

Humedales construidos con plantas ornamentales para la eliminación de metales pesados en aguas residuales: una revisión sistemática

Jazmín Alejandra Segovia Cano *, Luis Carlos Sandoval-Herazo

Laboratorio de Humedales y Sostenibilidad Ambiental, División de Estudios de Posgrado e Investigación. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Veracruz, Km 1.8 Carretera a Loma del Cojolite, Misantla 93821, Veracruz, México

* Autor de correspondencia: ale.segoviacao@gmail.com; Tel.: 2281717852

Desarrollo Sustentable (Humedales naturales y construidos)

Recibido: 22 de agosto de 2025

Aceptado: 2 de octubre de 2025

Publicado: 15 de febrero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.623>

Resumen: Los metales pesados en aguas residuales representan una amenaza crítica para la salud pública y los ecosistemas acuáticos debido a su toxicidad, persistencia y bioacumulación. En los últimos años, los humedales construidos (HC) con plantas ornamentales han emergido como una alternativa sostenible y estéticamente atractiva para su eliminación. Esta revisión sistemática analiza estudios publicados entre 2020 y 2025 sobre la capacidad de remoción de metales pesados (Cd, Pb, Zn, Cr, Ni, Cu, Hg) mediante HC que emplean especies ornamentales. La búsqueda de información se realizó en bases de datos (Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, MDPI) seleccionando estudios con criterios de inclusión relacionados con el tipo de metal, configuración del humedal y parámetros operativos. Los resultados muestran que especies como *Canna indica*, *Heliconia psittacorum*, *Chrysopogon zizanioides* e *Iris ssp.* alcanzan eficiencias superiores al 80% para Cd, Zn y Pb en condiciones controladas, destacándose la influencia del diseño del humedal (flujo vertical, subsuperficial, islas flotantes) y del tiempo de retención hidráulica en el desempeño. Además, el uso de especies ornamentales añade beneficios paisajísticos, sociales y económicos, favoreciendo su implementación en contextos urbanos y turísticos. Sin embargo, se identificaron vacíos de investigación, incluyendo la falta de estudios a escala real, la ausencia de estandarización en el reporte de datos y la gestión segura de la biomasa contaminada. En conclusión, los HC con plantas ornamentales constituyen una tecnología prometedora y multifuncional para el tratamiento de aguas residuales con metales pesados, aunque su consolidación requerirá investigación aplicada, optimización de diseño y políticas de apoyo que impulsen su adopción a gran escala.

Palabras clave: Fitorremediación; metales pesados; plantas ornamentales; aguas residuales; humedales construidos

Evaluation of heavy metal removal capacity in wastewater using constructed wetlands with ornamental plants: a systematic review

Abstrac: Heavy metals in wastewater pose a critical threat to public health and aquatic ecosystems due to their toxicity, persistence, and bioaccumulation. In recent years, constructed wetlands (CW) with ornamental plants have emerged as a sustainable and aesthetically appealing alternative for their disposal. This systematic review analyzes studies published between 2020 and 2025 on the removal capacity of heavy metals (Cd, Pb, Zn, Cr, Ni, Cu, Hg) by CWs using ornamental species. The information search was conducted in databases (Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, MDPI) selecting studies with inclusion criteria related to the type of metal, wetland configuration and operational parameters. The results show that species such as *Canna indica*, *Heliconia psittacorum*, *Chrysopogon zizanioides*, and *Iris ssp.* achieve efficiencies greater than 80% for Cd, Zn, and Pb under controlled conditions, highlighting the influence of wetland design (vertical flow, subsurface flow, floating islands) and hydraulic retention time on performance. Furthermore, the use of ornamental species adds landscape, social, and economic benefits, favoring their implementation in urban and tourism contexts. However, research gaps were identified, including a lack of full-scale studies, a lack of standardization in data reporting, and the safe management of contaminated biomass. In conclusion, HC with ornamental plants constitutes a promising and multifunctional technology for the treatment of wastewater containing heavy metals, although its consolidation will require applied research, design optimization, and supportive policies that promote its large-scale adoption.

