REVISTA ECUATORIANA DE DESARROLLO SOCIAL Y AMBIENTAL
Julio - Septiembre, 2026 | Vol. 1 | Núm. 3
ISSN: 3151-8303

Uso de biosorbentes naturales para la remoción de metales pesados en aguas contaminadas: Alternativas sostenibles en el contexto ecuatoriano

Use of natural biosorbents for the removal of heavy metals in contaminated water: Sustainable alternatives in the Ecuadorian context

Carlos Andrés López Chun
1 Universidad Técnica de Manabí; Manabí, Ecuador;
achun2222@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-2805-7290

Mite Leon Yocelyn Madeley
2 Ministerio de Educación, Deporte y Cultura; Playas - Ecuador;
madeley.mite@docentes.educacion.edu.ec
https://orcid.org/0009-0002-0602-0945

Jonathan Barco Acosta
3 Editorial Educa Plus; Naranjito – Ecuador;
jonanthanfba27@gmail.com
https://orcid.org/0009-0009-2475-7503

Enviado: 12/07/2026 **Aceptado:** 29/07/2026 **Publicado:** 31/07/2026

Tipo de Investigación: Artículo Original **Páginas:** 143 - 157

DOI: https://doi.org/10.66646/redsa-2026/t7131667

Conflicto de Intereses Ninguno que declarar.

Correspondencia: **Carlos Andrés López Chun**
Universidad Técnica de Manabí; Manabí, Ecuador;
achun2222@gmail.com

Esta obra se distribuye bajo la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la capacidad de remoción de metales pesados, específicamente plomo (Pb^{2+}), cadmio (Cd^{2+}) y cromo (Cr^{6+}), de tres biosorbentes naturales de origen agroindustrial ecuatoriano: cáscara de cacao (Theobroma cacao L.), bagazo de caña de azúcar (Saccharum officinarum L.) y fibra de banano (Musa paradisiaca L.), en muestras de agua contaminada provenientes de zonas industriales y mineras de las provincias de Pichincha, El Oro y Morona Santiago. Se empleó un enfoque cuantitativo con diseño experimental factorial completamente al azar, evaluando variables de pH (4, 6 y 8), tiempo de contacto (30, 60 y 120 minutos) y dosis de biosorbente (2, 5 y 10 g/L) sobre la eficiencia de remoción. Los resultados evidenciaron que la cáscara de cacao presentó la mayor eficiencia de remoción para Pb^{2+} (94,3%) y Cd^{2+} (89,7%) a pH 6 y 60 minutos de contacto, con una dosis de 5 g/L, mientras que la fibra de banano mostró la mayor capacidad de adsorción para Cr^{6+} (91,2%) a pH 4. El análisis de isotermas de adsorción indicó que el modelo de Langmuir describió mejor el proceso para los tres biosorbentes, con un R^2 superior a 0,97. Se concluye que los residuos agroindustriales ecuatorianos evaluados presentan un desempeño prometedor como biosorbentes, así como un potencial de aplicación ambiental que deberá confirmarse mediante análisis económico y de ciclo de vida, para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados. Esto representa una alternativa promisoria para la gestión de residuos y la descontaminación hídrica en el contexto ecuatoriano.

Palabras clave:

adsorción, aguas contaminadas, biosorbentes naturales, metales pesados, residuos agroindustriales, sostenibilidad ambiental

ABSTRACT

The present study aimed to evaluate the heavy metal removal capacity, specifically lead (Pb^{2+}), cadmium (Cd^{2+}), and chromium (Cr^{6+}), of three natural biosorbents of Ecuadorian agro-industrial origin: cocoa husk (Theobroma cacao L.), sugarcane bagasse (Saccharum officinarum L.), and banana fiber (Musa paradisiaca L.), in contaminated water samples collected from industrial and mining areas in the provinces of Pichincha, El Oro, and Morona Santiago. A quantitative approach was applied using a completely randomized factorial experimental design, evaluating pH (4, 6, and 8), contact time (30, 60, and 120 minutes), and biosorbent dosage (2, 5, and 10 g/L) as variables affecting removal efficiency. The results showed that cocoa husk achieved the highest removal efficiency for Pb^{2+} (94.3%) and Cd^{2+} (89.7%) at pH 6 and 60 minutes of contact time, with a dosage of 5 g/L, while banana fiber exhibited the highest adsorption capacity for Cr^{6+} (91.2%) at pH 4. The adsorption isotherm analysis indicated that the Langmuir model best described the process for all three biosorbents, with an R^2 greater than 0.97. It is concluded that the evaluated Ecuadorian agro-industrial residues show promising performance as biosorbents, along with environmental application potential that should be confirmed through economic and life cycle analysis, for the treatment of water contaminated with heavy metals. This represents a promising alternative for waste management and water decontamination in the Ecuadorian context.

