

Biomásas adsorbentes de Metales pesados una revisión para su desarrollo a gran escala en Colombia¹

Heavy Metal-Adsorbing Biomass: A Review for Large-Scale Development in Colombia

Uriel Fernando Carreño Sayago.

Resumen—

Las biomásas adsorbentes se han convertido en fuentes de investigación científicas para el tratamiento de aguas residuales químicas alrededor del mundo debido a su capacidad de remover contaminantes metales pesados y colorantes. A través de estas biomásas se han desarrollado sistemas de tratamiento a escala piloto arrojando resultados de factibilidad debido a los bajos costos, facilidad de instalación y sobre todo las grandes capacidades de adsorción de estos metales pesados. Estas biomásas como la de *E. crassipes*, se ha secado y molido para llevar este material celulolítico a sistemas de tratamiento en columna fija. El objetivo del presente artículo de revisión es ahondar las diferentes biomásas y determinar los costos unitarios de desarrollo de materiales aunado a la relación con las capacidades de adsorción. Concluyendo que hay diferentes biomásas para diferentes efluentes dependiendo de su carga contaminante, determinando que estas biomásas son una excelente fuente de tratamiento de aguas residuales industriales, especialmente los metales pesados.

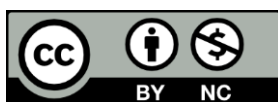
Palabras clave— Biomásas, Metales pesados, escala piloto, remoción, Isotermas.

Abstract—

Biomass-based adsorbents have become a subject of scientific research for the treatment of chemical wastewater worldwide, owing to their ability to remove heavy metal contaminants and dyes. Pilot-scale treatment systems utilizing these biomass materials have demonstrated feasibility, driven by low costs, ease of installation, and—above all—their high heavy-metal adsorption capacities. Biomass sources such as *E. crassipes* have been dried and ground to prepare the cellulosic material for use in fixed-bed column treatment systems. This review article aims to examine various biomass types in depth and determine the unit costs of material development in relation to adsorption capacities. The study concludes that different biomass materials are suited to different effluents based on their pollutant loads, establishing them as an excellent resource for industrial wastewater treatment, particularly for the removal of heavy metals.

Keywords— Biomass, heavy metals, pilot scale, removal, isotherms.

¹ Producto derivado del trabajo de investigación "biomásas adsorbentes de la Fundación Univeritaria los Libertadores.", Uriel Fernando Carreño Sayago. ufcarrenos@libertaodres.edu.co



I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad múltiples investigaciones en Latinoamérica y especialmente en Colombia se centran en diseñar y desarrollar sistemas de tratamiento de aguas residuales industriales, debido al impacto social, ambiental y de salud que causan su incapacidad en gestión no diseñar y ajustar estos sistemas para su debido tratamiento [1-3]. El inadecuado tratamiento ha perjudicado a las poblaciones aledañas en donde se hacen vertimientos de efluentes cargados con grandes concentraciones de metales pesados, colorantes y otros químicos perjudiciales, llegando a perder servicios ecosistémicos de ríos, lagunas y humedales por ejemplo [4-6]. Los metales pesados presentes en efluentes industriales han causado graves impactos, especialmente el cromo proveniente de las industrias de curtimientos y el mercurio proveniente de la minería [7-10]. En la actualidad las biomasa adsorbentes de contaminantes es un tópico avanzado de investigación científica, debido a la efectividad de los tratamientos, lo sencillo del diseño industrial de sus prototipos y sobre todo lo económico que se vuelven estas biotecnologías [11-14]. Un ejemplo de estos es el buchón de agua, *Eichhornia crassipes*, planta mal gestionada desde el punto de vista en sostenibilidad en nuestro país, debido a que se está desperdiciando en disposiciones finales inadecuadas [15-17]. Esta planta posee en su estructura vegetal celulosa y hemicelulosa, en estos polisacáridos es donde se alojan metales pesados después de procesos de Quimisorción química, debido a los múltiples sitios activos que poseen [18-19]. Además, su lignina posee una estructura bioquímica que ayuda a asimilar eluentes como el EDTA, incrementando los procesos de capacidad de adsorción [20-21]. En investigaciones científicas se ha desarrollado un proceso ideal de aprovechamiento de su biomasa, que es a través de su secado y molienda especialmente las raíces, que es donde más hay celulosa [22-24]. Con estas técnicas se ha determinado que la capacidad de adsorción de esta biomasa es de alrededor de 7 mg/g [10], pero con agentes químicos se ha logrado oxidar más esta biomasa aumentando este indicador, llevándolo a 55 mg/g con cloruro de hierro [25], celulosa xantate ha llegado a 48 mg/g [21], con TiO ha llegado a 50 mg/g [26], con TPP ha incrementado a 55 mg/g [27]. Muchos estudios se han realizado a escala

