

<https://doi.org/10.69639/arandu.v13i3.2514>

Biosorción de cadmio (Cd^{2+}) en medios acuosos mediante biocarbones agrícolas: una revisión sistemática con enfoque en residuos de cacao

Cadmium (Cd^{2+}) biosorption from aqueous media using agricultural biochars: A systematic review focusing on cocoa waste

Delly Maribel San Martin

dsanmartin@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-4680-4042>

Universidad Técnica de Machala
Machala, El Oro, Ecuador

Alex Andrés Ordóñez López

aordonez16@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0008-0022-3497>

Universidad Técnica de Machala
Santa Rosa, El Oro, Ecuador

Pierre Luigui Ordóñez Toro

pordonez4@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0003-0206-2272>

Universidad Técnica de Machala
Zaruma, El Oro, Ecuador

Stefany Paulette Vilela Castro

svilela3@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0003-2713-3313>

Universidad Técnica de Machala
Arenillas, El Oro, Ecuador

Artículo recibido: 10 julio 2026- Aceptado para publicación: 16 agosto 2026
Conflictos de intereses: Ninguno que declarar.

RESUMEN

El cadmio (Cd^{2+}) vertido en cuerpos de agua representa una amenaza para los ecosistemas y la salud humana debido a su toxicidad y bioacumulación. Los tratamientos físico-químicos convencionales resultan costosos y perjudican al ambiente. En este contexto, la biosorción mediante biocarbones agrícolas surge como una alternativa sostenible frente a los tratamientos convencionales. Este trabajo analiza la evidencia científica sobre la capacidad de biosorción del Cd^{2+} , evaluando condiciones experimentales, cinética de reacción e isothermas de equilibrio, con un enfoque comparativo centrado en el biocarbón de residuos de cacao (*Theobroma cacao* L.). La revisión sistemática se estructuró según PRISMA 2020, abarcando búsquedas en Scopus, Web of Science, PubMed, SciELO y Google Scholar. De una búsqueda inicial de 152 registros, se seleccionaron 52 tras aplicar criterios de elegibilidad, de los cuales 12 evalúan directamente

biomasa de cacao y 40 corresponden a otros utilizados como referencia. La evidencia revisada coincide en que el proceso se ajusta de manera predominante al modelo cinético de pseudo-segundo orden y a la isoterma de Langmuir. Las capacidades máximas de adsorción variaron entre 18 y 67 mg/g, en un rango condicionado por la biomasa de origen, la temperatura de pirólisis y un pH óptimo de entre 5,5 y 7. Frente a otros biosorbentes, los residuos de cacao mostraron resultados competitivos, lo cual se explica por la abundancia de grupos funcionales oxigenados en su superficie. Se identificaron vacíos de conocimiento sobre el comportamiento del material en matrices de agua real, en sistemas de flujo continuo y durante ciclos de regeneración.

Palabras clave: biocarbón, cadmio, biosorción, residuos de cacao, cinética de adsorción

ABSTRACT

Cadmium (Cd^{2+}) released into water bodies poses a threat to ecosystems and human health due to its toxicity and bioaccumulation. Conventional physicochemical treatments are costly and environmentally damaging. In this context, biosorption using agricultural biochars emerges as a sustainable alternative to conventional treatments. This work analyzes the scientific evidence on the biosorption capacity of Cd^{2+} , evaluating experimental conditions, reaction kinetics, and equilibrium isotherms, with a comparative approach focused on biochar from cocoa waste (*Theobroma cacao* L.). The systematic review was structured according to the PRISMA 2020 protocol, encompassing searches in Scopus, Web of Science, PubMed, SciELO, and Google Scholar. From an initial search of 152 records, 52 studies were selected after applying eligibility criteria, of which 12 directly evaluate cocoa biomass and 40 correspond to other agricultural biosorbents used as a reference. The reviewed evidence agrees that the process predominantly follows the pseudo-second-order kinetic model and the Langmuir isotherm. Maximum adsorption capacities ranged from 18 to 67 mg/g, within a range conditioned by the source biomass, pyrolysis temperature, and an optimum pH between 5.5 and 7. Compared to other biosorbents, cocoa waste showed competitive results, explained by the abundance of oxygenated functional groups on its surface. Knowledge gaps were identified regarding the material's behavior in real water matrices, in continuous flow systems, and during regeneration cycles.

Keywords: biochar, cadmium, biosorption, cocoa waste, adsorption kinetics

Todo el contenido de la Revista Científica Internacional Arandu UTIC publicado en este sitio está disponible bajo licencia Creative Commons Attribution 4.0 International. 

INTRODUCCIÓN

El cadmio (Cd^{2+}), junto con el plomo (Pb) y el mercurio (Hg), se constituye como uno de los metales pesados de mayor preocupación dentro de la gestión ambiental y la calidad del agua. A diferencia de otros contaminantes orgánicos, este no se degrada, se acumula en sedimentos y organismos acuáticos, ingresando a la cadena alimentaria. La Organización Mundial de la Salud establece un límite máximo permisible de 0,003 mg/L para el agua de consumo humano (WHO, 2011). En zonas con actividad agrícola intensiva, minera e industrial, este umbral normativo es superado de forma recurrente, representando una amenaza directa para la salud pública y los ecosistemas acuáticos (Ge et al., 2024; Vera et al., 2016).

Para la remoción de Cd^{2+} , las tecnologías físico-químicas tradicionales como la precipitación química, intercambio iónico, filtración por membranas y la electrocoagulación muestran ser eficientes en efluentes con concentraciones elevadas. No obstante, su aplicación presenta severas restricciones técnicas y económicas en la eliminación de trazas: la precipitación genera volúmenes considerables de lodos tóxicos; el intercambio iónico experimenta un rápido ensuciamiento de las resinas en presencia de matrices complejas; las membranas de filtración demandan un elevado consumo energético; y la electrocoagulación requiere la adición continua de reactivos e insumos de alto costo (Medina et al., 2020). Debido a esto, la biosorción mediante biomasa residual agroindustrial se posiciona como una alternativa sostenible y de bajo costo, capaz de retener eficientemente metales pesados en su superficie.

Ecuador, reconocido como uno de los mayores productores de cacao fino de aroma del mundo, con proyecciones de exportación que alcanzan las 438 000 toneladas métricas (ANECACAO, 2024), genera año tras año una disponibilidad estimada de más de 1,5 millones de toneladas de biomasa residual en el país. En la práctica casi no tienen uso posterior. Transformar esa biomasa en biocarbón mediante pirólisis no solo le da una segunda vida a este residuo agroindustrial, sino que encaja de lleno con la lógica de la economía circular ya que reduce un pasivo ambiental mientras se obtiene un material adsorbente de alto valor agregado para el tratamiento de efluentes acuosos (Barrezueta-Unda et al., 2023).