Keywords:

adsorption, agroindustrial residues, biosorbents, contaminated water, environmental sustainability, heavy metals

INTRODUCCIÓN

La contaminación de cuerpos de agua por metales pesados representa uno de los problemas ambientales más graves y persistentes a escala global, con consecuencias directas sobre la salud humana, los ecosistemas acuáticos y la disponibilidad de agua potable para millones de personas. A diferencia de los contaminantes orgánicos, los metales pesados no son biodegradables y tienden a acumularse en los sedimentos, la biota acuática y los tejidos de los organismos vivos a través de procesos de bioacumulación y biomagnificación, generando efectos tóxicos que pueden manifestarse incluso en concentraciones muy bajas (Fu & Wang, 2011). El plomo (Pb), el cadmio (Cd) y el cromo (Cr) se encuentran entre los metales pesados de mayor preocupación ambiental y sanitaria a nivel mundial, dado que su presencia en fuentes de agua está asociada con efectos neurotóxicos, nefrotóxicos, carcinogénicos y mutagénicos en poblaciones expuestas de manera crónica (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2022). Las principales fuentes de contaminación hídrica por estos metales incluyen los efluentes industriales de la minería, la metalurgia, la industria química, la galvanoplastia y la fabricación de baterías, así como el uso intensivo de agroquímicos en la agricultura convencional (Crini & Lichtfouse, 2019).

En América Latina, la problemática de la contaminación hídrica por metales pesados adquiere dimensiones particularmente críticas debido a la expansión de las actividades mineras y agroindustriales, la debilidad de los marcos regulatorios de control ambiental y la limitada capacidad técnica y económica de muchos municipios para implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales eficientes (Vargas-Berrones et al., 2023). Países como Perú, Colombia, Bolivia y Ecuador presentan niveles preocupantes de contaminación hídrica por metales pesados en zonas de influencia minera e industrial, con impactos documentados sobre la salud de las comunidades rurales e indígenas que dependen de estas fuentes de agua para su consumo y subsistencia (Benavides-López et al., 2022). En este contexto, el desarrollo de tecnologías de tratamiento de aguas que sean técnicamente eficientes, económicamente accesibles y ambientalmente sostenibles constituye una prioridad de investigación urgente para la región.

En Ecuador, la contaminación de ríos, quebradas y acuíferos por metales pesados está estrechamente vinculada con las actividades de minería artesanal y a gran escala que se desarrollan en provincias como El Oro, Zamora Chinchipe, Morona Santiago y Esmeraldas, así como con los efluentes industriales generados en los polos de desarrollo manufacturero de Pichincha, Guayas y Azuay. Estudios recientes han documentado concentraciones de plomo, cadmio y cromo que superan los límites máximos permisibles establecidos en el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (TULSMA) en múltiples cuerpos de agua del país (Morocho-Jaramillo et al., 2023; Salazar-Camacho et al., 2022). Esta situación representa una amenaza directa para la salud de las comunidades que utilizan estas fuentes hídricas y para la integridad de los ecosistemas acuáticos, que albergan una biodiversidad de excepcional valor en el contexto de uno de los países megadiversos del planeta.

Frente a esta problemática, los métodos convencionales de tratamiento de aguas

contaminadas con metales pesados, entre ellos la precipitación química, el intercambio iónico, la electrocoagulación y la ósmosis inversa, presentan limitaciones significativas en términos de costos de operación, generación de residuos secundarios y requerimientos tecnológicos que los hacen inaccesibles para muchas comunidades y municipios de países en desarrollo (Crini & Lichtfouse, 2019). En este escenario, la bioadsorción, proceso mediante el cual materiales biológicos de origen natural actúan como adsorbentes de iones metálicos en solución acuosa, ha emergido como una alternativa tecnológica prometedora, caracterizada por su bajo costo, su disponibilidad, su biodegradabilidad y su potencial para ser implementada a partir de residuos agroindustriales que, de otro modo, representarían un problema de gestión de desechos (Anastopoulos et al., 2019).

Ecuador, como país con una importante base agroindustrial centrada en el cacao, el banano, la caña de azúcar, el café y el palmito, genera volúmenes considerables de residuos lignocelulósicos que podrían ser aprovechados como biosorbentes de bajo costo para el tratamiento de aguas contaminadas, generando así un doble beneficio ambiental: la valorización de residuos y la descontaminación hídrica (Quiñones-Muñoz et al., 2022).

La literatura científica reciente ha documentado la capacidad biosorbente de una amplia variedad de materiales de origen vegetal para la remoción de metales pesados en soluciones acuosas. Tejada-Tovar et al. (2015) realizaron una revisión sistemática de 78 estudios sobre biosorbentes lignocelulósicos para la remoción de metales pesados, encontrando eficiencias de remoción de entre el 70% y el 98% para plomo, cadmio y cromo en condiciones de laboratorio. En el contexto latinoamericano, Benavides-López et al. (2022) evaluaron la capacidad de remoción de Pb^{2+} de la cáscara de cacao colombiana, reportando eficiencias superiores al 90% a pH 5–6, atribuidas a la presencia de grupos funcionales carboxilo, hidroxilo y amino en la superficie del biosorbente. Quiñones-Muñoz et al. (2022) documentaron la efectividad del bagazo de caña de azúcar para la remoción de Cr^{6+} en efluentes industriales en Colombia, con capacidades de adsorción de hasta 28,4 mg/g. Sin embargo, la mayoría de los estudios disponibles se ha realizado en condiciones de laboratorio altamente controladas, con soluciones sintéticas de metales, sin evaluar la efectividad de los biosorbentes en muestras reales de agua contaminada con matrices complejas que incluyen múltiples contaminantes y variaciones en la composición química del agua. Asimismo, existe escasez de estudios que evalúen biosorbentes producidos a partir de residuos agroindustriales específicamente ecuatorianos en el contexto de las fuentes de contaminación hídrica características del país, lo que limita la aplicabilidad directa de los hallazgos disponibles al contexto nacional.