laboratorio, pero para asemejarse más a la realidad se idearon sistemas de tratamiento a escala real con la biomasa de esta planta y otras celulosas como la celulosa bacteriana, que posee grandes capacidades de quimisorber metales pesados, especialmente el cromo (VI) mercurio (II) [28-34]. En la actualidad hay muchas investigaciones, pero no se ha centrado en profundizar y ordenar para llegar al consenso real de un tratamiento eficaz y eficiente, logrando determinar la factibilidad de estos sistemas, todo con el fin de generar un documento que contenga las capacidades de adsorción aunado a los costos de elución y costos generales, para determinar cual es la mejor manera de tratar efluentes contaminados con metales pesados.

En la tabla 1. Muestra los procesos de publicación de la revista.

Tabla 1. Biomasa con sus capacidades de adsorción.

Investigación	Biomasa utilizada	Metal pesado	Capacidad de adsorción mg/g
[11]	E crassipes	Cr (VI)	7
[25]	E. Crassipes FeOOH	Cr (VI)	55
[21]	E. Crassipes xantate.	Cr (VI)	48
[26]	E. Crassipes TiO ₂	Cr(VI)	50
[27]	E. Crassipes TPP	Cr(VI)	55
[35]	Pranera Vahllei	Cr (VI)	30
[36]	Brown algae	Al (III)	12
[37]	Biochar alginate	Cr (VI)	30
[38]	Pine Cone	Pb (II)	22
[39]	Brown Algae	Cu (II)	14
[40]	Cassava	Cr (VI)	14
[34]	Cellulose bacteriana	Cr (VI)	116

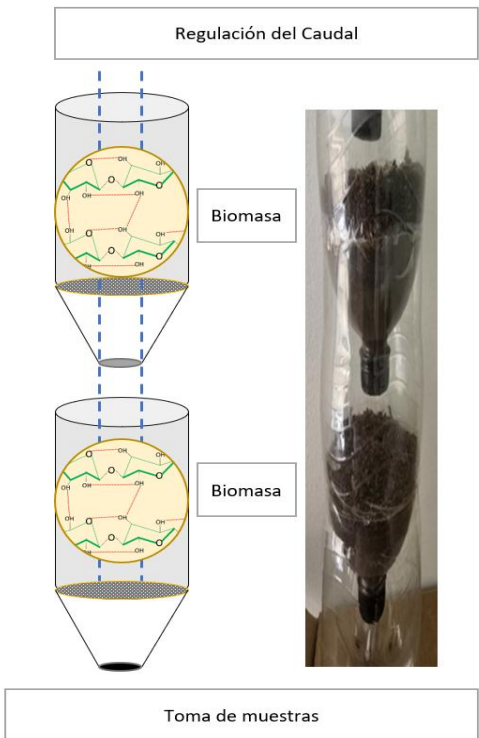
[41]	Alginate-based hydrogel	Cr (VI)	86
[42]	Alginate–biomass hydrogel	Cr (VI)	184
[43]	Biomass–bentonite composites	Cr (VI)	140

Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar el incremento que hay al reaccionar la biomasa de *E crassipes* con el cloruro de hierro y la celulosa xantate, incrementando las capacidades de adsorción más de 15 veces. También se puede apreciar que las ultimas biomazas contienen grandes capacidades de adsorción después de diferentes procesos de reciclaje de estas biomazas.