Keywords: Phytoremediation; heavy metals; ornamental plants; wastewater; constructed wetlands

Introducción

El agua es un recurso primario para la presencia de vida en la tierra y el acceso al agua limpia es crítico para los humanos y el ecosistema. Sin embargo, durante las últimas décadas la calidad del agua se ha visto influenciada negativamente por una población en continuo aumento, una rápida industrialización, una creciente urbanización y una utilización descuidada de los recursos naturales (Carolin *et al.*, 2017; Vardhan *et al.*, 2019; Agrawal *et al.*, 2021). La materia orgánica, los nutrientes, los productos farmacéuticos y de cuidado personal, las sustancias polifluoroalquilo y

perfluoroalquilo, los biocidas, los metales pesados, los tintes, los radionucleidos, los plásticos, las nanopartículas y los patógenos se encuentran entre los contaminantes de mayor preocupación (Villarín y Merel, 2020a)

La presencia de metales pesados en aguas residuales constituye una de las problemáticas ambientales más críticas a nivel mundial debido a su alta toxicidad, persistencia y capacidad de bioacumulación en organismos vivos, comúnmente estos contaminantes provienen de actividades antropogénicas (Filote *et al.*, 2021; Abd Elnabi *et al.*, 2023; Edo *et al.*, 2024; Meftah *et al.*, 2025), sin embargo, de acuerdo con el Departamento de Energía, (2018), se ha demostrado que los metales pesados se encuentran presentes en las aguas residuales provienen de diversas fuentes; como detergentes, alimentos, cosméticos, agua del grifo, sudor y polvo, y se descargan como aguas residuales del lavabo, la cocina, la lavandería y el baño, lo cual representa un riesgo significativo para la salud humana y los ecosistemas acuáticos, al alterar procesos biogeoquímicos y comprometer la calidad del recurso hídrico (Ablankar *et al.*, 2025).

En este contexto, los humedales construidos han emergido como una alternativa ecológica para el tratamiento de aguas residuales, destacándose por su bajo costo de operación, mínima demanda energética y capacidad para integrar procesos físicos, químicos y biológicos en la depuración del agua (Prol, 2020). La incorporación de plantas ornamentales en estos sistemas ha cobrado relevancia en los últimos años, no solo por su potencial en la fitorremediación de metales pesados, sino también por los beneficios estéticos, socioeconómicos, la adaptación a ambientes contaminados y la capacidad de acumular este tipo de contaminantes en sus tejidos (Marín Giraldo *et al.*, 2020).

Sin embargo, a pesar de los avances reportados, la literatura científica sobre el desempeño de humedales construidos con plantas ornamentales en la eliminación de metales pesados aún presenta vacíos importantes. Existen variaciones significativas en cuanto a especies utilizadas, diseño del sistema, condiciones operativas, tipos de metales removidos y parámetros de eficiencia, lo que dificulta la comparación de resultados y la generación de conclusiones generalizables (Castañeda Díaz, S. R., & Díaz Alaya, E. 2024)., en este sentido, se hace necesaria una revisión sistemática que compile, analice y sintetice la información disponible, identificando tendencia, limitaciones y perspectivas futuras de investigación.

El presente artículo tiene como objetivo evaluar el estado del arte en la capacidad de eliminación de metales pesados en aguas residuales mediante humedales construidos con plantas ornamentales, con el fin de aportar un marco de referencia que oriente futuras investigaciones y promueva la implementación de soluciones sostenibles en el tratamiento de aguas residuales contaminadas por metales pesados.

Materiales y Métodos

La presente revisión sistemática se diseñó a través de la metodología PRISMA (Figura 1) con el objetivo de recopilar, analizar y sintetizar la evidencia científica sobre la capacidad que tienen las plantas ornamentales para la eliminación de metales pesados en aguas residuales mediante humedales construidos. Para garantizar un procesos transparente y reproducible, se establecieron fases metodológicas específicas: búsqueda bibliográfica, selección de estudios, extracción y análisis de datos y síntesis de resultados.

