

FITORREMEDIACIÓN EN CUERPOS DE AGUA

CONTAMINADOS POR METALES PESADOS

PHYTOREMEDIATION IN BODIES OF WATER CONTAMINATED BY HEAVY METALS

María Santos Pedraza Guevara¹

serviciosmarisan@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6913-4643>

¹ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil.

Pág. 61-78

RECIBIDO

[10/07/2021]

ACEPTADO

[24/08/2021]

PUBLICADO

[31/08/2021]



RESUMEN

El presente artículo recopila información de las técnicas de fitorremediación en cuerpos de agua por diferentes especies de plantas, su acumulación de metales pesados, ventajas y desventajas, a partir de diversos estudios de investigación. Se hizo una búsqueda bibliométrica en tres bases de datos y en el referenciador Zotero. La búsqueda arrojó un total de 90 artículos, de los cuales 61 fueron validados, sin embargo, solo 43 se citaron tomando en cuenta tanto la relevancia del área como la temática. Se encontró que las plantas acuáticas, para desarrollarse, son capaces de captar metales a través de diversos mecanismos, entre los cuales se encuentran: la fitovolatilización y fitoextracción, efectuadas a través de su parte aérea; la rizofiltración y fitoestabilización, realizadas desde la raíz hacia la parte inferior; la fitofiltración, que es otro mecanismo para tratamiento de aguas residuales por macrófitas y desarraigadas de cultivos hidropónicos que luego son reubicados a corrientes acuosas. La tasa de crecimiento rápido y la capacidad de tolerancia dependerán de la especie, la temperatura y el pH para la bioacumulación de los metales. *Lantana camara* puede eliminar hasta 88,93 % de Pb, *Cyperus alternifolius* tiene niveles de absorción de Zn (5 %), Cd (6 %), Al (13 %) y Pb (14 %). La *V unguiculada* absorbe 72 % de iones de Cu y 92 % de iones de Cd. La ventaja es el

<https://bit.ly/3Dz68al>

poder de limpieza a bajo coste, no utiliza reactivos químicos peligrosos ni afecta la estructura del agua. Se realiza en el lugar afectado, por ende, es una técnica ecológica amigable con el medioambiente.

PALABRAS CLAVE

Fitorremediación,
Cuerpos de Agua, Contaminación,
Metales Pesados, Minería

ABSTRACT

This article compiles information on phytoremediation techniques in water bodies by different plant species, their accumulation of heavy metals, advantages and disadvantages, based on various research studies. A bibliometric search was carried out in three databases and in the Zotero reference. The search yielded a total of 90 articles, of which 61 were validated, however, only 43 were cited taking into account both the relevance of the area and the topic. It was found that aquatic plants, for their development, are capable of capturing metals through various mechanisms, among which are: phytovolatilization and phytoextraction, carried out through their aerial part; the rhizofiltration and phytostabilization, carried out from the root towards the bottom; phytofiltration, which is another mechanism for the treatment of wastewater by macrophytes and uprooted from hydroponic crops that are later relocated to aqueous streams. The rapid growth rate together and the tolerance capacity will depend on the species, the temperature and the pH for the bioaccumulation of the metals. Lantana camara can eliminate up to 88.93 % of Pb, Cyperus alternifolius has absorption levels of Zn (5 %), Cd (6 %), Al (13 %) and Pb (14 %). Unguiculate V absorbs 72 % of Cu ions, and 92 % of Cd ions. The advantage is the cleaning power at low cost, it does not use dangerous chemical reagents, nor does it affect the structure of the water. It is carried out in the affected place, by hence, it is an environmentally friendly ecological technique.

KEYWORDS

Phytoremediation, Polluted
Water Bodies, Heavy Metal,
Contamination, Mining

INTRODUCCIÓN

La fitorremediación es una técnica ecológica para remediar zonas contaminadas, que implica la eliminación de metales pesados del suelo y del agua (Kumar *et al.*, 2018; Özyiğit & Doğan, 2014) usando diversas especies de plantas para purificar el medio acuático (Khalid *et al.*, 2021). Los metales no se pueden degradar, pero sí reducir de su forma altamente tóxica a una menos tóxica. Una alternativa emergente es la fitorremediación a través de los microorganismos, biomasa o plantas vivas, que sirven para limpiar lugares contaminados (Ansari *et al.*, 2020; Jadia & Fulekar, 2009). Esta técnica se emplea con el objetivo de remediar aquellos suelos que han sufrido los efectos adversos de la acción humana.

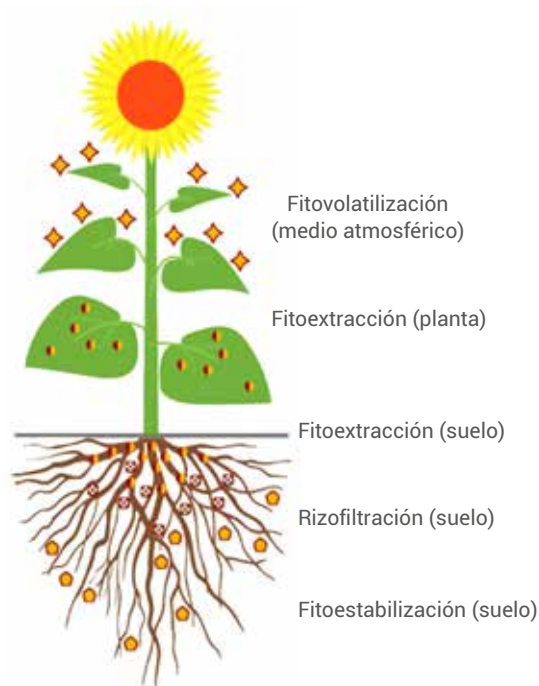
Existen diferentes métodos para fitorremediar suelos y aguas contaminadas por metales pesados. En esta investigación se propuso como objetivo central realizar un estudio de fitorremediación para cuerpos de aguas, con presencia de la fisiología y la bioquímica de las plantas, por absorción, transporte y secuestro de los metales.