En la Figura 1, muestra alguno de los diseños de un sistema a escala piloto de tratamiento con biomazas adsorbentes.

Figura 1. Diseño de prototipo.



Este sistema de tratamiento se basa en la incorporación de biomazas adsorbentes en compartimentos, las cuales el agua pasa por ellas generalmente a 20 ml/min. Se puede observar el componente de la biomasa de celulosa [11;21;25-

28]. La Tabla 2 presenta las capacidades máximas de adsorción de cada material compuesto contemplado en este estudio, así como los costos unitarios asociados a su adquisición.

Este dato relaciona con las capacidades de adsorción finales obtenidas, dando lugar a un nuevo parámetro de investigación: gramos de cromo o metal pesado tratados por dólar invertido en el tratamiento (g/USD). Por ejemplo, en la biomasa de celulosa bacteriana [34] con tiene la capacidad de adsorción de la biomasa (a) es de 116 g/kg y su costo de adquisición es de 5 dólares, lo que resulta en 23,32 g de Cr eliminados por dólar invertido en el diseño y desarrollo de dicha biomasa.

La evaluación de la capacidad y los costes de los materiales se basó en diversos artículos científicos publicados. Por ejemplo, cuando las biomazas no contienen aditivos ni han sido sometidas a transformaciones químicas, su capacidad básica de adsorción oscila entre 10 y 50 mg/g, aunque su coste de producción suele ser bastante bajo. Esto representa una ventaja, tal como se observa en los casos de las biomazas descritas en [44–51]. La modificación química de la biomasa o de los materiales compuestos facilita la eliminación de diversos metales pesados —alcanzando tasas superiores a 50 mg/g— gracias a la mayor presencia de sitios activos. Esto aumenta la resistencia al desgaste provocado por los metales pesados y los eluyentes, mejorando así dicho parámetro. No obstante, también se incrementan los costes de diseño y construcción de un sistema de tratamiento avanzado [52–62]. Aunque estos estudios se realizan a escala de laboratorio, sirven de base para desarrollar sistemas de tratamiento de mayor envergadura. El material idóneo para este fin sería aquel que permita desarrollar un sistema de tratamiento basado en biomasa adsorbente; un ejemplo es la biomasa de *E crassipes* [34], con una capacidad de remover 23 g de metales pesado por unidad de dólar. La capacidad de *Posidonia* [58] contiene una capacidad ideal de 350 mg/g, pero el costo es muy alto. Es ideal diseñar grandes cargas de contaminación las biomazas [58-60], pero si se dispone pocos recursos, se podría diseñar [44-50]. Se destaca por su resistencia a los eluyentes, o bien otra biomasa capaz de adsorber metales pesados gracias a su pureza, como la celulosa bacteriana [34-35].

Tabla 2. Pasos de Publicación.