Búsqueda bibliográfica

Se realizó una búsqueda estructurada en las bases de datos Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed / MEDLINE y SpringerLink, complementada con la literatura técnica disponible en Google Scholar y repositorios de organismos ambientales. La búsqueda incluyó artículos publicados entre los años 2020-2025, utilizando términos clave en inglés y español relacionados con el tema: constructed wetlands, ornamental plants, heavy metals, phytoremediation, wastewater treatment, humedales construidos, plantas ornamentales, metales pesados, tratamiento de aguas residuales.

Por lo que se presentan las cadenas de búsqueda:

("constructed wetland" OR "constructed wetlands" OR "constructed wetland*" OR "CW" OR "artificial wetland*" OR "constructed wetland*")

AND ("ornamental plant*" OR "ornamental species" OR "ornamental macrophyte*" OR "Canna" OR "Heliconia" OR "Alpinia" OR "Hedychium" OR "garden plant*")

AND ("heavy metal*" OR "metals" OR "lead" OR "cadmium" OR "chromium" OR "zinc" OR "copper" OR "nickel" OR "mercury")

AND ("wastewater" OR "effluent" OR "industrial wastewater" OR "municipal wastewater" OR "leachate"))

AND (PublicationDate >= 2020).

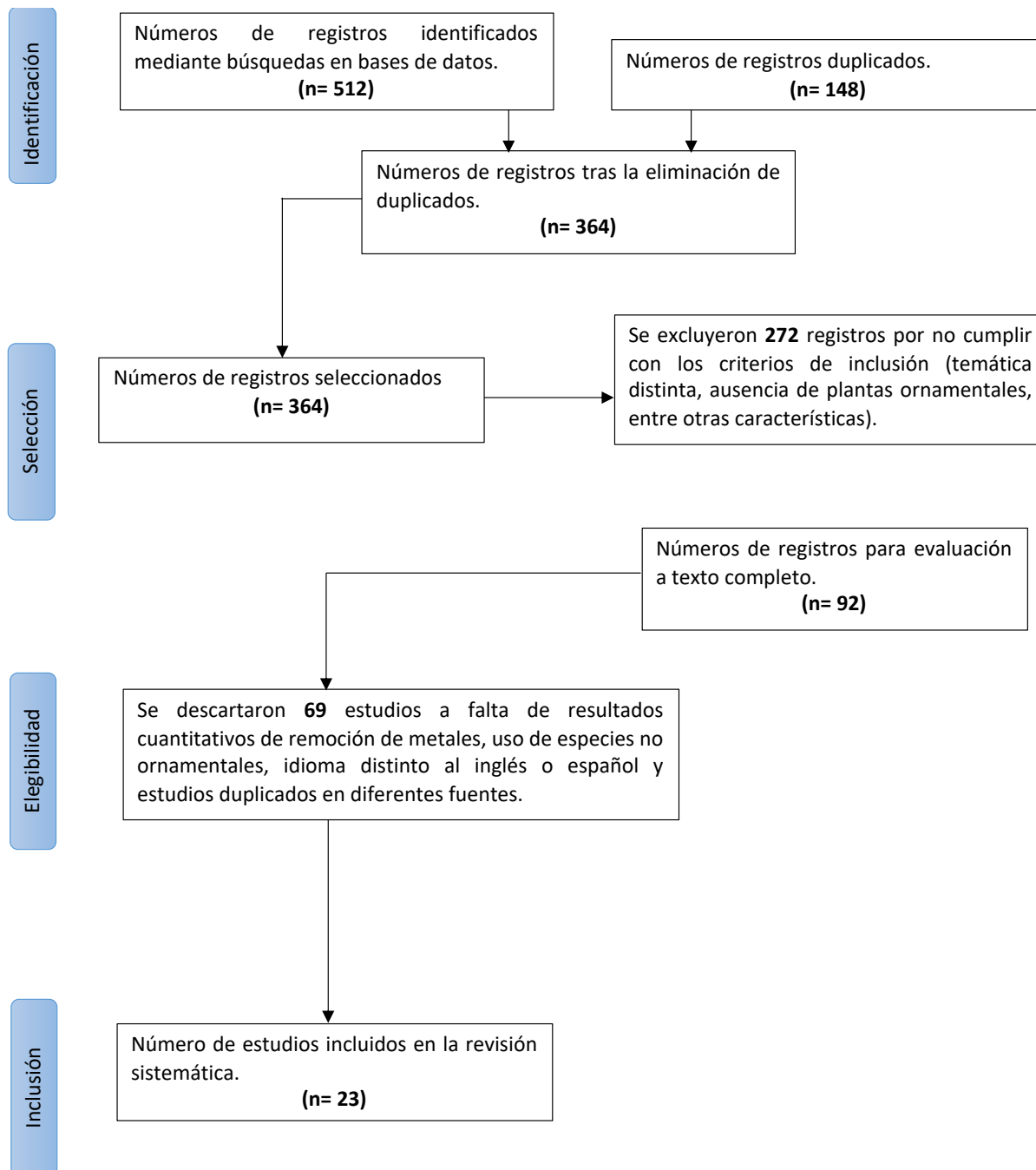


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA

Criterios de selección

Se incluyeron únicamente estudios que evaluaran humedales construidos de flujo superficial, flujo vertical, flujo superficial libre, subsuperficial o híbridos para el tratamiento de aguas residuales, utilizaran al menos una especie de plantas ornamentales y reportaran resultados cuantitativos sobre la eliminación o bioacumulación de metales pesados

como; Cd, Pb, Cr, Zn, Ni, Cu y Hg, se excluyeron publicaciones sin acceso a texto completo, revisiones narrativas y documentos en idiomas distintos al inglés o español.

Extracción y análisis de datos