Fitorremediación

La Figura 1 muestra un esquema gráfico de las técnicas de fitorremediación que realizan las plantas: la fitovolatilización, la fitoextracción, la rizofiltración y la fitoestabilización; las plantas absorben los contaminantes y los dispersan a lo largo de su estruc-

tura (Özyiğit & Doğan, 2014). Las plantas tienen una peculiar hiperacumulación que luego les permite eliminar los metales pesados de las raíces al secuestrarlos en los tejidos de hojas tolerantes; se pueden eliminar del cuerpo de la planta al desprenderse del órgano aéreo de alto contenido de metal (Rascio & Navari-Izzo, 2011). Asimismo, las plantas cumplen un papel importante porque acumulan concentraciones de metales pesados en las hojas, tienen una tolerancia/eliminación de metales, resisten a sequías y son una interferencia contra los enemigos naturales.

Figura 1.
Esquema de los métodos de fitorremediación



Nota. Tomado de Özyiğit & Doğan (2014)

A continuación, se mencionan conceptos clave acerca de los procesos de fitorremediación, los cuales cumplen funciones muy específicas. Estos son:

<https://bit.ly/3Dz68aI>

Fitovolatilización

Es una técnica usada por la familia *Brassicaceae*, como la *Brassica juncea* (mostaza india). Esta planta terrestre acumula y volatiliza de manera muy eficiente (McGrath *et al.*, 2002).

Fitoextracción

Esta técnica consiste en la captación/absorción y traslocación de contaminantes de metales tóxicos y metaloides por las raíces, y en su transporte y acumulación hacia las otras partes aéreas de las plantas (Özyiğit & Doğan, 2014; Tangahu *et al.*, 2011). Pueden acumular niveles de metales de 100 a 1000 veces más altos que otras plantas normales (Rascio & Navari-Izzo, 2011).

Rixofiltración

Consiste en la remoción de contaminantes de los cuerpos de agua, por precipitación, absorción o acumulación en la biomasa vegetal (Kumar *et al.*, 2017; Kumar *et al.*, 2018). Las raíces absorben contaminantes del agua, principalmente Pb, y corrientes de desechos acumulados en la biomasa vegetal. Al reducir el pH, aumenta la solubilidad del As en el agua, que luego es absorbido por las raíces de la planta *P. tremula* (Rascio & Navari-Izzo, 2011).

Fitoestabilización

Cabe destacar que la contaminación de los suelos puede convertirse en contaminación de los cuerpos de agua

por lixiviación, por eso, plantas como *Erica australis*, *Erica andevalensis* y las del género *Juncus* spp., mediante la fitoestabilización en los suelos por el sistema radicular, pueden absorber y acumular, en su masa radicular, hasta llegar a las otras partes del tallo y hojas (Pérez-López *et al.*, 2014). Por otro lado, varias de las especies *Juncus* sp. tienen el potencial de acumular metales en sus raíces, de tal forma que impiden la traslocación a las partes aéreas rizo-sedimento y se aumenta, así, la concentración en la rizósfera. Reducen la biodisponibilidad de metales en el suelo a través de la biomasa subterránea, es decir, la raíz (Syranidou *et al.*, 2017).

Por último, en la fitofiltración, asociada, principalmente, al tratamiento de aguas residuales, las plantas (macrófitas flotantes y desarraigadas) se cultivan primero en cultivos hidropónicos y, después de su desarrollo de sistemas de raíces, son reubicadas en las corrientes acuosas o arroyos contaminados (Sharma *et al.*, 2015). Mientras el agua se mueve a las raíces, los metales disueltos en esta también se moverán hacia la superficie de la raíz. Las células son bloqueadas por barreras de membrana celular, la cual inmoviliza los contaminantes a la superficie de las células de la raíz (prospección *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2011). El ambiente de temperatura y el pH influyen, en gran medida, para la bioacumulación de metales pesados.

La remediación en las plantas se puede realizar a través de mecanismos según

diferentes partes de la planta y según la procedencia de los contaminantes (Tangahu *et al.*, 2011). Es la remoción de contaminantes de los cuerpos de agua por precipitación, absorción o acumulación en la biomasa vegetal (Kumar *et al.*, 2017; Kumar *et al.*, 2018). Las raíces

absorben contaminantes del agua, normalmente Pb, y corrientes de desechos acumulados en la biomasa vegetal. Al reducir el pH, aumenta la solubilidad del As en el agua, que luego es absorbido por las raíces de la planta *P. tremula* (Rascio & Navari-Izzo, 2011).

Tabla 1.

Técnicas de fitorremediación: ventajas y desventajas

Técnica	Ventaja	Desventaja	Referencia
Biorremediación de la rizósfera	Es un método rentable y ecológico, es autosuficiente para eliminar los contaminantes. La rizósfera mejora la biodegradación, aplicable para suelos, lodos de sedimentos, aguas subterráneas.	Las raíces de crecimiento son lentas por el pH.	Kumar <i>et al.</i> (2018); Rungwa <i>et al.</i> (2013)
Fitodegradación	Es el desglose enzimático de contaminantes, aplicable al suelo, lodos sedimentarios, aguas subterráneas y aguas superficiales.	Dependerá de diversos factores de concentración, como las especies de plantas y condiciones del suelo.	Kumar <i>et al.</i> (2018)
Fitoextracción	Las plantas y las raíces indican un mecanismo interno de tolerancia al metal de desintoxicación.	No todas las especies son tolerantes.	Khalid <i>et al.</i> (2021); Nouri <i>et al.</i> (2009)
Fitovolatilización	Aplicable a aguas subterráneas, suelos, sedimentos, lodos. Ejemplo, las plantas <i>Scirpus robustus</i> , <i>Typha latifolia</i> .	Hay desventaja para algunos metales radiactivos nucleares	McGrath <i>et al.</i> (2002)
Fitofiltración	Aguas contaminadas por uranio.	Dificultad para producir resultados del laboratorio al campo debido a la temperatura. Los nutrientes en la solución impactan en el crecimiento de las plantas.	Pratas <i>et al.</i> (2014)
Fitoestabilización	Se pueden remediar los lodos, suelos, sedimentos.	Aplicable solo para suelos con textura fina.	Kumar <i>et al.</i> (2017); Leung <i>et al.</i> (2013); Pérez-López <i>et al.</i> (2014)