Sin embargo, al revisar la literatura disponible sobre el uso específico de biocarbón de residuos de cacao para remover el cadmio, la información resulta dispersa: aparece mezclada entre estudios de caracterización de materiales, ensayos con metales múltiples, o trabajos centrados en otros contaminantes distintos al Cd^{2+} . Durante la revisión de la literatura se observó que la información disponible sobre este tema se encuentra dispersa en diferentes estudios y no existe una recopilación que integre, de manera sistemática, las condiciones experimentales, los modelos cinéticos y las isotermas de equilibrio aplicados al biocarbón de residuos de cacao. Esta situación motivó la realización de la presente revisión, con el objetivo de reunir y organizar el conocimiento existente mediante un método reproducible, facilitando su consulta y contribuyendo a que futuras

investigaciones puedan apoyarse en la evidencia ya disponible en lugar de repetir trabajos similares.

En este contexto, el objetivo general de este estudio fue analizar y sintetizar, mediante una revisión sistemática, la evidencia científica publicada sobre la capacidad de biosorción de cadmio en solución acuosa utilizando biocarbónes y biosorbentes de origen agrícola, con un énfasis comparativo centrado en los residuos de cacao (*Theobroma cacao* L.), considerando las condiciones experimentales, los modelos cinéticos y las isothermas de equilibrio reportados en la literatura.

Estado del arte

El biocarbón como material adsorbente

El biocarbón contiene una matriz porosa y heterogénea. Este se obtiene mediante la descomposición térmica de la biomasa bajo condiciones limitadas o nulas de oxígeno en un proceso llamado pirólisis. Este proceso reorganiza la estructura del material, por lo cual aumenta su porosidad, el área superficial disponible y, sobre todo, la cantidad de grupos funcionales oxigenados tales como hidroxilo, carboxilo y carbonilo, que son justamente los que se enlazan con los cationes metálicos (Tag et al., 2016). A medida que la temperatura se incrementa hacia rangos elevados (600 °C – 800 °C), ocurre la volatilización y degradación de los grupos oxigenados, lo que disminuye la polaridad del biocarbón y reduce los sitios de intercambio catiónico. Diversos estudios han reportado una tendencia de desempeño óptimo a temperaturas intermedias (~500 °C) para la biosorción de cadmio (Liu et al., 2023; Tomczyk et al., 2022). Sin embargo, este comportamiento no constituye un estándar absoluto para la totalidad de los diferentes tipos de biocarbón. La temperatura ideal depende estrictamente del balance entre la retención de grupos funcionales y el desarrollo del área superficial para cada tipo de biomasa vegetal. En cuanto al mecanismo, no suele ser uno solo: intercambio iónico, complejación superficial, precipitación y, en materiales con más contenido mineral, coprecipitación con fosfatos o carbonatos, todo puede estar ocurriendo a la vez en proporciones distintas según el material (Beesley y Marmiroli, 2011; Pei et al., 2024).

Residuos de cacao como precursor de biocarbón

Dentro del universo de residuos agroindustriales candidatos a convertirse en biocarbón, el cacao ofrece una ventaja que no es menor: su cáscara y cascarilla son relativamente ricas en pectina y celulosa, lo que se traduce en una buena densidad de grupos funcionales disponibles para la adsorción (Villabona et al., 2021). Existen antecedentes de su aprovechamiento como enmienda orgánica para mejorar suelos agrícolas (Pinzon-Núñez et al., 2022), pero su uso puntual como biosorbente de metales pesados en agua todavía es un terreno en construcción, con estudios que aparecen sueltos en distintas revistas y regiones, sin mucha conexión entre sí (Ramos Flores et al., 2022).

Cinética e isotermas: cómo se interpreta un ensayo de biosorción

Para describir un proceso de biosorción normalmente se recurre a dos tipos de modelos, que responden a preguntas distintas. La cinética responde a qué tan rápido ocurre el proceso y cuánto tarda en llegar al equilibrio. Los modelos más usados son pseudo-primer orden, que asume que la velocidad depende de forma lineal de los sitios libres disponibles, y pseudo-segundo orden, que interpreta la quimisorción como la etapa que realmente limita la velocidad —y que, el modelo que presenta el mejor ajuste en la mayoría de los sistemas biocarbón-metal reportados (Kwikima et al., 2023; Chen et al., 2022). La otra pregunta, cuánto puede retener el material como máximo, la responde el equilibrio, representado mediante isotermas de adsorción: Langmuir describe una adsorción en monocapa sobre sitios homogéneos y permite estimar la capacidad máxima (q_{max}); Freundlich, en cambio, se ajusta mejor cuando la superficie es más heterogénea, con adsorción en multicapa (Correa-Abril et al., 2023). Cuando ninguno de los dos explica bien el comportamiento observado, entran en juego isotermas de tres parámetros como Temkin o Sips (Liu et al., 2023; Chang et al., 2024).

Lo que aún no está claro

Pese a que existen numerosas investigaciones sobre biosorbentes agrícolas para remoción de cadmio, la evidencia específica sobre biocarbón de residuos de cacao sigue siendo comparativamente escasa y, como se mencionó antes, dispersa. Esa brecha, más que un vacío absoluto de información, es lo que justifica ordenar lo que ya se sabe antes de lanzar nuevos experimentos.

METODOLOGÍA

Enfoque y tipo de estudio

Este trabajo se desarrolló como una revisión sistemática de la literatura, siguiendo las directrices de la declaración PRISMA 2020 (Page et al., 2021), un protocolo que se eligió precisamente por su transparencia: permite que cualquier otra persona pueda replicar el proceso de búsqueda, cribado y selección de estudios sin depender de criterios subjetivos no documentados.

Registro del protocolo

De acuerdo con las recomendaciones de la guía PRISMA 2020, se declara que el protocolo de esta revisión sistemática no fue registrado previamente en plataformas públicas como PROSPERO u OSF. Sin embargo, los criterios de elegibilidad, la estrategia de búsqueda y la matriz de extracción de datos se establecieron a priori y fueron aplicados de manera rigurosa durante el desarrollo de la revisión.