Para cada estudio incluido, se extrajo información relativa; país/tipo de agua, configuración, tipo de estudio, especie ornamental, metales pesados, metales evaluados, tiempo de retención hidráulica, porcentaje de remoción, densidad de plantación y manejo, tipo de sustrato, tipo de afluente, tiempo de seguimiento, factores ambientales, evaluación de riesgo de sesgo y resultados (concentraciones del efluente, % remoción por metal, acumulación por tejido y factores ambientales relevantes. Los datos se organizaron en matrices comparativas y se analizaron de manera descriptiva, destacando tendencias, factores determinantes de eficiencia y brechas en la investigación.

Síntesis de resultados

La información se integró mediante tablas resumen, identificando relaciones entre especies vegetales, diseño del humedal y eficiencia de remoción. Finalmente, se elaboró una discusión crítica sobre las ventajas, limitaciones y perspectivas futuras de los humedales construidos con plantas ornamentales para la eliminación de metales pesados.

Resultados y Discusión

La revisión de la literatura contempla estudios del 2020 al 2025 que evaluaron el desempeño de humedales construidos con plantas ornamentales en la eliminación de metales pesados en aguas residuales, la mayoría de los estudios se concentraron en regiones tropicales y subtropicales, principalmente en Asia y América Latina, debido a la disponibilidad de especies ornamentales adaptadas a altas cargas contaminantes y condiciones climáticas variables.

Tendencias en las especies ornamentales utilizadas

Las especies más empleadas fueron *Canna indica*, *Heliconia psittacorum*, *Zantedeschia aethiopica* y *Chrysopogon zizanioides*, destacadas por su alta tolerancia a ambientes contaminados y su capacidad para acumular metales en raíces y rizomas. Se observó que las especies con sistemas radiculares densos favorecen procesos de sedimentación y adsorción, aumentando la eficiencia del sistema. Algunos estudios reportaron eficiencias de remoción superiores al 80% para cadmio y Zinc utilizando *Canna indica*, mientras que *Chrysopogon zizanioides*, mostró valores cercanos al 70% para plomo y níquel.