<https://bit.ly/3Dz68aI>

Métodos y procedimientos

Esta investigación se desarrolló con una bibliometría y empleando las palabras clave respectivas (fitorremediación, cuerpos de agua contaminados, metales pesados, contaminación y minería) en las tres principales bases

de datos: Scopus, Science Direct y Web of Science, de donde se obtuvieron 90 artículos, los cuales se sometieron a un análisis. De estos se consideraron 61; sin embargo, en esta investigación se optó por hacer referencia a solo 43 artículos, según el referenciador Zotero versión 5.0.

Figura 2.

Referenciador bibliográfico de Zotero y las revistas extraídas

Título	Creador
> Influence of <i>Sporosarcina pasteurii</i> SRMNP1 on the growth of plants under metal stress and its potential...	Abilash et al.
> The significant contribution of mycorrhizal fungi and earthworms to maize protection and phytoremedi...	Aghababaei et al.
> Lantana camara—An Ecological Bioindicator Plant for Decontamination of Pb-Impaired Soil Under Orga...	ALARIBE y AGAMUTHU
> Application of floating aquatic plants in phytoremediation of heavy metals polluted water: a review	Ali et al.
> Phytoremediation of contaminated waters: An eco-friendly technology based on aquatic macrophytes ...	Ansari et al.
> Bioavailability of arsenic and antimony in terrestrial ecosystems: a review	Bagherifam et al.
> Nutritional aspects of essential trace elements in oral health and disease: an extensive review	Bhattacharya et al.
> Efficiency of constructed wetlands in decontamination of water polluted by heavy metals	Cheng et al.
> Bioremoval of trace metals from rhizosediment by mangrove plants in Indian Sundarban Wetland	Chowdhury et al.
> Chapter 26 Contaminants in the rootzone: Bioavailability, uptake and transport, and their implications f...	Clothier et al.
> Phytoremediation potential of <i>Arundo donax</i> (Giant Reed) in contaminated soil by heavy metals	Cristaldi et al.
> Phytoremediation of arsenite-contaminated environments: is <i>Pistia stratiotes</i> L. a useful tool?	de Campos et al.
> Chapter 10 - Role of redox system in enhancement of phytoremediation capacity in plants	Emam et al.
> Dynamics of dissolved heavy metals in reservoir bays under different hydrological regulation	Hao et al.
> Chapter 16 - Arsenic Toxicity in Plants and Possible Remediation	Hasanuzzaman et al.
> Phytoremediation of heavy metals: recent techniques	Jadia y Fulekar
> Chapter 20 - Phytoremediation of Cadmium-Polluted Water/Sediment by Aquatic Macrophytes: Role o...	Javed et al.
> Chapter 18 - <i>Prosopis juliflora</i> : A Potential Plant for Mining of Genes for Genetic Engineering to Enhanc...	Keeran et al.
> Advances in fungal-assisted phytoremediation of heavy metals: A review	KHALID et al.
> Trace element behaviour at the root-soil interface: Implications in phytoremediation	Kidd et al.
> Plant mediated detoxification of mercury and lead	Kumary et al.
> Mechanistic understanding and holistic approach of phytoremediation: A review on application and fut...	Kumar Yadav et al.
> Interactions Between Arbuscular Mycorrhizae and Plants in Phytoremediation of Metal-Contaminated S...	LEUNG et al.
> Cadmium removal from water by hydrophytes and its toxic effects	Li et al.
> Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: progresses and perspectives	Lone et al.
> Analytical tools for monitoring arsenic in the environment	Luong et al.
> Chapter 6 - Cadmium Contamination in Water and Soil	Mahmood et al.
> An overview of carcinogenic pollutants in groundwater of India	Malyan et al.
> Phytoremediation of metals, metalloids, and radionuclides	McGrath et al.
> Accumulation of heavy metals in soil and uptake by plant species with phytoremediation potential	Nouri et al.
> Global inventory of natural and anthropogenic emissions of trace metals to the atmosphere	Nriagu
> Plant-microbe interactions in phytoremediation	Özyiğit y Doğan
> The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: Implications for the food chain	Peralta-Videa et al.
> <i>Erica andevalensis</i> and <i>Erica australis</i> growing in the same extreme environments: Phytostabilization po...	Pérez-López et al.
> Potential of aquatic plants for phytofiltration of uranium-contaminated waters in laboratory conditions	Pratas et al.
> Heavy metal pollution in aquatic ecosystems and its phytoremediation using wetland plants: an ecosus...	Rai
> Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesti...	Rascio y Navari-Izzo
> Chronic methyl mercury poisoning may trigger endemic pemphigus foliaceus "fogo selvagem"	Robledo
> Phytoremediation—an eco-friendly and sustainable method of heavy metal removal from closed mine e...	Rungwa et al.
> Chapter 4 - Phytoremediation: Mechanisms and Adaptations	Sabir et al.
> Phytoremediation: role of terrestrial plants and aquatic macrophytes in the remediation of radionuclide...	Sharma et al.
> Aquatic plants for phytostabilization of cadmium and zinc in hydroponic experiments	Sricoth et al.
> Chapter 16 - Microbial systems as a source of novel genes for enhanced phytoremediation of contamin...	Srivastava et al.
> Anatomical, biochemical and morphological responses of poplar <i>Populus deltoides</i> clone Lux to Zn exc...	Stoláriková-Vaculíková et al.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Las principales especies de plantas acuáticas como eficientes fitorremediadoras son *Azolla*, *Eichhornia*, *Lemna*, *Potamogeton*, *Spirodela*,

Wolffia y *Wolffiallahan*, que logran este proceso gracias a la bioacumulación de contaminantes en sus tejidos corporales (Ansari *et al.*, 2020). En la siguiente tabla, se muestran las principales plantas fitorremediadoras y la acumulación de metales pesados.