Estrategia de búsqueda

La identificación de la literatura científica se llevó a cabo mediante búsquedas sistemáticas en cinco bases de datos académicas e índices bibliográficos de alto impacto: Scopus,

Web of Science (WoS), PubMed, SciELO y Google Scholar, bases con buena cobertura en ciencias ambientales, química e ingeniería. La fecha de la última búsqueda realizada en todas las bases de datos fue el 2 de junio de 2026. Se tomó en cuenta las obras publicadas en español e inglés, sin importar el país de origen, dando prioridad a los trabajos publicados en el período 2019 en adelante. Para poder obtener la información, se utilizaron palabras claves como biochar, cadmium adsorption, cadmium removal, cocoa waste, Theobroma cacao, biosorption, adsorption kinetics y equilibrium isotherm. Se formularon ecuaciones de búsqueda mediante la combinación de términos controlados (DeCS/MeSH) y lenguaje libre con operadores booleanos (AND, OR), ajustando la sintaxis a los motores de búsqueda específicos de cada repositorio:

- Scopus: TITLE-ABS-KEY (("biochar" OR "biosorbent" OR "agricultural waste") AND ("cadmium" OR "Cd(II)" OR "Cd2+") AND ("biosorption" OR "adsorption") AND ("Theobroma cacao" OR "cacao pod husk" OR "cocoa waste") AND ("aqueous solution" OR "water treatment"))
- Web of Science (WoS): TS= (("biochar" OR "biosorbent") AND ("cadmium" OR "Cd2+") AND ("biosorption" OR "adsorption") AND ("cacao" OR "cocoa" OR "agricultural residues") AND ("aqueous solution"))
- PubMed: (("biochar"[Mesh] OR "biosorbent") AND "cadmium"[Mesh] AND ("adsorption"[Mesh] OR "biosorption") AND "water purification"[Mesh])
- SciELO: (cadmio) AND (biocarbón OR biosorción) AND (cacao OR residuos agrícolas)
- Google Scholar: "biochar" "cadmium" "biosorption" "Theobroma cacao" "aqueous solution"

Criterios para la selección de los artículos

Se incluyeron artículos originales de investigación publicados en español o inglés, con acceso al texto completo, que reportaran datos experimentales sobre la adsorción o biosorción de cadmio en medio acuoso mediante biocarbón, biomasa residual o biosorbentes agroindustriales comparables entre sí. Asimismo, se consideraron artículos de revisión únicamente como fuente de contexto y apoyo para la discusión del estado del conocimiento, sin incorporarlos en los análisis cuantitativos de capacidades máximas de adsorción, frecuencias de modelos cinéticos o isothermas de equilibrio, con el fin de evitar la duplicación de información proveniente de los estudios primarios.

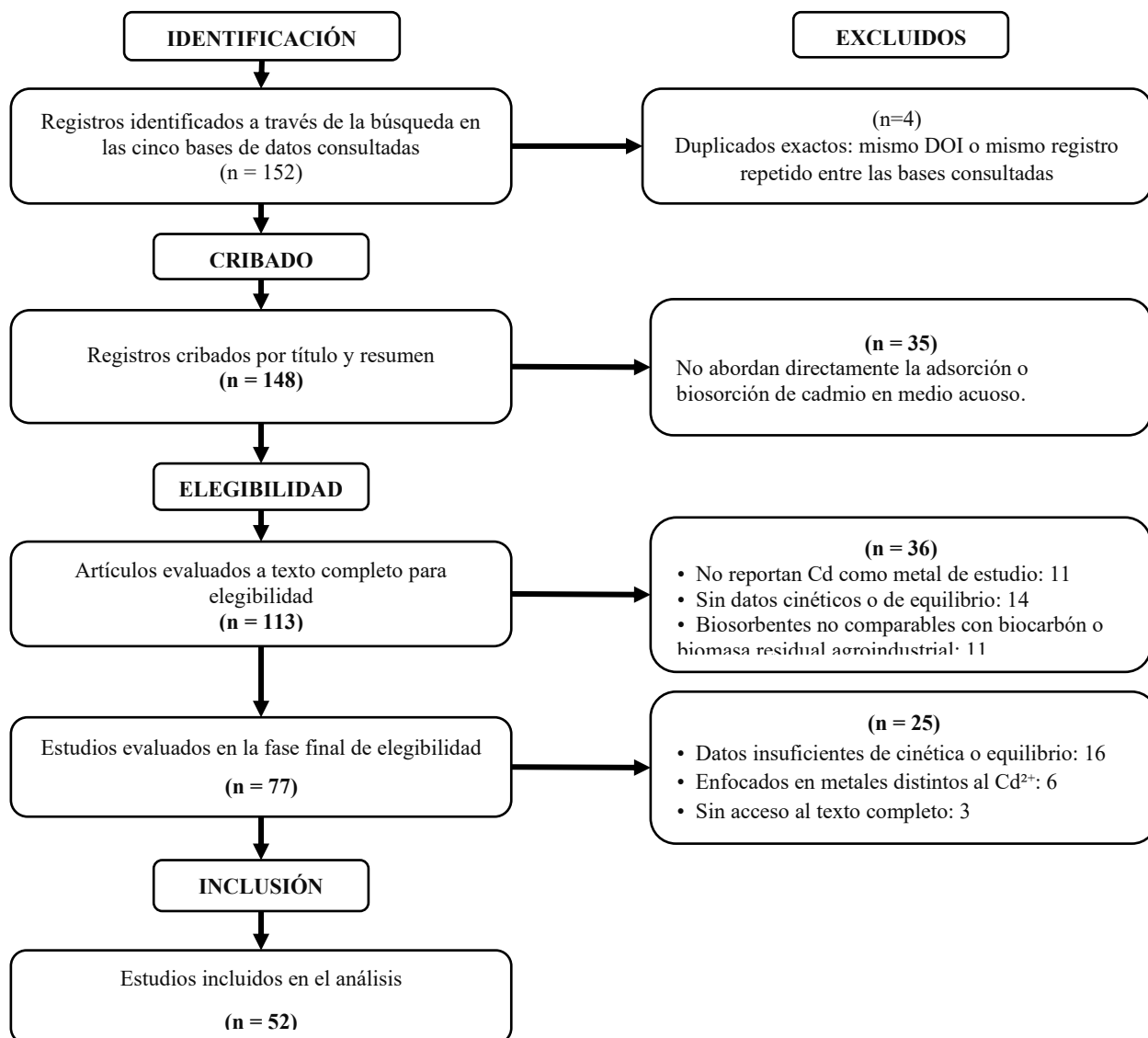
No se incluyó literatura gris, como capítulos de libros sin revisión por pares, resúmenes de congresos ni documentos de repositorios institucionales. También se excluyeron las revisiones narrativas sin metodología explícita y los registros duplicados identificados entre las bases de datos. Estos criterios se aplicaron de manera uniforme durante todo el proceso de selección de estudios.