Influencia del diseño y operación del humedal

El tipo de flujo del humedal influye significativamente en la remoción de metales. Los sistemas de flujo subsuperficial presentaron mejores resultados en la retención de metales debido a la mayor interacción agua-sustrato-planta, en comparación con los sistemas de flujo superficial. Asimismo, tiempos de retención hidráulica superiores a 5 días y el uso de sustratos con alta capacidad de intercambio catiónico se asociaron con incrementos en la eficiencia de eliminación.

Mecanismos predominantes de eliminación

Los mecanismos identificados incluyen precipitación química, adsorción en sustratos, acumulación en tejidos vegetales y procesos microbianos asociados a la rizosfera. La bioacumulación en raíces fue particularmente relevante, indicado el papel central de las plantas ornamentales no solo como componentes estéticos, sino también como agentes activos en la depuración de contaminantes. Sin embargo, varios estudios subrayan la necesidad de gestionar adecuadamente la biomasa cosechada para evitar la reintroducción de metales al ambiente.

Limitaciones y vacíos de investigación

A pesar de los resultados positivos, se detectaron limitaciones importantes: la mayoría de los estudios se realizaron a escala piloto, con poca información sobre el desempeño a largo plazo en condiciones reales, por otra parte, existe

escasa estandarización en los métodos de medición de metales y en los criterios de diseño, pocos trabajos analizan el destino final de los metales acumulados y la viabilidad económica del uso de especies ornamentales a gran escala.

Perspectivas futuras

La integración de humedales ornamentales con otros procesos de tratamiento, como, por ejemplo; biofiltros y sistemas anaerobios, y la selección de especie nativas de alto valor ornamental y fitorremediador se perfilan como líneas de investigación prioritarias (Sánchez-Tovar *et al.*, 2025). Además, el desarrollo de modelos predictivos que integren variables hidrológicas, químicas y biológicas podrían optimizar el diseño y operación de estos sistemas.

Tabla 1. Capacidad de eliminación de metales pesados en aguas residuales mediante humedales construidos con plantas ornamentales

Estudio (año)	País/Tipo de agua	Configuración del HC	Especie ornamental	Metales evaluados	HTR/Carga (si aplica)	Remoción (%) por metal	Observaciones clave
Boulaaras <i>et al.</i> , 2022	Argelia / Efluente de refinería	VF-SSFCW (LECA + arena)	<i>Canna indica</i>	Zn, Cd, (Cr, Cu, Fe, Pb, Al, Ni analizados)	HRT no especificado en resumen; operación continua	Zn: 96.5%; Cd: 93.5% (promedios; > control)	Desempeño superior al control no plantado; removió N y metales con alta eficacia.
Phewnil <i>et al.</i> , 2023	Tailandia / Aguas municipales (AFD)	D SSFCW de laboratorio ato	<i>Heliconia psittacorum</i> vs. <i>Canna indica</i>	Pb, Cd (bioacumulación)	Ensayo alternante llenado-vaciado	NA (remoción en agua no reportada); alta acumulación de Pb y Cd en raíces de <i>Heliconia</i>	<i>Heliconia</i> mostró mayor acumulación radicular; utilidad como “sumidero” de metales.
Nguyen <i>et al.</i> , 2024 (AJJ-Asia Japan)	Japón / Drenaje ácido de mina (sintético)	CW de banco con caliza + suelo limoso; modo batch	<i>Iris</i> spp. (ornamental) + <i>Typha</i>	Zn, Cd (también Fe)	HRT 4–7 días; 14.5 meses	Zn: 57–72%; Cd: 57–72%	Buenas remociones en condiciones ácidas; desempeño mantenido a largo plazo.
Álvarez-Asecencio <i>et al.</i> , 2022	México / Lixiviados de relleno sanitario (islas flotantes)	FWT (islas flotantes)	<i>Chrysopogon zizanioides</i> (<i>vetiver</i>)	As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Pb, Zn	Tres diluciones de lixiviado	As: 100%; Cd: 58.1%; Cr: 33.4%; Cu: 67.8%; Fe: 58.3%; Hg: 29.4%; Pb: 69.2%; Zn: 67.2% (mejor a 100% lixiviado)	Vetiver eficaz incluso en matrices complejas; mayor desempeño a mayor carga del lixiviado.
Ang <i>et al.</i> , 2023 (Water)	India / Aguas domésticas (mesocosmos)	Batch mesocosmos (14 especies tropicales)	Incluye ornamentales (p.ej., <i>Canna</i> , <i>Iris</i>)	Cd, Cu, Ni, Pb, Zn (en agua/sedimento)	-----	Rangos de remoción en agua reportados por especie y metal; además BCF/TF/EF > 1 para varios metales en especies ornamentales	Evalúa 14 especies; evidencia fuerte de captación y translocación de metales; útil para elegir especies.
Angmo S, Kharayat Y, Shah S. 2024 (CWE Journal)	India / Lixiviados (VFCW)	VFCW de laboratorio	<i>Canna indica</i> , <i>Phragmites</i> , <i>Eichhornia</i>	Cd (y parámetros convencionales)	-----	Cd: 100% (en las 3 especies); mejor desempeño global con <i>Canna</i>	Aunque <i>Phragmites</i> y <i>Eichhornia</i> no son ornamentales, <i>Canna</i> sí; destaca su superioridad.