Tabla 2.

Principales especies de plantas acuáticas y su acumulación de metales pesados

Nombre científico	Nombre común	Metales	Fotografía	Referencia
<i>Lantana camara</i>	Cinco negritos	Pb		Alaribe y Agamutho (2019)
<i>Eichhornia crassipes</i>	Jacinto de agua común	Pb, Hg, Cu, Cr, Ni, Zn		Ali <i>et al.</i> (2020); Khalid <i>et al.</i> (2021)
<i>Elodea canadensis</i>	Peste de agua	Cd		Tariq <i>et al.</i> (2014)
<i>Cyperus alternifolius</i>	Planta sombrilla, planta paraguas	Al, Cu, Mn, Zn, Cd, Cu, Pb, Zn		Cheng <i>et al.</i> (2002)
<i>Sonneratia apetala/ Avicennia officinalis</i>	Sonneratia alba	Mn, Fe, Zn, Cu, Co, Ni		Chowdhury <i>et al.</i> (2017)
	Sauces y álamos	Cd, B		Clothier <i>et al.</i> (2008)
<i>Pistia stratiotes L</i>	Yerba acuática, lechuga de agua	As, Pb, Cd		(2019); Kumar <i>et al.</i> (2018); Sharma <i>et al.</i> (2015)
<i>Ricinus communis L.</i>	Higuerilla	Cd		Khalid <i>et al.</i> (2021)

<https://bit.ly/3Dz68al>

<i>Ipomoea aquatica</i>	Espinaca de agua	Cr		Ansari et al. (2020)
<i>Isoetes taiwanensis</i>	Helecho juncal	Cd		Ansari et al. (2020); Li et al. (2005)
<i>Echinodorus cordifolius</i>	Reina mármol	Cd y Zn		Ansari et al. (2020); Sricoth et al. (2018)
<i>Lemna minor</i> L.	Lenteja de agua	Pb, Cd		Ansari et al. (2020); Kumar et al. (2018)
<i>Spirodela polyrhiza</i> L.	Lenteja de agua	As		Zhang et al. (2011)
<i>Potamogeton crispus</i> L. (leaves)	Rizos de agua	Cd		Keeran et al. (2019)
<i>P. juliflora</i>	Algarrobo	Cu		Keeran et al. (2019)
<i>Azolla pinnata</i> R.BR	Helecho mosquito	Cr, Hg y Cd		Sharma et al. (2015)
<i>Callitriche stagnalis</i> Scop	Estrella de primavera	Uranio		Pratas et al. (2014)
<i>Typha laxmannii</i> , <i>Typha latifolia</i>	Totora, chuspata, cola de gato	Cd, Cu, Ni, Pb y Zn		Rai (2008); Sharma et al. (2015)
<i>Hydrocotyle umbellata</i> L.	Ombbligo de Venus	Cr, Zn, Na y Cu		Sharma et al. (2015)

<i>Ceratophyllum demersum</i> L.	Hojas de agua, bejuquillo, cola de zorro o pinito de agua	Pb y Cr		Zhang <i>et al.</i> (2011)
<i>benghalensis</i> L.	Judío errante	Pb, Cd y Zn		Sharma <i>et al.</i> (2015)
<i>Vetiveria zizanioides</i> (L.) Roberty	Pasto	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se y Zn		Sharma <i>et al.</i> (2015)
<i>Trifolium repens</i> L.	Trébol blanco	Cd, Zn y Pb		Sharma <i>et al.</i> (2015)
<i>Lepidium sativum</i> L.	Berro hortelano o de jardín	Pb y As		Sharma <i>et al.</i> (2015)
<i>Juncus spp.</i>	Junco	Fe, Hg, Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn		Syranidou <i>et al.</i> (2017)

Los principales metales pesados son Cd, Cr, Cu, Pb, Co, Hg, Ni y Zn, que representan una amenaza para los recursos hídricos y del suelo; asimismo, según la OMS, traen problemas para la salud, como el cáncer, el asma o enfermedades de la piel (Nouri *et al.*, 2009). De acuerdo al sexto objetivo de desarrollo sostenible (ODS) de la agenda 2030, se propuso garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua para los seres humanos (Hao *et al.*, 2021). En rangos de concentración esencial de metales pesados en los sistemas biológicos, se necesitan Fe, Co, Mn, Mo y Zn con el fin del buen funcionamiento fisiológico y bioquímico del cuerpo (Bhattacharya *et*

al., 2016; Kumar *et al.*, 2018); otros metales como Hg, Pu (plutonio), Cd y Pb son tóxicos para el organismo. La presencia de ocho metales pesados, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Cd y Pb, disueltos en el embalse de agua en Danjiangkou 2015-2019 (Hao *et al.*, 2021), y en concentraciones excesivas, pueden provocar efectos perjudiciales. Otros metales pesados como el mercurio (Hg), plutonio (Pu), cadmio (Cd) y plomo (Pb) son tóxicos y no tienen ningún efecto beneficioso sobre el organismo (Kumar *et al.*, 2017; Tchounwou *et al.*, 2012). Las descargas de aguas residuales en un lago con presencia de Cu, Zn y Pb fueron de 45 %, 30 % y 50 %, respectivamente. El 20 % de

<https://bit.ly/3Dz68aI>

Cu, 35 % de Zn y 50 % de Pb se originaron en las cuencas de captación de agua del lago (Nriagu, 1979; Rai, 2008).