Procedimiento para la selección y análisis de los estudios

El proceso de selección siguió las cuatro fases del diagrama PRISMA 2020, las cuales se presentan a continuación:

Figura 1

Diagrama de flujo PRISMA 2020



Fuente: Elaboración propia

La selección de los estudios se realizó de forma independiente por dos revisores del equipo, quienes evaluaron cada artículo según los criterios de inclusión y exclusión previamente definidos. Los desacuerdos sobre la elegibilidad de un estudio se resolvieron mediante discusión entre ambos revisores hasta alcanzar consenso; no fue necesario recurrir a un tercer evaluador. La extracción de datos se realizó mediante una matriz de consistencia diseñada previamente, que permitió sistematizar la información de cada estudio incluido en las siguientes categorías: autores, año, revista, país o contexto, tipo de biomasa y condiciones de pirólisis, técnicas de caracterización, condiciones experimentales de adsorción (pH, dosis, tiempo de contacto, concentración inicial), modelo cinético e isoterma de mejor ajuste, capacidad máxima de adsorción (q_{max}) y principales hallazgos o limitaciones. El uso de una matriz estandarizada

facilitó la comparación sistemática entre estudios y la identificación de las tendencias más relevantes en la literatura revisada.

RESULTADOS

Proceso de selección

La búsqueda inicial arrojó 152 registros. Tras eliminar 4 duplicados quedaron 148, de los cuales 35 se descartaron en el cribado por título y resumen por no relacionarse directamente con adsorción o biosorción de cadmio, dejando 113 registros para la evaluación de elegibilidad a texto completo. De estos, 36 no cumplieron los criterios de inclusión debido a que 11 no reportaban al Cd como metal de estudio, 14 no presentaban datos cinéticos o de equilibrio y 11 correspondían a biosorbentes no comparables con biocarbón o biomasa residual agroindustrial. En la fase final de elegibilidad, se descartaron 25 estudios adicionales: 16 por presentar datos insuficientes de cinética o equilibrio, 6 por estar enfocados en metales distintos al Cd^{2+} y 3 por no contar con acceso al texto completo. El proceso terminó con 52 estudios incluidos en el análisis (Tabla 1).

Características generales de los estudios incluidos

De los 52 estudios relacionados con el tema, la mayor parte se concentra en los años más recientes: 18 se publicaron en 2022, 15 en 2023, 8 en 2021, 5 en 2020, uno en 2011, 2 en 2016, uno en 2019, uno en 2024 y uno en 2025. Esta distribución indica un interés creciente de la comunidad científica por este campo de investigación, con una desaceleración aparente en 2024-2025 que puede deberse tanto a la disponibilidad real de literatura como al momento en que se cerró la búsqueda.

En cuanto al tipo de investigaciones realizadas, predominan claramente los ensayos experimentales desarrollados en sistemas batch, que representan aproximadamente dos tercios del total de los estudios revisados (Hamzah et al., 2022; Correa-Abril et al., 2024; Landry et al., 2025). En menor proporción se encontraron revisiones de literatura (Liu et al., 2023; Tomczyk et al., 2022), estudios en los que se comparan distintos biosorbentes para evaluar su desempeño (Villabona-Ortíz et al., 2021) y un número reducido de investigaciones llevadas a cabo en columnas de lecho fijo (Lara et al., 2016). Del total de investigaciones analizadas, 12 evaluaron directamente residuos de *Theobroma cacao* en medio acuoso, como cáscara de mazorca, cascarilla de semilla o biomasa sin pirolizar (Sánchez Salamea y Uguña Rosas, 2020; Arellano Martínez y Paredes Salazar, 2021; Lara et al., 2016; Landry et al., 2025; Hamzah et al., 2022; Villabona-Ortíz et al., 2021; Lavado-Meza et al., 2023; Abbey et al., 2023; Correa-Abril et al., 2024; Barrezueta-Unda et al., 2023; Pinzón-Núñez et al., 2022). Los estudios restantes aportan evidencia comparativa a partir de otros residuos agroindustriales, entre ellos bagazo de caña, cascarilla de arroz, tallo de banano y hueso de nanche, así como de biosorbentes de origen biológico, como levaduras y hongos (Moreno-Rivas y Ramos-Clamont Montfort, 2019; Rodríguez et al., 2021a), y no se atribuyen a los residuos de cacao en ningún punto del análisis.

Materia prima y condiciones de pirólisis

Las temperaturas de pirólisis reportadas van de 300 a 900 °C, aunque los estudios que logran mejor capacidad de adsorción tienden a concentrarse entre los 400 y 600 °C (Tag et al., 2016), con 500 °C como un punto medio recurrente entre desarrollo de área BET y conservación de grupos funcionales (Barrezueta-Unda et al., 2023). Al menos ocho de los estudios previamente revisados exploran alguna estrategia de modificación, tales como activación con KOH, impregnación con hierro, funcionalización con cisteamina, activación física con CO₂ (Zhang et al., 2023; Al-Rawajfeh et al., 2023; Zhao et al., 2023), y en todos los casos donde se comparó el material modificado contra el biocarbón base, se reportó una mejora, que va del 40 % al 100 % según la técnica empleada (Long et al., 2023).

Capacidad de biosorción de cadmio

Las capacidades máximas de adsorción (q_{max}) reportadas se ubican, en su mayoría, entre 18 y 67 mg/g, con valores por encima de 50 mg/g cuando de por medio hay una modificación química (Zhang et al., 2023; Long et al., 2023; Zhao et al., 2023). Los materiales derivados específicamente de residuos de cacao presentan valores de q_{max} que van, en la mayoría de los estudios, de 14,7 a 49 mg/g sin modificar bajo condiciones experimentales comparables entre sí, en temperatura ambiente (Correa-Abril et al., 2024; Lavado-Meza et al., 2023; Abbey et al., 2023; Pinzón-Núñez et al., 2022). Un solo estudio (Villabona-Ortíz et al., 2021) reporta una capacidad notablemente superior, 160,83 mg/g, pero bajo condiciones experimentales extremas 55 °C y una dosis de adsorbente mínima (0,03 g) que no son comparables directamente con el resto; ese valor no debe promediarse con los demás sin señalar explícitamente la diferencia de condiciones. Considerando solo los estudios en condiciones comparables, la diferencia dentro del rango de 14,7 a 49 mg/g responde en gran medida al método de síntesis empleado pirólisis convencional frente a síntesis asistida por microondas más que a una menor calidad del material; en general, estas cifras resisten bien la comparación e incluso superan en algunos casos a las de bagazo de caña o cascarilla de arroz (Vera et al., 2016), los resultados son comparables e incluso superiores, en determinadas condiciones, a los reportados para otros residuos agroindustriales (Villabona-Ortíz et al., 2021).