Investigación	Biomasa	Capacidad de adsorción mg/g	Costo en dólares por kg de biomasa	MP(g)/(USD)
[34]	Celulosa bacteriana con Hierro	116	5	23.32
[34]	Cellulose bacterial	200	18	11
[44]	Algas	70	10	7
[45]	<i>Gossypium hirsutum</i>	60	5	12
[46]	<i>Azadirachta indica</i>	25	8	3
[47]	Potato peels	15	5	3
[48]	Sargassum biomass	50	2	25
[49]	Oxidized biomass	30	8	4
[50]	Activated biocarbons	178	10	17.8
[51]	Biochar from <i>Chlorella pyrenoidosa</i> algal	102	10	10.2
[52]	Biomass and biochar-based adsorbents	230	10	23
[53]	Biochar from lignocellulosic	180	10	18
[54]	Biochar from biomass and plastic	75	10	7.5
[55]	Carbon active	131	10	13.1
[56]	MgO-modified rice husk biochar	105	10	10
[57]	Sugarcane bagasse and orange peel to obtain carbon foams	95.2	10	10
[58]	Acid-activated Posidonia oceanica	350	15	23
[59]	Corn shell as biomass solid	304	15	20
[60]	Dead biomass of indigenous fungi	121	15	8
[61]	Biomass-based biomimetic-oriented Janus nanoarchitecture	85	15	5.6
[62]	MnO ₂ -coated rice husk biomass	155	15	10
[41]	Alginate-based hydrogel	86	15	6
[42]	Alginate-biomass hydrogel	184	15	12
[43]	Biomass-bentonite composites	140	15	10

CONCLUSIONES.

La revisión bibliográfica de biomásas adsorbentes de metales pesados conlleva a un estudio profundo de disrupción científica que debe ser relevante en nuestro país debido a los graves contaminantes como cromo y mercurio. En la actualidad se deben ejecutar las investigaciones científicas relacionadas con prototipos que contienen estas biomásas en compartimientos para que se puedan ejecutar en lugares donde hoy en día se continúa contaminando. Un prototipo que posee la biomasa de *E. crassipes* es el ideal debido a sus bajos costos de consecución y sobre todo las grandes capacidades de adsorber contaminantes como el cromo, pero si se posee grandes concentraciones de contaminantes se podrían desarrollar biomásas especializadas, como por ejemplo carbón activo u otro adsorbente como

alginate. Concluyendo que las biomásas encontradas se pueden ensayar y llevarlas a los lugares donde ocasionan graves impactos y desarrollar sistemas de tratamiento con estos materiales.

REFERENCIAS

1. Carreño Sayago, U. F. (2016). Diseño y evaluación de un biosistema de tratamiento a escala piloto de aguas de curtiembres a través de la *Eichhornia crassipes*. Revista Colombiana de Biotecnología, 18(2), 74-81.
2. Navas-Ulloa, A. E., Vallejo, F., Yáñez, D., Brito, J. N., Ayabaca-Sarria, C., Tirado-Lozada, A., & Venegas-Vásquez, D. (2026). Scientific mapping of mining expansion in Ecuador: A PRISMA