Las plantas como fitorremediadoras de cuerpos de agua

Las plantas desarrollan diferentes estrategias para mantener niveles de metales esenciales como el Cu, Fe, Mo, Mn y Zn dentro del rango fisiológico (Emam *et al.*, 2021), así como son capaces de obtener nutrientes. En cuanto a agentes quelantes y cambios de pH inducidos por las plantas y la reacción de redox, las raíces son capaces de solubilizar y absorber micronutrientes en niveles muy bajos en el suelo, incluyendo de precipitados casi insolubles. Por otro lado, se han desarrollado mecanismos específicos para trasladar y almacenar micronutrientes. A este proceso se le conoce como captación, traslocación y almacenamiento de elementos tóxicos; por esa capacidad, es de interés para la fitorremediación (Tangahu *et al.*, 2011). Sin embargo, el As, Cd, Hg y Pb no tienen funciones fisiológicas (Emam *et al.*, 2021).

El pH es fundamental para la estabilidad de los metales en las plantas, pero también dependen del tipo de metal, como los hidropónicos por *Elodea canadensis*, que pueden absorber niveles de Cd (0,5 μM) en las paredes celulares. La acumulación de metal aumentará a medida que incremente el pH celular, que se debe a la competencia de metales e iones de hidrógeno en el sitio de acumulación (Javed *et al.*, 2019).

El agua

El agua es un recurso hídrico que es el sustento de las civilizaciones. Desafortunadamente, se ve afectada por la contaminación, por causas naturales o actividades antropogénicas (Lone *et al.*, 2008). Por su parte, la minería contamina el medioambiente, y el suelo es un sumidero, afectado por los metales pesados. Frente a ello, la planta *Lantana camara* elimina el Pb entre 45,51 % y 88,93 % en suelos con residuos orgánicos y frutas, y entre 23,7 % y 57,8 % en suelos libres de residuos (Alaribe & Agamuthu, 2019).

Del mismo modo, la descontaminación en aguas residuales por metales pesados es realizada por la *Cyperus alternifolius*, que alcanza niveles de absorción de 5 % en Zn, de 6 % en Cd, de 13 % en Al y 14 % en Pb (Cheng *et al.*, 2002). La acumulación del arsénico en la raíz de las plantas acuáticas de la variedad *Pistia stratiotes* puede ser un mecanismo de defensa; su expresión será reducir el volumen radicular. Disminuye la tasa de crecimiento porque aumenta la actividad enzimática; se observa clorosis (De Campos *et al.*, 2019; Kumar *et al.*, 2018).

Por otro lado, la *Eichhornia crassipes* es una planta prometedora para la limpieza de aguas residuales, principalmente con contenido de Cr, Cd, Ni y Cu, gracias al sistema extenso de raíces (rizofiltración). Otras plantas como la *Echinodorus cordifolius*, que absorbe de metales como el Cd y Zn y reduce el crecimiento, disminuye la altura de

la planta y la longitud de las raíces por clorosis (Ansari *et al.*, 2020; Sricoth *et al.*, 2018). La *Ipomonea aquatica* aumenta el grosor de la raíz, pero disminuye el tamaño por la absorción de Cr (Ansari *et al.*, 2020). En la *Isoetes taiwanensis* se inhibe el crecimiento de las raíces y los brotes por Cd (Ansari *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2005); en el caso de la *Lemna minor* L., por presencia de Pb y Cd, se reduce la actividad enzimática y se disminuye la actividad fotosintética, la clorofila y el crecimiento de raíces y brotes (Ansari *et al.*, 2020; Kumar Yadav *et al.*, 2018). La *Sonneratia apetala* absorbe hasta 1376,7 mg kg⁻¹ de Mn y 25,89 mg kg⁻¹ de Zn (Chowdhury *et al.*, 2017).

La contaminación por metales pesados se presenta también en el suelo y llega a los cuerpos de agua. Estudios muestran que la planta *Lantana camara* elimina el Pb entre 45,51 % y 88,93 % en suelos con residuos orgánicos y frutas, y entre 23,7 % y 57,8 % en suelos libres de residuos (Alaribe & Agamuthu, 2019).

La contaminación del agua por metales pesados

La contaminación del agua por metales pesados se debe principalmente a eventos antropogénicos (Kumar *et al.*, 2018); proviene, por ejemplo, de los subproductos de las actividades industriales, la minería, residuos y aguas residuales, derrame de petróleo, agroquímicos (insecticidas, pesticidas o uso excesivo de fertilizantes), actividades domésticas y ganaderas, y contaminantes inorgánicos (Emam *et*

al., 2021; Lone *et al.*, 2008). Es un riesgo para la salud humana, para los animales, plantas y todo el ecosistema, pues puede ingresar a los organismos mediante la ingesta, la absorción por las plantas, por la cadena alimentaria y el consumo de agua contaminada (Cristaldi *et al.*, 2020; Emam *et al.*, 2021; Kumar *et al.*, 2018). Sin embargo, la contaminación puede verse afectada debido a eventos naturales, como la lixiviación, la mineralización, la erosión o la erupción volcánica (Kumar *et al.*, 2018).

La contaminación de metales pesados en cuerpos de agua y en el campo agrícola se debe a la industria minera y los fertilizantes químicos, por la lixiviación. La *V unguiculada* absorbe un 72 % de iones de Cu y un 92 % de iones de Cd, según estudios realizados en maceta contaminada con los metales, mientras que en presencia de bioinoculante, la maceta acumuló alrededor del 67 % entre cobre y cadmio (Abilash *et al.*, 2018). Las plantas nativas para fitorremediación difieren de la especie y el metal (Nouri *et al.*, 2009). Los metales se acumulan en los tejidos de las raíces, pero en los brotes de las plantas podrían acumular una concentración tóxica por encima de lo recomendado (Nouri *et al.*, 2009).