Modelos cinéticos e isoterms de equilibrio

La mayoría de los estudios evaluó más de un modelo cinético y más de una isoterma de equilibrio antes de seleccionar el de mejor ajuste, por lo que la suma de estudios que emplearon cada modelo supera el número total de estudios incluidos si no se distingue entre "modelos evaluados" y "modelo de mejor ajuste". Para evitar esa ambigüedad, se contabilizó únicamente el modelo señalado explícitamente por cada estudio como el de mejor ajuste, según el criterio estadístico reportado por los propios autores coeficiente de determinación (R^2) más alto, menor suma de errores cuadráticos o comparación entre los parámetros estimados y los valores experimentales. Bajo este criterio, el modelo de pseudo-segundo orden fue señalado como el de

mejor ajuste en la mayoría de los estudios que reportaron esta comparación (Correa-Abril et al., 2024; Chen et al., 2022), consistente con un mecanismo dominado por quimisorción y no por difusión física simple (Kwikima et al., 2023), mientras que el modelo de pseudo-primer orden predominó o resultó igualmente válido en un grupo más reducido de estudios (Moreno-Rivas y Ramos-Clamont Montfort, 2019; Ruiz-Castillo et al., 2020). En cuanto al equilibrio, Langmuir predominó como isoterma de mejor ajuste (Correa-Abril et al., 2024; Lavado-Meza et al., 2023), mientras que Freundlich se ajustó mejor o de forma equivalente en materiales con superficies más heterogéneas, como la biomasa sin pirolizar (Arellano Martínez y Paredes Salazar, 2021).

Factores que condicionan la biosorción

El pH fue la variable reportada con mayor frecuencia como determinante de la adsorción de cadmio: de los 52 estudios incluidos, 36 evaluaron explícitamente el efecto de este parámetro sobre la capacidad de remoción, y en la mayoría de ellos se identificó como el factor de mayor influencia, con un valor óptimo reportado entre 5,5 y 7 (Sánchez Salamea, 2016; Uguña Rosas, 2020; Martínez Valdez et al., 2022; Long et al., 2023). A pH ácido, los protones compiten con los cationes de cadmio por los sitios activos del biosorbente, lo que reduce la capacidad de remoción; a pH alcalino (generalmente superior a 8), el Cd^{2+} comienza a precipitar como $\text{Cd}(\text{OH})_2$, por lo que el incremento en la remoción observada en ese rango no puede atribuirse en su totalidad a la biosorción, sino que refleja, al menos parcialmente, un fenómeno de precipitación química. Esta distinción es relevante porque varios de los estudios revisados no diferencian explícitamente ambos mecanismos al reportar sus resultados en condiciones alcalinas, lo que introduce incertidumbre sobre la capacidad de adsorción real del material en ese rango.

El equilibrio suele alcanzarse entre 60 y 120 minutos, y una dosis aplicada de 2 a 3 g/L parece maximizar la eficiencia sin sacrificar la capacidad específica por gramo (Long et al., 2023; Liu et al., 2023d). Cabe destacar que, cuando existen iones competidores como sodio (Na^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) u otros metales en sistemas multicomponente, la capacidad de adsorción de cadmio puede reducirse hasta en un 30 % (Rafiq et al., 2023), lo que constituye una señal de alerta para quienes pretendan extrapolar resultados obtenidos en agua sintética a condiciones de agua real.

DISCUSIÓN

En conjunto, la evidencia revisada indica que el biocarbón derivado de residuos de cacao presentó un desempeño comparable al de otros biosorbentes agroindustriales más consolidados en la literatura, como el bagazo de caña o la cascarilla de arroz. Villabona-Ortíz et al. (2021) y Lavado-Meza et al. (2023), ubican a la biomasa de cacao entre las más eficientes al compararla de forma directa con otras biomásas agrícolas previamente mencionadas, algo que atribuyen a su contenido relativamente alto de pectina, celulosa y grupos funcionales oxigenados. Aun así, conviene ser cauteloso al comparar cifras entre estudios distintos: el pH, la concentración inicial,

la dosis de adsorbente y hasta el método analítico usado para cuantificar el metal, el cual casi siempre es la espectrofotometría de absorción atómica, pero con variaciones en el protocolo, pueden introducir diferencias que no siempre son fáciles de aislar.

Un resultado particularmente relevante es el reportado por Landry et al. (2025), quienes evaluaron si la activación física con dióxido de carbono (CO_2) mejora la capacidad del biocarbón de cáscara de cacao para remover cadmio del agua, en condiciones cercanas a las del agua potable. El resultado va en contra de lo que suele asumirse: el biocarbón sin activar, obtenido por pirólisis a 400 °C, removió cadmio de forma más eficiente que su versión activada, con un $72,0 \pm 1,1$ % de remoción. Según explican los propios autores, esto se debe a que la remoción de cadmio depende más de la química superficial del biocarbón que de su área superficial. El hallazgo cuestiona una suposición bastante extendida: que activar el biocarbón siempre mejora su rendimiento. Aquí no fue así, y el costo adicional del proceso de activación no llegó a justificarse con un beneficio real.

El área superficial BET aparece, junto con el pH, como uno de los parámetros más citados para explicar la capacidad de adsorción. Los estudios que trabajan con modificaciones químicas (Zhang et al., 2023; Al-Rawajfeh et al., 2023; Long et al., 2023) coinciden en que aumentar sustancialmente el área superficial se traduce en mayor capacidad de adsorción de cadmio; Zhang et al. (2023), de hecho, reportan que triplicar el área de 45 a 135 m^2/g mediante activación con hidróxido de potasio, prácticamente duplicó la capacidad. Pero esta relación no es del todo lineal en todos los materiales: en biocarbones con alto contenido mineral, como el derivado de hueso de pescado que estudian Pei et al. (2024), el mecanismo dominante no es la adsorción física sino la coprecipitación con fosfato de calcio. Es decir, la capacidad de remover cadmio depende de una combinación de propiedades texturales y químicas, no de un único parámetro que sirva para predecir todo.