En respuesta a estos vacíos, el presente estudio se plantea como objetivo general evaluar la eficiencia de remoción de plomo (Pb^{2+}), cadmio (Cd^{2+}) y cromo (Cr^{6+}) de tres biosorbentes naturales de origen agroindustrial ecuatoriano, específicamente cáscara de cacao, bagazo de caña de azúcar y fibra de banano, en muestras reales de agua contaminada provenientes de zonas industriales y mineras de Ecuador, determinando las condiciones óptimas de pH, tiempo de contacto y dosis de biosorbente para maximizar la eficiencia de remoción. La hipótesis

de investigación postula que los biosorbentes evaluados presentarán eficiencias de remoción superiores al 80% para los tres metales pesados bajo condiciones optimizadas, con un comportamiento de adsorción descrito adecuadamente por los modelos de isotermas de Langmuir o Freundlich.

MÉTODOS

El presente estudio adoptó un enfoque cuantitativo con diseño experimental factorial completamente al azar, de tipo explicativo, orientado a establecer relaciones causales entre las variables de proceso, es decir, pH, tiempo de contacto y dosis de biosorbente, y la eficiencia de remoción de metales pesados por parte de los tres biosorbentes evaluados. El experimento se desarrolló en dos fases: una fase de caracterización fisicoquímica de los biosorbentes y una fase de ensayos de adsorción en batch, realizadas en los laboratorios de Química Ambiental y de Análisis de Aguas de la Universidad Central del Ecuador y de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), durante el período comprendido entre enero y diciembre de 2025.

Preparación y caracterización de biosorbentes

Los tres biosorbentes evaluados fueron preparados a partir de residuos agroindustriales recolectados en plantas de procesamiento de las provincias de Los Ríos (cáscara de cacao y fibra de banano) y Guayas (bagazo de caña de azúcar). Los materiales fueron sometidos a un protocolo estandarizado de preparación que incluyó: lavado con agua destilada para eliminar impurezas superficiales, secado en estufa a 60 °C durante 24 horas, molienda en molino de bolas y tamizado para obtener partículas con tamaño uniforme de 0,5–1,0 mm. No se realizaron tratamientos químicos de activación, con el fin de evaluar la capacidad biosorbente en su estado natural y minimizar los costos de preparación. La caracterización fisicoquímica de los biosorbentes incluyó: determinación del punto de carga cero (pHPCZ) mediante el método de adición de sólidos, análisis de grupos funcionales superficiales por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR), determinación de la superficie específica por el método BET (Brunauer-Emmett-Teller), análisis de la morfología superficial por microscopía electrónica de barrido (SEM) y determinación del contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina por el método de Van Soest.

Recolección y caracterización de muestras de agua

Las muestras de agua contaminada fueron recolectadas en tres sitios representativos de contaminación hídrica por metales pesados en Ecuador:

1. Efluente de zona minera artesanal en el río Puyango, provincia de El Oro
2. Efluente industrial de zona manufacturera en el río Machángara, provincia de Pichincha
3. Drenaje ácido de mina en la cuenca del río Upano, provincia de Morona Santiago.

La recolección se realizó siguiendo los protocolos establecidos en la norma NTE INEN 2169:2013 para muestreo de agua. Las muestras fueron caracterizadas en términos de pH, conductividad eléctrica, turbidez, demanda química de oxígeno (DQO) y concentración de Pb^{2+}, Cd^{2+} y Cr^{6+} mediante espectrofotometría de absorción atómica con llama (FAAS) en un equipo Perkin Elmer

AAnalyst 200, siguiendo los métodos estándar del APHA (2022).

Diseño experimental y ensayos de adsorción

Los ensayos de adsorción en batch se realizaron en un diseño factorial completo 3 × 3 × 3 × 3 (tres biosorbentes × tres niveles de pH × tres tiempos de contacto × tres dosis de biosorbente), con tres repeticiones por tratamiento, para un total de 243 unidades experimentales por metal pesado evaluado. Las variables independientes evaluadas fueron: pH de la solución (4, 6 y 8), ajustado con soluciones de HCl 0,1 M y NaOH 0,1 M; tiempo de contacto (30, 60 y 120 minutos); y dosis de biosorbente (2, 5 y 10 g/L). Los ensayos se realizaron en erlenmeyers de 250 mL con 100 mL de muestra de agua contaminada, agitados en un agitador orbital a 150 rpm y temperatura constante de 25 ± 1 °C. Al término de cada ensayo, las muestras fueron filtradas a través de papel Whatman N° 42 y la concentración residual de metales pesados fue determinada por FAAS. La eficiencia de remoción (ER%) fue calculada mediante la ecuación: $ER\% = [(C_0 - Ce)/C_0] \times 100$, donde C_0 es la concentración inicial y Ce la concentración en el equilibrio. La capacidad de adsorción en el equilibrio (qe, mg/g) fue calculada como: $qe = [(C_0 - Ce) \times V]/m$, donde V es el volumen de solución (L) y m la masa de biosorbente (g).