Cadmio (Cd) como contaminante en el agua

El agua de los ríos contamina el suelo mediante el riego, las inundaciones o el vertido de sedimentos (Mahmood *et al.*, 2019). Los metales pesados, tanto el

<https://bit.ly/3Dz68aI>

Cd como el Cr, Pb, Al y Hg, son contaminantes dañinos del agua al ser ingeridos sobre los límites permitidos (Claire-Lise & Nathalie, 2012).

Arsénico (As) como contaminante

Es un metaloide con preocupación ambiental por su toxicidad. Se dispersa en el agua a través de la desintegración de las rocas y minerales, y la lixiviación. En países como Bangladesh, China, Hungría e India, el As se encuentra en altas concentraciones en el agua subterránea (Luong *et al.*, 2007; Peralta-Videa *et al.*, 2009). Los cuerpos de agua se contaminan y, por ende, llegan al agua potable ya contaminados. De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS), el arsénico en el agua potable, según los límites permitidos, debe ser de 10 µg L⁻¹ (Bagherifam *et al.*, 2019; Peralta-Videa *et al.*, 2009).

Tanto el cadmio como el arsénico, así como el cromo, el plomo y el mercurio, tienen efectos agudos, producen náuseas, vómitos, diarrea, neuropatía dolorosa; en su etapa crónica, producen diabetes, cáncer al pulmón, vejiga y piel. En concentraciones tóxicas, se puede alcanzar 24 h: ≥ 50 µg/L o 100 µg/g de creatinina para arsénico. Por otra parte, el cadmio produce cáncer del pulmón crónico y osteomalacia. Es tóxico en valores superiores a ≥ 15 µg/g (Peralta-Videa *et al.*, 2009).

Estudios han revelado que, además del arsénico y el cadmio, el plomo, el radón y los pesticidas son los principales

cancerígenos en las aguas subterráneas de la India. La fuente subterránea del cromo se debe a la contaminación industrial o fuentes naturales; este produce cáncer en el estómago. Los plaguicidas son producto de la escorrentía, los efluentes industriales y el uso de desinfectantes. Afectan al hígado, la vesícula biliar y el sistema respiratorio. En cambio, el uranio se produce por sedimentos y centrales nucleares; también puede causar cáncer (Malyan *et al.*, 2019; Pratas *et al.*, 2014).

Uranio (U) como contaminante

El uranio es un elemento radiactivo de origen natural, representa el 10 % de la corteza terrestre. La presencia de este elemento tiene dos fuentes: la antropogénica, que es la producción de fertilizantes fosfatados, y la molienda de uranio de la fabricación de armas nucleares y combustibles en plantas de energía nuclear. El uranio llega al agua subterránea desde los sedimentos por lixiviación; desde el agua subterránea ingresa a la cadena alimentaria y causa toxicidad en varios niveles tróficos a valores superiores a 0,1 (µg L⁻¹) (Malyan *et al.*, 2019). La planta *P. natans*, por fitofiltración, absorbe uranio de 3,46 a 270,9

CONCLUSIÓN

Las plantas tienen la capacidad de eliminar iones de nutrientes de metales pesados de cuerpos de agua contaminada; es por eso que se usa potencialmente la fitorremediación como una técnica verde amigable con

el medioambiente. Las principales plantas acuáticas fitorremediadoras de diversos metales pesados son *Lantana camara*, *Eichhornia crassipes*, *Elodea canadensis*, *Pistia stratiotes* L, *Lemna minor* L., *Azolla pinnata* R.BR, *Juncus* spp. Se estima que pueden limpiar efluentes industriales, efluentes de la acuicultura, ya que, además, las plantas necesitan de metales en su biomasa, lo que dependerá de la especie y del metal pesado. Las plantas de humedades son herramientas importantes para la remoción de metales pesados, principalmente el Hg y el Cd, dado que el agua de los ríos contiene Cd, Cr, Pb, Hg y Zn en su composición.

La única desventaja del método de fitorremediación consiste en la lentitud del proceso según la técnica, ya que todas las especies no son tolerantes; por ejemplo, para la fitoextracción, la fitodegradación es aplicable a suelos, sedimentos de lodos y aguas superficiales, pero esto dependerá de diversos factores, como la temperatura y el pH.

Por rizofiltración, las plantas son más eficientes; además, es aplicable para aguas subterráneas. El plomo se acumula en las raíces debido a algunas barreras fisiológicas contra

el transporte de metales a las partes aéreas, mientras que otros metales como el Cd se transportan fácilmente en las plantas. La fitovolatilización es más aplicable a metales radiactivos nucleares; la fitoestabilización, para lodos, sedimentos contaminados, pero con textura fina. En cambio, la fitofiltración absorbe más uranio, pero hay dificultad por las condiciones de los nutrientes y la temperatura.

Los recursos hídricos subterráneos se pueden contaminar por lixiviación del suelo o la superficie del agua. Al crecer las plantas en tierras contaminadas, controlan la migración de contaminantes por absorción de grandes volúmenes de agua superficial contaminada. A su vez, las raíces de diversas especies de plantas son profundas, por lo que evitan la contaminación de aguas superficiales. Existen sistemas vegetativos ribereños que sirven de barreras hidráulicas y controlan la migración de contaminantes. Estudios futuros deberían enfocarse en la prospección de diversas especies de plantas en peligro de extinción y la ingeniería genética para la conservación biológica, así como la creación de áreas de fitorremediación, para, de esa manera, ayudar en el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible.

REFERENCIAS

- Abilash, N., Reddy Gsumanth, K., Mohamed, A. & Arul Jothi, K. N. (2018). Influence of *Sporosarcina pasteurii* SRMNP1 on the growth of plants under metal stress and its potential application in bioremediation of Cadmium and Copper polluted soil. *Research Journal of Biotechnology*, 13(6), 60-66.