- systematic review of territorial change and biosanitary implications in Latin America. *Environments*, 13(5), 235.
3. Sayago, U. F. C., Castro, Y. P., Rivera, L. R. C., & Mariaca, A. G. (2020). Estimation of equilibrium times and maximum capacity of adsorption of heavy metals by *E. crassipes*. *Environmental monitoring and assessment*, 192, 1-16.
 4. Carreño-Sayago, U. F. (2021). Development of microspheres using water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for treatment of contaminated water with Cr (VI). *Environment, Development and Sustainability*, 23(3), 4735-4746.
 5. Da Silva, J., Franco, D., García, A. L., Pacheco-Pantoja, E. L., Simoniello, M. F., Tirado, N., ... & Rojas, E. (2026). Alkaline comet assay in human biomonitoring studies by the Latin America/LA-COMET group. *Mutation Research-Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 503940.
 6. Calizaya-Anco, J. A., Cutipa-Díaz, Y. M., Rubira-Otarola, D. G., Denegri-Limache, K. A., & Limache-Sandoval, E. M. (2026). Evaluation of the Trophic State of Lagoons and Reservoirs in High Andean Southern Peru. *Limnological Review*, 26(2), 14.
 7. Gómez-Oquendo, G., Fernandez-Curi, M., Carrión-Carrera, G., Garcia, S., Velarde-Guillén, J., & Gómez-Bravo, C. (2026). Heavy metals and selenium in pastures of a high Andean mining area and its relationship with their content in water and soil. *Journal of Ecological Engineering*, 27(1), 280-291.
 8. Alves, J. A., Cunha, P. M. M., de Souza Meireles, G., Correia, F. V., de Sá Salomão, A. L., Hauser-Davis, R. A., & Saggioro, E. M. (2026). Metal-Driven Biochemical and Physiological Stress in Fish Inhabiting an Urban Coastal Lagoon: Evidence from an Integrated Multibiomarker Approach. *Biological Trace Element Research*, 1-22.
 9. Carreno Sayago, U. F. (2021). Design, scaling, and development of biofilters with *E. crassipes* for treatment of water contaminated with Cr (VI). *Water*, 13(9), 1317.
 10. Calizaya-Anco, J. A., Cutipa-Díaz, Y. M., Rubira-Otarola, D. G., Denegri-Limache, K. A., & Limache-Sandoval, E. M. (2026). Evaluation of the Trophic State of Lagoons and Reservoirs in High Andean Southern Peru. *Limnological Review*, 26(2), 14.
 11. Sayago, U. F. C. (2021). Design and development of a biotreatment of *E. crassipes* for the decontamination of water with Chromium (VI). *Scientific Reports*, 11(1), 9326.
 12. Abiodun, O. A. O., Oluwaseun, O., Oladayo, O. K., Abayomi, O., George, A. A., Opatola, E., ... & Omotayo, I. A. (2023). Remediation of heavy metals using biomass-based adsorbents: adsorption kinetics and isotherm models. *Clean Technologies*, 5(3), 934-960.
 13. Carreño-Sayago, U. F. (2022). Design of biocolumns with dry and crushed biomass of *E. crassipes* for the treatment of water contaminated with Cr (VI).
 14. Paranjape, P., & Sadgir, P. (2023). Heavy metal removal using plant origin biomass and agricultural waste-derived biomass from aqueous media: a review. *Water Conservation Science and Engineering*, 8(1), 9.
 15. Sayago, U. F. C., and Ballesteros Ballesteros, V. (2023). Development of a treatment for water contaminated with Cr (VI) using cellulose xanthogenate from *E. crassipes* on a pilot scale. *Scientific Reports*, 13(1), 1970.
 16. Fan, Y., Zhang, S., Wang, X., Yang, L., Li, H., & Gao, K. (2025). The potential of *Pontederia crassipes* to remediate heavy metals in water. *Plants*, 14(23), 3604.
 17. Carreño Sayago, U. F., Piñeros Castro, Y., & Conde Rivera, L. R. Design of a fixed-bed column with vegetal biomass and its recycling for Cr (VI) treatment. 2022. *Recycling*, 7(5), 71.