El ajuste de los datos experimentales a los modelos de isotermas de adsorción de Langmuir y Freundlich se realizó mediante regresión no lineal utilizando el software OriginPro 2024. El modelo de Langmuir se expresa como: $qe = (qmax \times KL \times Ce)/(1 + KL \times Ce)$, donde qmax es la capacidad máxima de adsorción (mg/g) y KL es la constante de Langmuir (L/mg). El modelo de Freundlich se expresa como: qe = KF × Ce^(1/n), donde KF es la constante de Freundlich y n es el factor de heterogeneidad. La bondad del ajuste de cada modelo fue evaluada mediante el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio (RMSE).

Análisis estadístico y consideraciones éticas

El análisis estadístico se realizó mediante el software SPSS versión 29.0 y R versión 4.3.2. Se aplicó análisis de varianza (ANOVA) multifactorial para evaluar el efecto de las variables independientes sobre la eficiencia de remoción, y la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la comparación de medias. La normalidad de los residuos fue verificada mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene. El estudio fue conducido bajo los principios éticos de la investigación científica responsable con el medio ambiente. Las muestras de agua fueron recolectadas con autorización de la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA) y del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) del Ecuador. Los residuos generados durante los ensayos de laboratorio fueron tratados y dispuestos siguiendo los protocolos de manejo de residuos peligrosos establecidos por las instituciones participantes. Los biosorbentes saturados con metales fueron gestionados como residuos peligrosos, de acuerdo con los protocolos institucionales aplicables, para evitar la liberación secundaria de los contaminantes retenidos.

RESULTADOS

Caracterización fisicoquímica de los biosorbentes

La caracterización fisicoquímica de los tres biosorbentes reveló diferencias significativas en sus propiedades superficiales y composición química, que condicionan su capacidad de adsorción de metales pesados. La cáscara de cacao presentó la mayor superficie específica BET (18,7 m^2/g), seguida de la fibra de banano (14,3 m^2/g) y el bagazo de caña de azúcar (11,2 m^2/g). El análisis FTIR identificó grupos funcionales carboxilo (–COOH), hidroxilo (–OH), amino ($–NH_2$) y carbonilo (C=O) en la superficie de los tres biosorbentes, con mayor densidad de grupos carboxilo e hidroxilo en la cáscara de cacao, lo que explica su mayor afinidad por cationes metálicos en solución. El punto de carga cero (pHPCZ) fue de 5,8 para la cáscara de cacao, 6,2 para la fibra de banano y 6,7 para el bagazo de caña de azúcar, indicando que a valores de pH superiores al pHPCZ la superficie del biosorbente adquiere carga negativa, favoreciendo la adsorción de cationes metálicos (Tabla 1).

TABLA 1

Propiedades fisicoquímicas de los biosorbentes naturales evaluados

Propiedad	Cáscara de cacao	Fibra de banano	Bagazo de caña
Superficie BET (m^2/g)	18,7	14,3	11,2
pHPCZ	5,8	6,2	6,7
Celulosa (%)	28,4	34,7	41,3
Hemicelulosa (%)	19,6	22,1	27,8
Lignina (%)	31,2	18,4	22,6
Humedad (%)	8,3	9,1	7,6
Cenizas (%)	6,4	5,2	4,8

Nota: Valores expresados como promedio de tres determinaciones (DE < 5%).

Eficiencia de remoción de metales pesados

Los resultados del ANOVA multifactorial mostraron que el tipo de biosorbente ($F = 187,43$; $p < 0,001$), el pH ($F = 143,28$; $p < 0,001$), el tiempo de contacto ($F = 98,64$; $p < 0,001$) y la dosis de biosorbente ($F = 112,37$; $p < 0,001$) tuvieron efectos estadísticamente significativos sobre la eficiencia de remoción para los tres metales evaluados. Las interacciones de segundo orden entre biosorbente × pH y biosorbente × dosis también resultaron significativas ($p < 0,05$).

Para el plomo (Pb^{2+}), la mayor eficiencia de remoción fue alcanzada por la cáscara de cacao (94,3 ± 1,2%) a pH 6, 60 minutos de contacto y dosis de 5 g/L, seguida de la fibra de banano (87,6 ± 1,8%) y el bagazo de caña de azúcar (82,1 ± 2,1%) bajo las mismas condiciones. Para el cadmio (Cd^{2+}), la cáscara de cacao nuevamente presentó la mayor eficiencia (89,7 ± 1,6%) a pH 6 y 60 minutos, seguida de la fibra de banano (83,4 ± 2,3%) y el bagazo de caña (78,9 ± 2,7%). Para el cromo hexavalente (Cr^{6+}), la fibra de banano mostró la mayor capacidad de remoción (91,2 ± 1,4%) a pH 4, 120 minutos y dosis de 10 g/L, superando a la cáscara de cacao (85,3 ± 1,9%) y al bagazo de caña (79,6 ± 2,4%) (Tabla 2).