<https://bit.ly/3Dz68aI>

- Alaribe, F. & Agamuthu, P. (2019). Lantana camara - An ecological bioindicator plant for decontamination of Pb-Impaired soil under organic waste-supplemented scenarios. *Pedosphere*, 29(2), 248-258. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60365-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60365-5)
- Ali, S., Abbas, Z., Rizwan, M., Zaheer, I., Yavaş, İ., Ünay, A., Abdel-Daim, M., Bin-Jumah, M., Hasanuzzaman, M. & Kalderis, D. (2020). Application of floating aquatic plants in phytoremediation of heavy metals polluted water: A review. *Sustainability*, 12(5), 1-33. <https://doi.org/10.3390/su12051927>
- Ansari, A., Naeem, M., Gill, S. & AlZuaibr, F. (2020). Phytoremediation of contaminated waters: An eco-friendly technology based on aquatic macrophytes application. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 46(4), 371-376. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2020.03.002>
- Bagherifam, S., Brown, T., Fellows, C. & Naidu, R. (2019). Bioavailability of Arsenic and Antimony in Terrestrial Ecosystems: A Review. *Pedosphere*, 29(6), 681-720. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(19\)60843-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(19)60843-X)
- Bhattacharya, P., Misra, S. & Hussain, M. (2016). Nutritional aspects of essential trace elements in oral health and disease: An extensive review. *Scientifica*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/5464373>
- Cheng, S., Grosse, W., Karrenbrock, F. & Thoennessen, M. (2002). Efficiency of constructed wetlands in decontamination of water polluted by heavy metals. *Ecological Engineering*, 18(3), 317-325. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(01\)00091-X](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(01)00091-X)
- Chowdhury, R., Favas, P., Jonathan, M., Venkatachalam, P., Raja, P. & Sarkar, S. K. (2017). Bioremoval of trace metals from rhizosediment by mangrove plants in Indian Sundarban Wetland. *Special Issue: Hong Kong Conference 2016*, 124(2), 1078-1088. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.047>
- Claire-Lise, M. & Nathalie, V. (2012). The use of the model species *Arabidopsis halleri* towards phytoextraction of cadmium polluted soils. *Frontiers and Challenges in the Bioremediation of Contaminated Sites*, 30(1), 9-14. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2012.07.009>
- Clothier, B., Green, S., Robinson, B., Thayalakumaran, T., Scotter, D., Vogeler, I., Mills, T., Deurer, M., Van der Velde, M. & Granel, T. (2008). Chapter 26 Contaminants in the rootzone: Bioavailability, uptake and transport, and their implications

- for remediation. En A. E. Hartemink, A. B. McBratney & R. Naidu (Eds.), *Developments in Soil Science* (Vol. 32, pp. 633-655). [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(07\)32026-6](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(07)32026-6)
- Cristaldi, A., Conti, G., Cosentino, S., Mauromicale, G., Copat, C., Grasso, A., Zuccarello, P., Fiore, M., Restuccia, C. & Ferrante, M. (2020). Phytoremediation potential of *Arundo donax* (Giant Reed) in contaminated soil by heavy metals. *Environmental research*, 185. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109427>
- De Campos, F., De Oliveira, J., Da Silva, A., Ribeiro, C. & Dos Santos, F. (2019). Phytoremediation of arsenite-contaminated environments: Is *Pistia stratiotes* L. a useful tool? *Ecological Indicators*, 104, 794-801. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.04.048>
- Emam, M., Khattab, H., Morsy, A., Salama, K. & Mansour, M. (2021). Chapter 10 - Role of redox system in enhancement of phytoremediation capacity in plants. En M. Hasanuzzaman & M. N. V. Prasad (Eds.), *Handbook of Bioremediation* (pp. 165-193). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819382-2.00010-7>
- Hao, R., Yin, W., Jia, H., Xu, J., Li, N., Chen, Q., Zhong, Z., Wang, J. & Shi, Z. (2021). Dynamics of dissolved heavy metals in reservoir bays under different hydrological regulation. *Journal of Hydrology*, 595, 126042. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126042>
- Jadia, C. & Fulekar, M. (2009). Phytoremediation of heavy metals: Recent techniques. *African journal of biotechnology*, 8(6), 921-928. <https://bit.ly/3BnBUGx>
- Javed, M., Tanwir, K., Akram, M., Shahid, M., Niazi, N. & Lindberg, S. (2019). Chapter 20 - Phytoremediation of cadmium-polluted water/sediment by aquatic macrophytes: Role of plant-induced pH changes. En M. Hasanuzzaman, M. Prasad & M. Fujita (Eds.), *Cadmium toxicity and tolerance in plants* (pp. 495-529). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814864-8.00020-6>
- Keeran, N., Balasundaram, U., Govindan, G. & Parida, A. (2019). Chapter 18 - *Prosopis juliflora*: A potential plant for mining of genes for genetic engineering to enhance phytoremediation of metals. En M. Prasad (Ed.), *Transgenic plant technology for remediation of toxic metals and metalloids* (pp. 381-393). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814389-6.00018-3>