Nota. VF-SSFCW: Humedal Construido de flujo vertical y subsuperficial, DSSFCW: Humedal construido de flujo subsuperficial con percolación descendente, CW: Humedal Construido, FWT: Humedal Construido de flujo superficial libre, VFCW: Humedal Construido de Flujo Vertical

En conjunto, los hallazgos confirman que los humedales construidos con plantas ornamentales representan una alternativa prometedora y sostenible para la eliminación de metales pesados en aguas residuales, aunque requieren avances en escalabilidad estandarización y gestión integral para su implementación a gran escala (Bayra *et al.*, 2022; Wibowo *et al.*, 2023; Beltrán-Conlago *et al.*, 2024).

Conclusiones

La evidencia científica confirma que los humedales construidos con plantas ornamentales representan una estrategia eficiente y sostenible para la remoción de metales pesados en aguas residuales.

De acuerdo con revisiones y mapeos de experiencias en América Latina documentan múltiples casos de humedales construidos (HSS, VFCW, híbridos) que incorporan especies ornamentales por su doble función: remediación y valor paisajístico/uso comunitario (reutilización de aguas tratadas para riego en instalaciones verdes). Esto facilita la adopción en municipios con presupuesto limitado y turismo ecológico (Rodríguez-Domínguez *et al.*, 2020).

Estudios realizados en México con *Chrysopogon zizanioides* han mostrado altas eficiencias de remoción (superiores al 80% para Cd, Zn y Pb en condiciones controladas) esta especie se implementó como islas flotantes en lixiviados, evidenciando que vetiver es viable para tratar efluentes industriales/lixiviados en condiciones reales o mesocosmos en contextos latinoamericanos (Alberto *et al.*, 2022), atribuibles a su capacidad de bioacumulación y a la interacción sinérgica entre raíces, microorganismos y medios filtrantes. Por otra parte, las eficiencias varían en función del tipo de metal, la composición del agua, el diseño del humedal y los parámetros operativos, lo que subraya la importancia de optimizar cada sistema de acuerdo con las condiciones locales, además, el uso de potencial económico, factores clave para su implementación en entornos urbanos y turísticos.

Asimismo, experiencias en Colombia, Ecuador y Perú han documentado la aplicación de humedales ornamentales en comunidades rurales y periurbanas, favoreciendo no solo la depuración del agua, sino también la integración paisajística y el uso del efluente tratado para riego en espacios verdes (Beltrán-Conlago *et al.*, 2024).

