treatment in Nepal. *Chemosphere*, 306(May), 135581. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135581>

Velusamy, K., Periyasamy, S., Kumar, P. S., Rangasamy, G., Nisha, J. M., Ramaraju, P., Mohanasundaram, S., & Vo, D. N. (2022). Biosensor for heavy metals detection in wastewater: A review. *Food and Chemical Toxicology*, 168(May), 113307. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2022.113307>

Wang, Y., Zhou, T., Wang, W., Zhao, J., Li, Z., Ge, Y., Wang, Z., Wu, L., & Christie, P. (2023). Science of the Total Environment Phytoextraction of highly cadmium-polluted agricultural soil by *Sedum plumbizincicola*: An eight-hectare field study. *Science of the Total Environment*, 905(July), 167216. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167216>

Wani, R. A., Ganai, B. A., Shah, M. A., & Uqab, B. (2017). Heavy Metal Uptake Potential of Aquatic Plants through Phytoremediation Technique - A Review. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, 08(04). <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000404>

Wu, S., Yang, Y., Qin, Y., Deng, X., & Zhang, Q. (2023). *Cichorium intybus* L. is a potential Cd-accumulator for phytoremediation of agricultural soil with strong tolerance and detoxification to Cd. *Journal of Hazardous Materials*, 451(March), 131182. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131182>

Zhang, S., Chen, M., Li, T., Xu, X., & Deng, L. (2010). A newly found cadmium accumulator — *Malva sinensis* Cavan. 173(August 2007), 705–709. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.08.142>