18. Sayago, U. F. C., and Castro, Y. P. (2022). Development of a composite material between bacterial cellulose and *E. crassipes*, for the treatment of water contaminated by chromium (VI). *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(7), 6285-6298.
19. Sayago, U. F. C., and Ballesteros Ballesteros, V. (2023). Recent advances in the treatment of industrial wastewater from different celluloses in continuous systems. *Polymers*, 15(19), 3996.
20. Sayago, U. F. C. (2023). Design and development of a pilot-scale industrial wastewater treatment system with plant biomass and EDTA. *Water*, 15(19), 3484.
21. Sayago, U. F. C., and Ballesteros Ballesteros, V. (2023). Development of a treatment for water contaminated with Cr (VI) using cellulose xanthogenate from *E. crassipes* on a pilot scale. *Scientific Reports*, 13(1), 1970.
22. Sayago, U. F. C., & Ballesteros Ballesteros, V. (2024). Development of a wastewater treatment system contaminated with Cr (VI) through vegetable biomass modified with TiO₂. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-14.
23. Fan, Y., Zhang, S., Wang, X., Yang, L., Li, H., & Gao, K. (2025). The potential of *Pontederia crassipes* to remediate heavy metals in water. *Plants*, 14(23), 3604.
24. Garg, A., Yadav, B. K., Das, D. B., & Wood, P. J. (2022). Biomonitoring and phytoremediation of Cr (VI) contaminated water: Study on bioaccumulation and morphological responses in *Eichhornia crassipes*. *Journal of Environmental Engineering*, 148(12), 04022075.
25. Sayago, U. F. C., Ballesteros, V. B., & Lozano, A. M. (2025). Development of a Treatment System of Water with Cr (VI) Through Models Using *E. crassipes* Biomass with Iron Chloride. *Toxics*, 13(3), 230.
26. Sayago, U. F. C., & Ballesteros Ballesteros, V. (2025). Development of a wastewater treatment system contaminated with Cr (VI) through vegetable biomass modified with TiO₂. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(8), 6521-6534.
27. Sayago, U. F. C., & Ballesteros, V. A. B. (2024). The Design of a Process for Adsorbing and Eluting Chromium (VI) Using Fixed-Bed Columns of *E. crassipes* with Sodium Tripolyphosphate (TPP). *Water*, 16(7), 952.
28. Sayago, U. F. C., Ballesteros, V. B., & Aguilar, A. M. L. (2024). Bacterial Cellulose-Derived Sorbents for Cr (VI) Remediation: Adsorption, Elution, and Reuse. *Polymers*, 16(18), 2605.
29. Sayago, U. F. C., Ballesteros, V. B., & Aguilar, A. M. L. (2024). Designing, Modeling and Developing Scale Models for the Treatment of Water Contaminated with Cr (VI) through Bacterial Cellulose Biomass. *Water*, 16(17), 2524.
30. Sayago, U. F. C., Ballesteros, V. B., & Lozano, A. M. (2025). Design of Biomass Adsorbents Based on Bacterial Cellulose and *E. crassipes* for the Removal of Cr (VI). *Polymers*, 17(12), 1712.
31. Sayago, U.F.C (2025). Determining the Impact of Temperature on Cr (IV) Adsorption Using Bacterial Cellulose Biomass as an Adsorbent. *Processes*, 13(11), 3493.
32. Sayago, U.F.C (2025). Treatment of Water Contaminated with Cr (VI) Using Bacterial Cellulose and FeCl₃ in a Continuous System. *Applied Sciences*, 15(23), 12808.
33. Sayago, U. F. C., Ballesteros, V. B., Aguilar, A. M. L., & Nisperuza, J. L. (2026). Design and develop a prototype fixed column using bacterial cellulose and ferric chloride for Cr (VI) removal. *Frontiers in Systems Biology*, 6, 1844304.