En este sentido, la implementación de humedales ornamentales en México y otros países latinoamericanos no solo atiende la problemática de la contaminación por metales pesados, sino que también contribuye a la regeneración ambiental, al turismo ecológico y al fortalecimiento de la sostenibilidad hídrica en territorios con limitaciones presupuestales. No obstante, su consolidación a gran escala requiere avanzar en investigación aplicada, estandarización de protocolos y políticas públicas que promuevan su adopción como parte integral de la gestión de aguas residuales.

Los desafíos significativos persisten como la falta de estudios a escala real, la ausencia de protocolos estandarizados para reportar resultados, y la necesidad de abordar la gestión segura de la biomasa contaminada. Superar estos vacíos requerirá investigaciones integrales y multidisciplinarias que integren aspectos técnicos, ambientales, sociales y económicos.

En conclusión, los humedales construidos con plantas ornamentales representan una solución prometedora para el tratamiento de aguas residuales con metales pesados, con potencial para contribuir a la sostenibilidad hídrica, la regeneración ambiental y la mejora del paisaje. Su consolidación dependerá de avances en investigación aplicada, innovación tecnológica y políticas que promuevan su adopción a mayor escala.

Bibliografía

- Abd Elnabi, M. K., Elkaliny, N. E., Elyazied, M. M., Azab, S. H., Elkhalfa, S. A., Elmasry, S., ... Mahmoud, Y. A. G. (2023). Toxicity of heavy metals and recent advances in their removal: A review. *Toxics*, 11(7), 580. <https://doi.org/10.3390/toxics11070580>
- Ablankar, D., Reddy, U., Shete, P., & Jain, A. (2025). Microbial community response to wastewater discharge in water bodies. En *Zero Liquid Discharge Wastewater Treatment System: From Introduction to Application* (pp. 113–130). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-84909-1_7
- Agrawal, K. K., Panda, C., & Bhuyan, M. K. (2021). Impact of urbanization on water quality. En *Current Advances in Mechanical Engineering: Select Proceedings of ICRAMERD 2020* (pp. 665–673). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4795-3_60