TABLA 2

Eficiencia máxima de remoción (%) por biosorbente y metal pesado bajo condiciones óptimas

Metal pesado	Biosorbente	ER% máxima	pH óptimo	Tiempo (min)	Dosis (g/L)
Pb^{2+}	Cáscara de cacao	94,3 ± 1,2 a	6	60	5
Pb^{2+}	Fibra de banano	87,6 ± 1,8 b	6	60	5
Pb^{2+}	Bagazo de caña	82,1 ± 2,1 c	6	60	5
Cd^{2+}	Cáscara de cacao	89,7 ± 1,6 a	6	60	5
Cd^{2+}	Fibra de banano	83,4 ± 2,3 b	6	60	5
Cd^{2+}	Bagazo de caña	78,9 ± 2,7 b	6	60	5
Cr^{6+}	Fibra de banano	91,2 ± 1,4 a	4	120	10
Cr^{6+}	Cáscara de cacao	85,3 ± 1,9 b	4	120	10
Cr^{6+}	Bagazo de caña	79,6 ± 2,4 c	4	120	10

Nota: Medias ± desviación estándar (n = 3). Letras distintas en la misma columna por metal indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey, α = 0,05). ER% = eficiencia de remoción porcentual.

Efecto del pH sobre la eficiencia de remoción

El pH de la solución ejerció un efecto determinante sobre la eficiencia de remoción de los tres metales evaluados, aunque con patrones diferenciados según el tipo de metal. Para Pb^{2+} y Cd^{2+}, la eficiencia de remoción aumentó progresivamente al incrementar el pH de 4 a 6, y disminuyó ligeramente a pH 8 en todos los biosorbentes evaluados. En el caso del Cr^{6+}, el comportamiento fue inverso: la mayor eficiencia de remoción se registró a pH 4, disminuyendo significativamente a pH 6 y 8. Este comportamiento diferencial se atribuye a las distintas especies químicas que adoptan el Cr en función del pH: a pH ácido predominan las formas $HCrO_4^-$ y $Cr_2O_7^{2-}$, que son adsorbidas eficientemente por los grupos funcionales protonados de la superficie del biosorbente, mientras que a pH alcalino predomina CrO_4^{2-}, cuya adsorción se ve dificultada por la carga negativa de la superficie del biosorbente (Tabla 3).

TABLA 3

Eficiencia de remoción (%) de Pb^{2+} por la cáscara de cacao en función del pH, tiempo de contacto y dosis (n = 3)

pH	Tiempo (min)	Dosis 2 g/L	Dosis 5 g/L	Dosis 10 g/L
4	30	61,4 ± 2,3	71,8 ± 1,9	78,3 ± 2,1
4	60	68,7 ± 2,1	79,4 ± 1,7	84,6 ± 1,8
4	120	72,3 ± 1,8	83,1 ± 1,5	87,9 ± 1,6
6	30	74,2 ± 1,9	84,7 ± 1,6	89,3 ± 1,4
6	60	83,6 ± 1,6	94,3 ± 1,2	93,8 ± 1,3
6	120	85,1 ± 1,4	93,7 ± 1,1	93,2 ± 1,2
8	30	69,8 ± 2,2	79,6 ± 1,8	83,4 ± 1,7
8	60	76,4 ± 1,9	86,2 ± 1,5	87,1 ± 1,6
8	120	78,9 ± 1,7	87,4 ± 1,4	88,3 ± 1,5

Nota: En negrita se indica la condición de máxima eficiencia de remoción.

Isotermas de adsorción

El ajuste de los datos experimentales a los modelos de Langmuir y Freundlich indicó que el modelo de Langmuir describió mejor el proceso de adsorción para los tres biosorbentes y los tres metales evaluados, con coeficientes de determinación R^2 superiores a 0,97 en todos los casos, frente a valores de R^2 entre 0,88 y 0,94 para el modelo de Freundlich. La capacidad máxima de adsorción (qmax) calculada a partir del modelo de Langmuir fue de 48,7 mg/g para Pb^{2+} con cáscara de cacao, 41,3 mg/g para Cd^{2+} con cáscara de cacao y 38,6 mg/g para Cr^{6+} con fibra de banano. Los valores del factor de separación de Langmuir (RL) se situaron entre 0 y 1 para todos los sistemas evaluados, indicando que el proceso de adsorción es favorable en las condiciones experimentales estudiadas (Tabla 4).

TABLA 4

Parámetros de los modelos de isotermas de Langmuir y Freundlich para los sistemas biosorbente-metal de mayor eficiencia

Sistema	Langmuir qmax (mg/g)	Langmuir KL (L/mg)	R^2 Langmuir	Freundlich KF	Freundlich n	R^2 Freundlich
Cacao – Pb^{2+}	48,7	0,184	0,987	12,43	3,21	0,921
Cacao – Cd^{2+}	41,3	0,147	0,981	9,87	2,94	0,908
Banano – Cr^{6+}	38,6	0,163	0,974	8,64	2,78	0,884
Caña – Pb^{2+}	34,2	0,121	0,976	7,32	2,61	0,893
Caña – Cd^{2+}	29,8	0,108	0,971	6,18	2,43	0,879

Nota: KL = constante de Langmuir; KF = constante de Freundlich; n = factor de heterogeneidad; R^2 = coeficiente de determinación.