<https://bit.ly/3Dz68al>

- Khalid, M., Ur-Rahman, S., Hassani, D., Hayat, K., Zhou, P. & Hui, N. (2021). Advances in fungal-assisted phytoremediation of heavy metals: A review. *Pedosphere*, 31(3), 475-495. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(20\)60091-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(20)60091-1)
- Kumar, B., Smita, K. & Flores, L. C. (2017). Plant mediated detoxification of mercury and lead. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, 2335-2342. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.08.010>
- Kumar, K., Gupta, N., Kumar, A., Reece, L., Singh, N., Rezaia, S. & Ahmad, S. (2018). Mechanistic understanding and holistic approach of phytoremediation: A review on application and future prospects. *Ecological Engineering*, 120, 274-298. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.05.039>
- Leung, H.-M., Wang, Z.-W., Ye, Z.-H., Yung, K.-L., Peng, X.-L. & Cheung, K.-C. (2013). Interactions between arbuscular mycorrhizae and plants in phytoremediation of metal-contaminated soils: A Review. *Pedosphere*, 23(5), 549-563. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(13\)60049-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60049-1)
- Li, H., Cheng, F., Wang, A. & Wu, T. (2005). *Cadmium removal from water by hydrophytes and its toxic effects*. Proceeding of the international symposium of phytoremediation and ecosystem health, Hangzhou, China.
- Lone, M., He, Z., Stoffella, P. & Yang, X. (2008). Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: Progresses and perspectives. *Journal of Zhejiang University Science B*, 9(3), 210-220.
- Luong, J., Majid, E. & Male, K. (2007). Analytical tools for monitoring arsenic in the environment. *The Open Analytical Chemistry Journal*, 1(1), 7-14. <https://doi.org/10.2174/1874065000701010007>
- Mahmood, Q., Asif, M., Shaheen, S., Hayat, M. & Ali, S. (2019). Chapter 6 - Cadmium contamination in water and soil. En M. Hasanuzzaman, M. Prasad & M. Fujita (Eds.), *Cadmium toxicity and tolerance in plants* (pp. 141-161). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814864-8.00006-1>
- Malyan, S., Singh, R., Rawat, M., Kumar, M., Pugazhendhi, A., Kumar, A., Kumar, V. & Kumar, S. (2019). An overview of carcinogenic pollutants in groundwater of India. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101288>

- McGrath, S., Zhao, J. & Lombi, E. (2002). Phytoremediation of metals, metalloids and radionuclides. En *Advances in Agronomy* (pp. 1-56). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(02\)75002-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)75002-5)
- Nouri, J., Khorasani, N., Lorestani, B., Karami, M., Hassani, A. & Yousefi, N. (2009). Accumulation of heavy metals in soil and uptake by plant species with phytoremediation potential. *Ciencias Ambientales de la Tierra*, 59(2), 315-323. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0028-2>
- Nriagu, J. (1979). Global inventory of natural and anthropogenic emissions of trace metals to the atmosphere. *Nature*, 279(5712), 409-411. <https://doi.org/10.1038/279409a0>
- Özyiğit, İ. & Doğan, İ. (2014). Plant-microbe interactions in phytoremediation. En *Soil remediation and plants prospects and challenges book - 2015*. Elsevier Ltd. <https://gcris.iyte.edu.tr/bitstream/11147/6821/1/6821.pdf>
- Peralta-Videa, J., Lopez, M., Narayan, M., Saupe, G. & Gardea-Torresdey, J. (2009). The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: Implications for the food chain. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology*, 41(8), 1665-1677. <https://doi.org/10.1016/j.biocel.2009.03.005>
- Pérez-López, R., Márquez-García, B., Abreu, M., Nieto, J. & Córdoba, F. (2014). Erica andevalensis and Erica australis growing in the same extreme environments: phytostabilization potential of mining areas. *Geoderma*, 230-231, 194-203. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.004>
- Pratas, J., Paulo, C., Favas, P. & Venkatachalam, P. (2014). Potential of aquatic plants for phytofiltration of uranium-contaminated waters in laboratory conditions. *Ecological Engineering*, 69, 170-176. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.046>
- Rai, P. (2008). Heavy metal pollution in aquatic ecosystems and its phytoremediation using wetland plants: An ecosustainable approach. *International Journal of Phytoremediation*, 10(2), 133-160. <https://doi.org/10.1080/15226510801913918>
- Rascio, N. & Navari-Izzo, F. (2011). Heavy metal hyperaccumulating plants: how and why do they do it? and what makes them so interesting? *Plant Science*, 180(2), 169-181. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.08.016>

<https://bit.ly/3Dz68al>

- Rungwa, S., Arpa, G., Sakulas, H., Harakuwe, A. & Timi, D. (2013). Phytoremediation - an eco-friendly and sustainable method of heavy metal removal from closed mine environments in Papua New Guinea. *Procedia Earth and Planetary Science*, 6, 269-277. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2013.01.036>
- Sharma, S., Singh, B. & Manchanda, V. (2015). Phytoremediation: Role of terrestrial plants and aquatic macrophytes in the remediation of radionuclides and heavy metal contaminated soil and water. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(2), 946-962. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3635-8>
- Sricoth, T., Meeinkuirt, W., Saengwilai, P., Pichtel, J. & Taeprayoon, P. (2018). Aquatic plants for phytostabilization of cadmium and zinc in hydroponic experiments. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(15), 14964-14976. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1714-y>
- Syranidou, E., Christofilopoulos, S. & Kalogerakis, N. (2017). *Juncus* spp. - The helophyte for all (phyto)remediation purposes? EBC-VI: Recent Advances in Environmental Biotechnology, 38, 43-55. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2016.12.005>
- Tangahu, B., Sheikh Abdullah, S., Basri, H., Idris, M., Anuar, N. & Mukhlisin, M. (2011). A review on heavy metals (As, Pb and Hg) uptake by plants through phytoremediation. *International Journal of Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2011/939161>
- Tariq Javed, M., Lindberg, S. & Greger, M. (2014). Cellular proton dynamics in *Elodea canadensis* leaves induced by cadmium. *Plant Physiology and Biochemistry*, 77, 15-22. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.01.009>
- Tchounwou, P., Yedjou, C., Patlolla, A. & Sutton, D. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. En A. Luch (Ed.), *Molecular, clinical and environmental toxicology: Volume 3: environmental toxicology* (pp. 133-164). Springer Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6
- Zhang, X., Hu, Y., Liu, Y. & Chen, B. (2011). Arsenic uptake, accumulation and phytofiltration by duckweed (*Spirodela polyrrhiza* L.). *Journal of Environmental Sciences*, 23(4), 601-606. [https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(10\)60454-8](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(10)60454-8)