- Álvarez-Ascencio, A., López-Martínez, S., Rodríguez-Luna, A. R., López-Hernández, E. S., Morales-Bautista, C. M., & Hernández-Núñez, E. (2022). Analysis of *Chrysopogon zizanioides* used as floating treatment wetlands in the removal of heavy metals present in leachate. *Remediation Journal*, 33(1), 77–86. <https://doi.org/10.1002/rem.21739>
- Ang, S. Y., Goh, H. W., Mohd Fazli, B., Haris, H., Azizan, N. A., Zakaria, N. A., & Johar, Z. (2023). Heavy metals removal from domestic sewage in batch mesocosm constructed wetlands using tropical wetland plants. *Water*, 15(4), 797. <https://doi.org/10.3390/w15040797>
- Angmo, S., Kharayat, Y., & Shah, S. (2024). Efficiency of *Canna indica*, *Phragmites australis* and *Eichhornia crassipes* in remediation of leachate through a vertical flow constructed wetland. *Current World Environment*, 19(2). <https://doi.org/10.12944/CWE.19.2.7>
- Barya, M. P., Kumar, A., & Thakur, T. K. (2022). Utilization of constructed wetland for the removal of heavy metal through fly ash bricks manufactured using harvested plant biomass. *Ecohydrology*, 15(4), e2424. <https://doi.org/10.1002/eco.2424>
- Beltrán-Conlago, A. C., Ledesma-Acosta, R. D., León-Fiallos, K. Z., & Paredes-Cepeda, E. R. (2024). Evaluación de sistemas de tratamiento de aguas residuales basados en naturaleza: Potencial para ciudades sostenibles. *MQR Investigar*, 8(4), 1558–1578. <https://doi.org/10.56048/MQR20225.8.4.2024.1558-1578>
- Boulaaras, A., Zoubida, Z., Boudjema, B., & Benseddik, A. (2022). Potential of *Canna indica* in vertical flow constructed wetlands for heavy metals and nitrogen removal from Algiers refinery wastewater. *Sustainability*, 14(8), 4394. <https://doi.org/10.3390/su14084394>
- Carolin, C. F., Kumar, P. S., Saravanan, A., Joshiba, G. J., & Naushad, M. (2017). Efficient techniques for the removal of toxic heavy metals from aquatic environment: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5, 2782–2799. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.05.029>
- Castañeda Díaz, S. R., & Díaz Alaya, E. (2024). *Evaluación de la capacidad de fitodepuración de aguas residuales domésticas, mediante humedales artificiales aplicando plantas emergentes – San Bernardino, 2023*. Universidad Privada del Norte. <http://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/40155>
- Edo, G. I., Samuel, P. O., Oloni, G. O., Ezekiel, G. O., Ikpekor, V. O., Obasohan, P., & Agbo, J. J. (2024). Environmental persistence, bioaccumulation, and ecotoxicology of heavy metals. *Chemistry and Ecology*, 40(3), 322–349. <https://doi.org/10.1080/02757540.2024.2306839>
- Filote, C., Roşca, M., Hlihor, R. M., Cozma, P., Simion, I. M., Apostol, M., & Gavrilescu, M. (2021). Sustainable application of biosorption and bioaccumulation of persistent pollutants in wastewater treatment: Current practice. *Processes*, 9(10), 1696. <https://doi.org/10.3390/pr9101696>
- Marín Giraldo, Y., Jaramillo Salazar, M. T., & Ocampo Serna, D. M. (2020). *El cianuro en la minería: efectos sobre las plantas acuáticas*. Editorial Universidad de Caldas.
- Meftah, S., Meftah, K., Drissi, M., & colaboradores. (2025). Heavy metal polluted water: Effects and sustainable treatment solutions using bio-adsorbents aligned with the SDGs. *Discover Sustainability*, 137. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-00895-6>
- Nguyen, T. T., Huang, H., Oda, M., & Soda, S. (2023). Constructed wetlands planted with *Iris* for treatment of wastewater simulating a typical mine drainage in Japan: Effects of organic-feeding on removal of Zn and Cd. *Asia-Japan Journal*, 6, 35–46. https://doi.org/10.34389/asiajapan.6.0_35
- Phewnil, O., Chunkao, K., Prabhuddham, P., & Pattamapitoot, T. (2024). Application of different aquatic plants in an alternated fill and drain wetland system of Phetchaburi municipal wastewater treatment in Thailand. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(1), 1304–1313. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31266-1>
- Prol Vila, B. (2020). *Humedales construidos: sustentabilidad y comparativa con sistemas de tratamiento convencionales. Revisión crítica*. Universidade da Coruña. <http://hdl.handle.net/2183/27165>
- Rodríguez-Domínguez, M. A., Konnerup, D., Brix, H., & Arias, C. A. (2020). Humedales artificiales en América Latina y el Caribe: Una revisión de las experiencias de la última década. *Water*, 12(6), 1744. <https://doi.org/10.3390/w12061744>
- Sánchez-Tovar, S. A., Navarro-Frómata, A. E., & Salgado-Bernal, I. (2025). Humedales: Tres propuestas tendientes a mitigar los daños antrópicos. *Ambiens Techné et Scientia México*, 13, 181–194. <https://atsmexico.org/atsm/article/view/204>
- Vardhan, K. H., Kumar, P. S., & Panda, R. C. (2019). A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives. *Journal of Molecular Liquids*, 290, 111197. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111197>
- Villarín, M. C., & Merel, S. (2020). Assessment of current challenges and paradigm shifts in wastewater management. *Journal of Hazardous Materials*, 390, 122139. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122139>
- Wibowo, Y. G., Wijaya, C., Yudhoyono, A., Sudibyo, Yuliansyah, A. T., Safitri, H., Tsabitah, N., Nur'ani, H., Khairurrijal, K., & Petrus, H. T. B. M. (2023). Highly Efficient Modified Constructed Wetlands Using Waste Materials for Natural Acid Mine Drainage Treatment. *Sustainability*, 15(20), 14869. <https://doi.org/10.3390/su152014869>