Respecto a los modelos cinéticos y de equilibrio, que la mayoría de los estudios ajusten a pseudo-segundo orden y Langmuir coincide con lo que reportan revisiones previas sobre biocarbón para metales pesados (Liu et al., 2022; Tomczyk et al., 2022), lo que refuerza la idea de que la quimisorción en monocapa es el mecanismo más frecuente, aunque claramente no el único. Algunos estudios ajustan mejor a Freundlich o a isothermas de tres parámetros como Sips, lo que apunta a superficies más heterogéneas, probablemente materiales sin pirolizar o con activaciones parciales y es un buen recordatorio de que generalizar un solo modelo a todo tipo de biocarbón sería un error.

Entre las limitaciones que se repiten en el conjunto de estudios está la escasa evaluación del biocarbón de cacao en agua real, con iones competidores y materia orgánica disuelta, condiciones que, según Rafiq et al. (2023) para agua salobre, pueden reducir la capacidad de adsorción hasta en un 30 % respecto a los ensayos con agua sintética. También son pocos los estudios que evalúan la regeneración del material en varios ciclos de uso, Kwikima et al. (2023)

es de las pocas excepciones, con 85 % de recuperación usando ácido nítrico al 0,1 M y prácticamente no hay trabajos sobre sistemas de flujo continuo aplicados específicamente a biocarbón de cacao, más allá del antecedente de Lara et al. (2016) con residuos de cacao sin pirolizar en columna de lecho fijo.

Estas limitaciones son, en el fondo, la brecha de conocimiento que motivó esta revisión, y también marcan el camino hacia adelante, es decir, definen las líneas de investigación futuras. En este contexto, hace falta evaluar el biocarbón de residuos de cacao en condiciones más parecidas a la aplicación real, tales como agua residual industrial o minera, sistemas de columna, ciclos de regeneración, si se quiere pasar de la evidencia de laboratorio a una tecnología de tratamiento que realmente se pueda escalar.

CONCLUSIONES

El biocarbón derivado de residuos de cacao (*Theobroma cacao* L.) presenta potencial para la remoción de cadmio en medios acuosos, con capacidades máximas de adsorción entre 28 y 49 mg/g sin modificar, cifras comparables a las de otros biosorbentes agroindustriales de referencia. No obstante, esta evidencia proviene exclusivamente de ensayos de laboratorio con agua sintética y de estudios de calidad metodológica heterogénea, por lo que la viabilidad tecnológica del material no puede establecerse a partir de estos resultados; su confirmación requiere evaluar el desempeño del biocarbón en agua real, en sistemas de columna y a lo largo de varios ciclos de regeneración.

Los estudios revisados reportan con mayor frecuencia un pH entre 5,5 y 7, un tiempo de contacto de 60 a 120 minutos y una dosis de adsorbente de 2 a 3 g/L como las condiciones asociadas a la mayor remoción de cadmio; asimismo, la pirólisis alrededor de 500 °C fue la temperatura reportada con mayor frecuencia. Debido a que los estudios emplearon materiales, metodologías y condiciones experimentales distintas entre sí, estos valores deben interpretarse como los intervalos más recurrentes en la literatura y no como condiciones óptimas universales aplicables a cualquier biocarbón de cacao.

Según las distintas fuentes, se extrajo que el modelo cinético de pseudo-segundo orden y la isoterma de Langmuir predominan por un margen amplio como los de mejor ajuste, lo que sugiere que la quimisorción en monocapa es el mecanismo más frecuentemente reportado; sin embargo, un buen ajuste estadístico al modelo de pseudo-segundo orden no constituye por sí solo una prueba concluyente de que el mecanismo sea exclusivamente quimisorción, ya que este modelo también puede ajustarse razonablemente bien a procesos en los que intervienen otros mecanismos, como la difusión o la precipitación superficial. En otras palabras, el ajuste apunta a que el cadmio se adhiere principalmente a la superficie del biocarbón formando una monocapa, más que difundirse hacia el interior de sus poros o disolverse en la solución; no obstante, como se señaló, esta interpretación no puede confirmarse únicamente a partir del ajuste cinético.

Las modificaciones químicas o físicas del biocarbón (KOH, hierro, CO₂) suelen incrementar su capacidad de adsorción de cadmio, con mejoras reportadas de entre 40 % y 100 % en los estudios revisados; no obstante, estos tratamientos adicionales elevan el costo del proceso, por lo que su aplicación debe evaluarse considerando la relación costo-beneficio frente al desempeño real obtenido.

Persisten vacíos importantes en la evaluación de este material en agua real con iones competidores, en sistemas de flujo continuo y en su regeneración tras varios ciclos de uso, dado que la evidencia disponible procede principalmente de ensayos de laboratorio; estos aspectos deben tomarse en cuenta en futuras investigaciones.

REFERENCIAS

- Abbey, CYB, Duwiejuah, AB & Quianoo, AK. (2023). Removal of toxic metals from aqueous phase using cacao pod husk biochar in the era of green chemistry. *Applied Water Science*, 13, 57. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01863-5>
- Alghamdi, A. G., & Alasmay, Z. (2023). Efficient remediation of cadmium- and lead-contaminated water by using Fe-modified date palm waste biochar-based adsorbents. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(1), 802. <https://doi.org/10.3390/ijerph20010802>
- Ángel Villabona-Ortíz; Candelaria Tejada-Tovar; Ángel Darío Gonzalez-Delgado (2021). Adsorption of Cd^{2+} Ions from Aqueous Solution Using Biomasses of *Theobroma cacao*, *Zea mays*, *Manihot esculenta*, *Dioscorea rotundata* and *Elaeis guineensis*. *Applied Sciences*, 11(6), 2657. <https://doi.org/10.3390/app11062657>
- Asociación Nacional de Exportadores de Cacao del Ecuador. (2024). Resultados del sector cacaotero y perspectivas de exportación 2024/2025 (Revista Digital No. 29). ANECACAO. <https://anecacao.com/wp-content/uploads/2024/12/Revista-digital-Anecacao-29-DIC-ESP-VER.pdf>
- Barrezueta-Unda, S., Romero Bonilla, H., & Ríos Hidalgo, M. (2023). Características principales del biocarbón derivado de restos de *Theobroma cacao* L. para su uso en suelos agrícolas. *Revista Colombiana de Química*, 52(1), 19–24. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v52n1.110591>
- Beesley, L., & Marmiroli, M. (2011). The immobilisation and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar. *Environmental Pollution*, 159(2), 474–480. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.016>
- Bousdra, T., Papadimou, S. G., & Golia, E. E. (2023). The use of biochar in the remediation of Pb, Cd, and Cu-contaminated soils. The impact of biochar feedstock and preparation conditions on its remediation capacity. *Land*, 12(2), 383. <https://doi.org/10.3390/land12020383>
- Chang, Z., Lu, C., Bai, L., et al. (2024). Removal of Cd^{2+} and Pb^{2+} from an aqueous solution using modified coal gangue: Characterization, performance, and mechanisms. *Processes*, 12(10), 2095. <https://doi.org/10.3390/pr12102095>
- Chen, F., Sun, Y., Liang, C., et al. (2022). Adsorption characteristics and mechanisms of Cd^{2+} from aqueous solution by biochar derived from corn stover. *Scientific Reports*, 12, 17632. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22714-y>
- Chen, R., Zhao, X., Jiao, J., Li, Y., & Wei, M. (2019). Surface-modified biochar with polydentate binding sites for the removal of cadmium. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(7), 1775. <https://doi.org/10.3390/ijms20071775>