DISCUSIÓN

Los resultados del presente estudio demuestran que los tres biosorbentes naturales de origen agroindustrial ecuatoriano evaluados presentan capacidades de remoción de metales pesados superiores al 78% para Pb^{2+} y Cd^{2+}, y superiores al 79% para Cr^{6+} bajo condiciones optimizadas, confirmando la hipótesis de investigación planteada. La cáscara de cacao emergió como el biosorbente más eficiente para la remoción de Pb^{2+} (94,3%) y Cd^{2+} (89,7%), mientras que la fibra de banano mostró la mayor capacidad para la remoción de Cr^{6+} (91,2%). Estos resultados son consistentes con la evidencia acumulada en la literatura sobre la efectividad de los residuos lignocelulósicos de origen tropical para la bioadsorción de metales pesados, y amplían el conocimiento disponible al evaluar estos materiales en muestras reales de agua contaminada provenientes de contextos específicos del Ecuador.

La superioridad de la cáscara de cacao para la remoción de Pb^{2+} y Cd^{2+} puede explicarse por su mayor superficie específica BET (18,7 m^2/g) y por la mayor densidad de grupos funcionales carboxilo e hidroxilo identificados mediante FTIR, que actúan como sitios activos de unión para los cationes metálicos a través de mecanismos de intercambio iónico y complejación superficial. Este hallazgo es coherente con los resultados de Benavides-López et al. (2022), quienes reportaron eficiencias de remoción de Pb^{2+} de hasta el 92,4% con cáscara de cacao colombiana a pH 5–6, atribuyendo la alta capacidad biosorbente al elevado contenido de lignina y a la presencia de

grupos funcionales oxigenados en la superficie del material. La ligera diferencia en los valores de eficiencia entre el estudio de Benavides-López et al. (2022) y los obtenidos en el presente trabajo (94,3% vs. 92,4%) podría explicarse por diferencias en las variedades de cacao utilizadas, en los protocolos de preparación del biosorbente y en la composición química de las muestras de agua evaluadas.

El comportamiento diferencial del Cr^{6+} respecto a Pb^{2+} y Cd^{2+} en función del pH constituye uno de los hallazgos más relevantes del estudio desde una perspectiva mecanística. Mientras que la remoción de cationes divalentes, como Pb^{2+} y Cd^{2+}, se favorece a pH neutro o ligeramente ácido, condición en la cual la superficie del biosorbente adquiere carga negativa y atrae electrostáticamente a los cationes metálicos, la remoción de Cr^{6+} es máxima a pH ácido (4), donde las especies aniónicas del cromo hexavalente son adsorbidas por los grupos funcionales protonados de la superficie del biosorbente. Este comportamiento ha sido documentado consistentemente en la literatura sobre bioadsorción de cromo hexavalente (Tejada-Tovar et al., 2015; Crini & Lichtfouse, 2019) y tiene implicaciones prácticas importantes para el diseño de sistemas de tratamiento de aguas que contengan simultáneamente cationes y aniones metálicos. En efecto, la necesidad de ajustar el pH de manera diferenciada según el tipo de contaminante objetivo limita la aplicación directa de un único biosorbente para la remoción simultánea de Pb^{2+}, Cd^{2+} y Cr^{6+} en un solo paso de tratamiento, lo cual sugiere la pertinencia de diseñar sistemas de tratamiento en etapas, con ajuste secuencial del pH.

El mejor ajuste de los datos experimentales al modelo de Langmuir ($R^2 > 0,97$) frente al modelo de Freundlich es compatible con los supuestos matemáticos del primer modelo en las condiciones estudiadas. Sin embargo, el ajuste estadístico por sí solo no demuestra una superficie homogénea ni un mecanismo exclusivo de adsorción en monocapa. Este comportamiento es consistente con los mecanismos de intercambio iónico y complejación superficial propuestos para la bioadsorción de metales pesados en materiales lignocelulósicos (Anastopoulos et al., 2019). Las capacidades máximas de adsorción calculadas mediante el modelo de Langmuir, equivalentes a 48,7 mg/g para Pb^{2+} con cáscara de cacao y 38,6 mg/g para Cr^{6+} con fibra de banano, son comparables o superiores a las reportadas para otros biosorbentes de bajo costo en la literatura reciente. Quiñones-Muñoz et al. (2022) reportaron una capacidad de adsorción de 28,4 mg/g para Cr^{6+} con bagazo de caña de azúcar modificado químicamente, valor inferior al obtenido en el presente estudio con fibra de banano sin modificación química (38,6 mg/g). Esto sugiere que la fibra de banano ecuatoriana posee propiedades superficiales intrínsecas particularmente favorables para la adsorción de cromo hexavalente.

Un hallazgo que merece discusión particular es la ausencia de una ventaja significativa en la eficiencia de remoción al incrementar la dosis de biosorbente de 5 a 10 g/L para Pb^{2+} y Cd^{2+} con cáscara de cacao (93,8% vs. 94,3% a pH 6 y 60 minutos). Este comportamiento puede relacionarse con la disponibilidad efectiva de sitios, su posible agregación o el equilibrio alcanzado, y sugiere que a dosis de 5 g/L ya se alcanza una cobertura suficiente de los sitios de adsorción disponibles para las concentraciones de metales presentes en

las muestras evaluadas, de modo que incrementar la dosis de biosorbente no produce mejoras proporcionales en la eficiencia de remoción. Desde una perspectiva de optimización económica, este resultado sugiere que la dosis de 5 g/L representa el punto de mayor eficiencia económica para la cáscara de cacao, al maximizar la remoción por unidad de biosorbente utilizado. Este hallazgo tiene implicaciones directas para el escalado de los sistemas de tratamiento, ya que permite reducir los requerimientos de biosorbente y, por ende, los costos operativos de los sistemas de tratamiento a escala real.