34. Carreño Sayago, U.F.; Ballesteros, V.B.; Lozano Aguilar, A.M. Development of a Cr(VI) Treatment System Using Bacterial Cellulose Biomass and *Eichhornia crassipes*. *Processes* 2026, 14, 2325. <https://doi.org/10.3390/pr14142325>
35. Tejada-Tovar, C.N.; Villabona-Ortíz, A.; Alvarez-Bajaire, G.; Granados-Conde, C. Influencia de la altura del lecho sobre el comportamiento dinámico de columna de lecho fijo en la biosorción de mercurio. *Tecnológicas* 2019, 20, 71–81.
36. Saralegui, A.B.; Willson, V.; Caracciolo, N.; Piol, M.N.; Boeykens, S.P. Macrophyte biomass productivity for heavy metal adsorption. *J. Environ. Manag.* 2021, 289, 112398.
37. Gupta, S.; Jain, A.K. Biosorption of Ni (II) from aqueous solutions and real industrial wastewater using modified *A. barbadensis* Miller leaves residue powder in a lab scale continuous fixed bed column. *Clean. Eng. Technol.* 2021, 5, 100349.
38. De Sá Costa, H.P.; da Silva, M.G.C.; Vieira, M.G.A. Fixed bed biosorption and ionic exchange of aluminum by brown algae residual biomass. *J. Water Process Eng.* 2021, 42, 102
39. Han, X.; Zhang, Y.; Zheng, C.; Yu, X.; Li, S.; Wei, W. Enhanced Cr (VI) removal from water using a green synthesized nanocrystalline chlorapatite: Physicochemical interpretations and fixed-bed column mathematical model study. *Chemosphere* 2021, 264, 128421. [Google Scholar]
40. Ghasemabadi, S.M.; Baghdadi, M.; Safari, E.; Ghazban, F. Investigation of continuous adsorption of Pb (II), As (III), Cd (II), and Cr (VI) using a mixture of magnetic graphite oxide and sand as a medium in a fixed-bed column. *J. Environ. Chem. Eng.* 2018, 6, 4840–4849.
41. Zhang, P.; Zou, K.; Yuan, L.; Liu, J.; Liu, B.; Qing, T.P.; Feng, B. A biomass resource strategy for alginate-polyvinyl alcohol double network hydrogels and their adsorption to heavy metals. *Sep. Purif. Technol.* 2022, 301, 122050.
42. Zhang, P.; Yuan, L.; Zeng, J.; Zou, K.; Liu, B.; Qing, T.; Feng, B. Alginate production of *Pseudomonas* strains and its application in preparation of alginate-biomass hydrogel for heavy metal adsorption. *Int. J. Biol. Macromol.* 2022, 222, 1511–1521.
43. Alabi, A.H.; Adekunle, V.A.; Azeez, A.A.; Akinwale, B.W.; Olanrewaju, C.A.; Oladoye, P.O.; Obayomi, K.S. Sequestration of divalent heavy metal ions from aqueous environment by adsorption using biomass-bentonite composites as potential adsorbent: Equilibrium and kinetic studies. *Nano-Struct. Nano-Objects* 2024, 38, 101183.
44. Znad, H.; Awual, M.R.; Martini, S. The utilization of algae and seaweed biomass for bioremediation of heavy metal-contaminated wastewater. *Molecules* 2022, 27, 1275.
45. Ali, Z.; Sajid, M.; Raza, N.; Sohail, Y.; Hayat, M.; Manzoor, S.; Shakeel, N.; Gill, K.A.; Ifseisi, A.A.; Ansari, M.Z. Study of modified biomass of *Gossypium hirsutum* as heavy metal biosorbent. *Arab. J. Chem.* 2023, 16, 105332.
46. Naseem, K.; Imran, Q.; Ur Rehman, M.Z.; Tahir, M.H.; Najeeb, J. Adsorptive removal of heavy metals and dyes from wastewater using *Azadirachta indica* biomass. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2023, 20, 5799–5822.
47. Oukhemamou, S.; Belaid, T.; Bey, S.; Arauzo, P.J.; Checa-Gómez, M.; Benamor, M. Biosorption of hexavalent chromium by a low-cost sorbent (potato peels): Kinetics, equilibrium, and thermodynamics. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2026, 33, 506–525.
48. Fernández, L.A.G.; Frómeta, A.E.N.; Álvarez, C.C.; Ramírez, R.F.; Flores, P.E.D.; Ramos, V.C.; Polo, M.S.; Marín, F.C.; Castillo, N.A.M. Valorization of sargassum biomass as potential material for the remediation of heavy-metals-contaminated waters. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2023, 20, 2559.