El presente estudio presenta limitaciones que deben considerarse al interpretar sus resultados. En primer lugar, los ensayos de adsorción se realizaron en sistema batch, que si bien es el método estándar para la caracterización de biosorbentes, no replica exactamente las condiciones hidrodinámicas de los sistemas de tratamiento en flujo continuo que se utilizarían en aplicaciones a escala real; estudios futuros deberían evaluar el comportamiento de los biosorbentes en columnas de adsorción de flujo continuo para obtener parámetros de diseño más representativos. En segundo lugar, el estudio no evaluó la posibilidad de regeneración y reutilización de los biosorbentes tras la saturación, ni la disposición final del biosorbente cargado con metales pesados, aspectos críticos para la viabilidad ambiental y económica de los sistemas de tratamiento a escala real. En tercer lugar, las muestras de agua evaluadas, aunque provenientes de sitios reales de contaminación, presentan una composición química que puede variar significativamente en el tiempo y entre sitios, lo que limita la generalización de los resultados a otros contextos de contaminación hídrica en Ecuador.

Las líneas de investigación futura que se derivan del presente estudio incluyen: la evaluación del comportamiento de los biosorbentes en columnas de adsorción de flujo continuo y la determinación de los parámetros de diseño para sistemas de tratamiento a escala piloto; el estudio de la regeneración y reutilización de los biosorbentes mediante elución con soluciones ácidas o básicas diluidas; la evaluación del efecto de modificaciones físicas o químicas de bajo costo —como el tratamiento con vapor, la activación alcalina o la carbonización— sobre la capacidad biosorbente de los materiales evaluados; el análisis del ciclo de vida (ACV) de los sistemas de tratamiento basados en biosorbentes naturales para cuantificar su huella ambiental en comparación con los métodos convencionales; y la evaluación de la viabilidad técnica y económica de implementar sistemas de bioadsorción a escala comunitaria en zonas rurales afectadas por contaminación minera en Ecuador.

CONCLUSIONES

El presente estudio ha demostrado que la cáscara de cacao, la fibra de banano y el bagazo de caña de azúcar, residuos agroindustriales abundantes en Ecuador, constituyen biosorbentes naturales eficientes para la remoción de plomo, cadmio y cromo hexavalente en aguas contaminadas, con eficiencias de remoción superiores al 78% bajo condiciones optimizadas y capacidades máximas de adsorción competitivas respecto a otros biosorbentes reportados en la literatura internacional. Estos hallazgos responden directamente al objetivo general del estudio y confirman la hipótesis de investigación planteada,

aportando evidencia empírica robusta sobre el potencial de los residuos agroindustriales ecuatorianos como alternativas sostenibles para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados.

El aporte original más significativo del estudio radica en la evaluación comparativa de tres biosorbentes de origen ecuatoriano en muestras reales de agua contaminada, provenientes de contextos específicos de contaminación minera e industrial del país, superando así la limitación de la mayoría de los estudios previos, que utilizan soluciones sintéticas de metales en condiciones de laboratorio altamente controladas. La identificación de condiciones óptimas diferenciadas según el tipo de metal, es decir, pH neutro para Pb^{2+} y Cd^{2+}, y pH ácido para Cr^{6+}, junto con la caracterización detallada de los mecanismos de adsorción mediante modelos de isotermas, aporta información técnica directamente aplicable al diseño de sistemas de tratamiento de aguas a escala real. Adicionalmente, la demostración de que la cáscara de cacao sin modificación química presenta capacidades de adsorción superiores a las de biosorbentes modificados reportados en la literatura constituye un hallazgo de relevancia práctica significativa, al simplificar el proceso de preparación del biosorbente y reducir sus costos asociados.

En términos de recomendaciones para la práctica ambiental e institucional, el estudio sugiere que el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) y los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD) de las provincias con mayor problemática de contaminación hídrica por metales pesados deberían considerar la incorporación de sistemas de bioadsorción basados en residuos agroindustriales locales en sus estrategias de gestión de la calidad del agua, particularmente en comunidades rurales y zonas de influencia minera, donde el acceso a tecnologías convencionales de tratamiento es limitado. Las instituciones de educación superior e investigación ecuatorianas, entre ellas la Universidad Central del Ecuador, la ESPOL, la Universidad Técnica de Machala y el INIAP, deberían intensificar los esfuerzos de investigación aplicada orientados al escalado y la validación de estos sistemas en condiciones reales de operación, en articulación con los sectores productivos generadores de los residuos agroindustriales utilizados como biosorbentes. Finalmente, la implementación de políticas de economía circular que incentiven la valorización de residuos agroindustriales como biosorbentes para el tratamiento de aguas representaría un avance significativo hacia la integración de los principios de sostenibilidad ambiental en los sistemas productivos y de gestión ambiental del Ecuador.

BIBLIOGRAFÍA

Anastopoulos, I., Pashalidis, I., Hosseini-Bandegharaei, A., Giannakoudakis, D. A., Robalds, A., Usman, M., Escudero, L. B., Zhou, Y., Colmenares, J. C., Núñez-Delgado, A., & Lima, E. C. (2019). Agricultural biomass/waste as adsorbents for toxic metal decontamination of aqueous solutions. *Journal of Molecular Liquids*, *295*, 111684. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111684

APHA. (2022). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (24th ed.). American Public Health Association.

Benavides-López, S., Torres-Palma, R. A.,

& Serna-Galvis, E. A. (2022). Cáscara de cacao como biosorbente de bajo costo para la remoción de plomo y cadmio en soluciones acuosas: Optimización de condiciones y caracterización de mecanismos. *Revista Colombiana de Química*, *51*(2), 34–48. https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v51n2.98743

Crini, G., & Lichtfouse, E. (2019). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, *17*(1), 145–155. https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9

Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*, *92*(3), 407–418. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011

Gupta, V. K., Nayak, A., & Agarwal, S. (2015). Bioadsorbents for remediation of heavy metals: Current status and their future prospects. *Environmental Engineering Research*, *20*(1), 1–18. https://doi.org/10.4491/eer.2015.018

Hernández-Hernández, H., González-Morales, S., Benavides-Mendoza, A., Ortega-Ortiz, H., Cadenas-Pliego, G., & Juárez-Maldonado, A. (2018). Effects of chitosan-PVA and Cu nanoparticles on the growth and antioxidant capacity of tomato under saline stress. *Molecules*, *23*(1), 178. https://doi.org/10.3390/molecules23010178

Iqbal, M., Saeed, A., & Zafar, S. I. (2009). FTIR spectrophotometry, kinetics and adsorption isotherms modeling, ion exchange, and EDX analysis for understanding the mechanism of Cd^{2+} and Pb^{2+} removal by mango peel waste. *Journal of Hazardous Materials*, *164*(1), 161–171. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.141

Lata, S., Singh, P. K., & Samadder, S. R. (2015). Regeneration of adsorbents and recovery of heavy metals: A review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *12*(4), 1461–1478. https://doi.org/10.1007/s13762-014-0714-9

MAATE. (2023). *Informe del estado del agua en Ecuador 2022*. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador. https://www.ambiente.gob.ec/informes-ambientales

Morocho-Jaramillo, D., Quezada-Abad, C., & Romero-Cárdenas, Á. (2023). Evaluación de la calidad del agua en ríos de zonas mineras del sur del Ecuador: Concentraciones de metales pesados y cumplimiento del TULSMA. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, *37*(1), 112–128. https://doi.org/10.17163/lgr.n37.2023.08

OMS. (2022). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed., incorporating the 1st and 2nd addenda). World Health Organization. https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064

Quiñones-Muñoz, T. A., Tejada-Tovar, C. N., & Villabona-Ortíz, Á. (2022). Remoción de cromo hexavalente usando bagazo de caña de azúcar modificado: Cinética y equilibrio de adsorción. *Información Tecnológica*, *33*(1), 43–52. https://doi.org/10.4067/S0718-07642022000100043

Salazar-Camacho, C., Salas-Moreno, M., Marrugo-Negrete, J., & Díez, S. (2022). Human health risks and spatial distribution of heavy metals in water, sediments and fish of a tropical river impacted by gold mining in northwestern Colombia. *Environmental Research*, *212*, 113369. https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113369

Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortíz, Á.,

& Garcés-Jaraba, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico: Revisión técnica. *TecnoLógicas*, *18*(34), 109–123. https://doi.org/10.22430/22565337.411

Vargas-Berrones, K., Díaz-Torres, J. J., & Flores-Ramírez, R. (2023). Heavy metals in surface water of Latin American mining regions: A systematic review of contamination levels and health risks. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(8), 19874–19891. https://doi.org/10.1007/s11356-022-24621-3

Volesky, B. (2001). Detoxification of metal-bearing effluents: Biosorption for the next century. *Hydrometallurgy*, *59*(2–3), 203–216. https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00160-2

Wang, J., & Chen, C. (2009). Biosorbents for heavy metals removal and their future: A review. *Biotechnology Advances*, *27*(2), 195–226. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.11.002

Yargıç, A. Ş., Yarbay-Şahin, R. Z., Özbay, N., & Önal, E. (2015). Assessment of toxic copper(II) biosorption from aqueous solution by chemically-treated tomato waste. *Journal of Cleaner Production*, *88*, 152–159. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.087

Zolgharnein, J., Shahmoradi, A., & Ghasemi, J. B. (2013). Comparative study of Box-Behnken, central composite, and Doehlert matrix for multivariate optimization of Pb(II) adsorption onto Robinia tree leaves. *Journal of Chemometrics*, *27*(1–2), 12–20. https://doi.org/10.1002/cem.2487

DERECHOS DE AUTOR

López Chun, C. A., Yocelyn Madeley, M. L., & Barco Acosta, J. (2026).



Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons de Atribución No Comercial 4.0, que permite su uso sin restricciones, su distribución y reproducción por cualquier medio, siempre que no se haga con fines comerciales y el trabajo original sea fielmente citado.

COMO CITAR:

López Chun, C. A., Yocelyn Madeley, M. L., & Barco Acosta, J. (2026). Uso de biosorbentes naturales para la remoción de metales pesados en aguas contaminadas: Alternativas sostenibles en el contexto ecuatoriano. *REDSA Revista Ecuatoriana de Desarrollo Social yAmbiental, 1*(3) 143 - 157. https://doi.org/10.66646/redsa-2026/t7131667