49. Condurache, B.C.; Cojocaru, C.; Samoila, P.; Cosmulescu, S.F.; Predeanu, G.; Enache, A.C.; Harabagiu, V. Oxidized biomass and its usage as adsorbent for removal of heavy metal ions from aqueous solutions. *Molecules* 2022, 27, 6119.
50. Wiśniewska, M.; Marciniak, M.; Gęca, M.; Herda, K.; Pietrzak, R.; Nowicki, P. Activated biocarbons obtained from plant biomass as adsorbents of heavy metal ions. *Materials* 2022, 15, 5856.
51. Rohman, G.A.N.; Aziz, M.A.; Nawaz, A.; Elgzoly, M.A.; Hossain, M.M.; Razzak, S.A. High-performance biochar from *Chlorella pyrenoidosa* algal biomass for heavy metals removal in wastewater. *Sep. Purif. Technol.* 2024, 341, 126870.
52. Sireesha, S.; Upadhyay, U.; Sreedhar, I. Comparative studies of heavy metal removal from aqueous solution using novel biomass and biochar-based adsorbents: Characterization, process optimization, and regeneration. *Biomass Convers. Biorefinery* 2022, 15, 21643–21655.
53. Li, J.; Lv, F.; Yang, R.; Zhang, L.; Tao, W.; Liu, G.; Gao, H.; Guan, Y. N-doped biochar from lignocellulosic biomass for preparation of adsorbent: Characterization, kinetics and application. *Polymers* 2022, 14, 3889.
54. Emenike, E.C.; Okoro, H.K.; Al-Senani, G.M.; Al-Qahtani, S.D.; Iwuozor, K.O.; Egbemhenghe, A.U.; Emeghai, J.; Adeniyi, A.G. Adsorptive removal of Cr (VI) and Pb (II) using biochar from biomass and plastic waste: Characterization and performance evaluation. *Biomass Bioenergy* 2026, 207, 108722.
55. Li, A.; Xie, H.; Qiu, Y.; Liu, L.; Lu, T.; Wang, W.; Qiu, G. Resource utilization of rice husk biomass: Preparation of MgO flake-modified biochar for simultaneous removal of heavy metals from aqueous solution and polluted soil. *Environ. Pollut.* 2022, 310, 119869.
56. Licona-Aguilar, Á.I.; Torres-Huerta, A.M.; Domínguez-Crespo, M.A.; Palma-Ramírez, D.; Conde-Barajas, E.; Negrete-Rodríguez, M.X.L.; Rodríguez-Salazar, A.E.; García-Zaleta, D.S. Reutilization of waste biomass from sugarcane bagasse and orange peel to obtain carbon foams: Applications in the metal ions removal. *Sci. Total Environ.* 2022, 831, 154883.
57. Adegoke, K.A.; Akinlawo, S.O.; Ajala, O.A.; Adebisoyi, T.A.; Maxakato, N.W.; Bello, O.S. Progress and challenges in batch and optimization studies on the adsorptive removal of heavy metals using modified biomass-based adsorbents. *Bioresour. Technol. Rep.* 2022, 19, 101115.
58. Abou-Hadid, A.F.; El-Behairy, U.A.; Elmalih, M.M.; Amdeha, E.; Naggar, A.M.E.; Taha, M.H.; Hussein, A.E. Conversion of corn shell as biomass solid waste into carbon species for efficient decontamination of wastewater via heavy metals adsorption. *Biomass Convers. Biorefinery* 2024, 14, 16435–16449.
59. El-Gendy, M.M.A.A.; Abdel-Moniem, S.M.; Ammar, N.S.; El-Bondkly, A.M.A. Bioremoval of heavy metals from aqueous solution using dead biomass of indigenous fungi derived from fertilizer industry effluents: Isotherm models evaluation and batch optimization. *Biometals* 2023, 36, 1307–1329.
60. Zhao, H.; Dong, W.; Deng, Y.; Chen, L.; Zhao, C.; Zhang, C.; Zhou, J.; Qu, Y.; Li, Y.; Li, D.; et al. Biomass-based biomimetic-oriented Janus nanoarchitecture for efficient heavy-metal enrichment and interfacial solar water sanitation. *Interdiscip. Mater.* 2022, 1, 537–547.
61. Zhang, Y.; Li, A.; Liu, L.; Duan, X.; Ge, W.; Liu, C.; Qiu, G. Enhanced remediation of cadmium-polluted soil and water using facilely prepared MnO₂-coated rice husk biomass. *Chem. Eng. J.* 2023, 457, 141311.