- Ge, S., Zhao, S., Wang, L., Zhao, Z., Wang, S., & Tian, C. (2024). Exploring adsorption capacity and mechanisms involved in cadmium removal from aqueous solutions by biochar derived from euhalophyte. *Scientific Reports*, 14, 450. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50525-2>
- Huang, Z., Wang, Q., Zhang, Y., Du, B., Zhou, J., & Ji, D. (2025). Effects of pyrolysis temperatures and modified methods on rice husk-derived biochar characteristics and heavy metal adsorption. *Molecules*, 30(17), 3616. <https://doi.org/10.3390/molecules30173616>
- Ilvia Carolina Moreno-Rivas, Gabriela Ramos-Clamont Montfor (2019). Descontaminación de arsénico, cadmio y plomo en agua por biosorción con *Saccharomyces cerevisiae*. Información Tecnológica. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2018.0.155>
- Jhackson Jengler Arellano Martinez, José Luis Paredes Salazar (2021). Biosorción de cadmio disponible en medio acuoso mediante cascarilla de semilla de cacao (*Theobroma cacao* L.). Ciencia y Tecnología Agropecuaria. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/3501>
- Jhonny Correa-Abril, Ullrich Stahl, Elvia V. Cabrera, Yonathan J. Parra, Michael A. Vega, Sonia Taamalli, Florent Louis, Joan Manuel Rodríguez-Díaz (2024). Adsorption dynamics of $\text{Cd}^{2+}(\text{aq})$ on microwave-synthesized pristine biochar from cocoa pod husk: Green, experimental, and DFT approaches. *iScience*. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.109958>
- Koffi Yao Guy Landry, Rousset Patrick, Dupont Capucine, Sharma Saroj, Gyasi Aba Amissah, Commandre Jean-Michel (2025). Is cocoa pod shell biochar activation a suitable way for water cadmium removal in the Ivory Coast? (Título en español: ¿La activación del biocarbón a partir de cáscaras de bayas de cacao permitiría eliminar el cadmio presente en el agua en Costa de Marfil?). *Bois et Forêts des Tropiques*, 362, 1–12. <https://doi.org/10.19182/bft2025.362.a37907>
- Kwikima, M. M., Chebude, Y., & Meshesha, B. T. (2023). Kinetics, adsorption isotherms, thermodynamics, and desorption studies of cadmium removal from aqueous solutions using bamboo sawdust/rice husk biochar. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(11), 9367–9379. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03472-3>
- Lara, J., Tejada, C., Villabona, A., Arrieta, A., & Granados Conde, C. (2016). Adsorción de plomo y cadmio en sistema continuo de lecho fijo sobre residuos de cacao. *Revista ION*, 29(2), 113–124. <https://doi.org/10.18273/revion.v29n2-2016009>
- Latifah Hamzah, Ning-Geng Ong, Adam Nayak, Stephen Luby, Olga Vindušková (2022). Characterization of Biochar Produced from Cacao Pod Husk with Smallholder Farmers in Farm-Scale Reactors. OICC Press. <https://doi.org/10.57647/ijrowa.2026.7968>
- Lavado-Meza, Carmencita., De la Cruz-Cerrón, Leonel., Lavado-Puente, Carmen., Gamarra Gómez, Francisco., Sacari Sacari, Elisban., Dávalos Prado, Juan. (2023). Effective removal of Cd (II) from aqueous solutions using *Theobroma cacao* agro-industrial waste. *Molecules*, 28(14), 5491. <https://doi.org/10.3390/molecules28145491>

- Li, Tongtong., Wang, Yangyang., Niu, Yongchao., Zhang, Zhonglei., Liu, Jin., Shu Wang, Xiao., Wang, Jingao., Li, Ji., Wang, Lei. (2025). Enhanced cadmium adsorption mechanisms utilizing biochar derived from different parts of wetland emergent plants *Iris sibirica* L. *Processes*, 13(5), 1520. <https://doi.org/10.3390/pr13051520>
- Liu X., Li G., Chen C., Zhang X., Zhou K., Long X. (2023). Banana stem and leaf biochar as effective adsorbent for cadmium and lead in aqueous solution. *Environmental Research*. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05652-7>
- Liu, Q., Song, Z., Li, J., Pan, C., & Qiu, W. (2024). Efficacy of agricultural residue-derived biochar for tackling cadmium contamination in an aqueous solution. *Molecules*, 29(15), 3545. <https://doi.org/10.3390/molecules29153545>
- Liu, T., Lawluy, Y., Shi, Y., Ighalo, J. O., He, Y., Zhang, Y., & Yap, P.-S. (2022). Adsorption of cadmium and lead from aqueous solution using modified biochar: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6), 106502. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106502>
- López, J. E., Builes, S., Heredia Salgado, M. A., Tarelho, L. A. C., Arroyave, C., Aristizábal, A., & Chávez, E. (2020). Adsorption of cadmium using biochars produced from agro-residues. *The Journal of Physical Chemistry C*, 124(27), 14592–14602. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c02216>
- Lorena Dornelas Marsolla, Gilberto Maia Brito, Jair CC Freitas, Edumar R. Cabral Coelho (2023). Sustainable enhancement of biochar and biochar composite properties through temperature-controlled pyrolysis of agricultural biomass and marble waste. *ScienceDirect*. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114799>
- María Eugenia Ramos Flores, Wilian Bravo, Maritza Tatiana Chaglla Cango, Gabriela Belén Ureña Callay & Maribel Lema. (2022). Materiales carbonosos y nanomateriales de residuos de cacao para remoción de metales pesados. *Sustainability*. <https://doi.org/10.47460/athenea.v7i23.124>
- Moscoso Moscoso, E., & Choque Quispe, D. (2024). Biosorción de plomo y arsénico utilizando biomasa vegetal inerte de tallos de puka kora (*Rumex acetosella*) [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. <https://repositorio.unsch.edu.pe/handle/20.500.14612/7416>
- Nora Angélica Martínez Valdez, Eduardo Campos Medina, Patricia Balderas Hernández (2022). Captación del Cd (II) en solución acuosa mediante el uso de residuos orgánicos generados de las actividades acuícolas. *Scientia Agropecuaria*. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/49347>
- Pacheco Tanaka, M. E., Pimentel Frisancho, J. P., & Roque Villanueva, W. F. (2010). Cinética de la bioadsorción de iones cadmio (II) y plomo (II) de soluciones acuosas por biomasa

residual de café (*Coffea arabica* L.). Revista de la Sociedad Química del Perú, 76(3), 279–292.

- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L. A., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Pei, N., Luo, W., Huang, Q., & Sun, Y. (2024). Adsorption properties of fishbone and fishbone-derived biochar for cadmium in aqueous solution. *Agronomy*, 14(11), 2717. <https://doi.org/10.3390/agronomy14112717>
- Pinzón-Nuñez, D. A., Adarme-Duran, C. A., Vargas-Fiallo, L. Y., Rodríguez-López, N., & Ríos-Reyes, C. A. (2022). Biochar as a waste management strategy for cadmium contaminated cocoa pod husk residues. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 11(1), 101–115. <https://doi.org/10.30486/ijrowa.2021.1920124.1192>
- Présiga-López, D., Rubio-Clemente, A., & Pérez, J. F. (2020). Uso del biocarbón como material alternativo para el tratamiento de aguas residuales contaminadas. *Revista UIS Ingenierías*, 20(1), 121–134. <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n1-2021011>
- Rafiq, S., Wongrod, S., & Vinitnantharat, S. (2023). Adsorption kinetics of cadmium and lead by biochars in single- and bisolute brackish water systems. *ACS Omega*, 8(48), 45262–45276. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03335>
- Vallejo Aguilar, María de la Luz Angélica, Marín Castro, Marco Antonio, Ramos Cassellis, María Elena, Silva Gómez, Sonia Emilia, Ibarra Cantún, Diego, & Tamariz Flores, José Víctor. (2021). Biosorción y tolerancia de Pb, Cr y Cd por la biomasa de *Pleurotus ostreatus*. *Revista Colombiana de Biotecnología*. <https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342021000200275>
- Ruiz-Castillo, M., Leyva-Ramos, R., & Flores-Cano, J. V. (2020). Adsorción de Cd(II) y Pb(II) presentes en solución acuosa con hueso de nanche (*Byrsonima crassifolia*). *Revista Colombiana de Química*.
- Sánchez Salamea, N. A. (2016). Biosorción en tanque agitado de Cd(+2) y Pb(+2) con cáscara de cacao [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/25242>
- Shah, G. M., Nasir, M., Imran, M., Bakhat, H. F., Rabbani, F., Sajjad, M., Umer Farooq, A. B., Ahmad, S., & Song, L. (2018). Biosorption potential of natural, pyrolysed and acid-assisted pyrolysed sugarcane bagasse for the removal of lead from contaminated water. *PeerJ*, 6, e5672. <https://doi.org/10.7717/peerj.5672>

- Simón, D., Palet, C., & Cristóbal, A. (2024). Cadmium removal by adsorption on biochars derived from wood industry and craft beer production wastes. *Water*, 16(13), 1905. <https://doi.org/10.3390/w16131905>
- Tag, A. T., Duman, G., Ucar, S., & Yanik, J. (2016). Effects of feedstock type and pyrolysis temperature on potential applications of biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 120, 200–206. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.05.006>
- Tang, Bo., Xu, Haopu., Song, Fengmin., Liu, Zhifenf. (2023). Adsorption characteristics of Cd²⁺ ions in aqueous solution on modified straw biochar. *Sustainability*, 15(5), 4373. <https://doi.org/10.3390/su15054373>
- Tao Long; Xinwei Zuo; Yunping Ji; Changquan Wang. (2023). Removal of Cd(II) from Aqueous Solution by Ferrate-Modified Sludge Biochar: Optimization of Preparation Conditions, Adsorption Performance, and Mechanism. *Journal of Water Process Engineering*. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2026/ra/d6ra00674d>
- Tomczyk A., Sokołowska Z., Boguta P. (2022). Biochar for the removal of contaminants from soil and water: a comprehensive review. *Biochar*. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00146-1>
- Ud Din, S., Al-Ahmary, K. M., Al-Mhyawi, S. R., AlMohamadi, H., Elamin, N. Y., Alshdoukhi, I. F., Imohiosen, F. A., Ofudje, E. A., & Al-Otaibi, J. S. (2026). Sustainable removal of Cd(II) and Cr(VI) from aqueous solution via agro-waste derived biochar. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-40608-1>
- Vera, L., Uguña, M., García, N., Flores, M., & Vázquez, V. (2016). Eliminación de los metales pesados de las aguas residuales mineras utilizando el bagazo de caña como biosorbente. *Afinidad*, 73(573), 43–49.
- Villa Rodríguez, A., Cortés Martínez, R., Vázquez Guerrero, A. (2025). Adsorption of cadmium from aqueous solutions using Moringa oleifera kraft pulp microfibers functionalized with iron oxide nanoparticles. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 20, 1–23. <https://doi.org/10.1186/s40712-025-00337-1>
- Villa-Sánchez M., Torres-Luna J.A., Guerrero-Fajardo C.A. (2022). Capacidad de adsorción de residuos agroindustriales para remover Cd²⁺ de aguas residuales: revisión. *Ingeniería*. <https://doi.org/10.18273/revuin.v22n2-2023010>
- World Health Organization. (2011). Guidelines for drinking-water quality (4th ed.). World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241548151>
- Yan Yu; Jiangtao He; Jingyang Sun; Zixuan Pei; Qi Dong Wu; Rui Yu. (2021). Capacity and Mechanisms of Pb(II) and Cd(II) Sorption on Five Plant-Based Biochars. *Bioresource Technology Reports*. <https://doi.org/10.3390/su15097627>

Anexos

Tabla 1

Resumen de la selección de artículos según PRISMA

Fase	Descripción	Artículos
1. Identificación	Se realizó una búsqueda inicial utilizando los términos "biochar", "cadmium", "biosorption", "Theobroma cacao" y "aqueous solution".	152
2. Eliminación de duplicados	Se identificaron y eliminaron 4 artículos duplicados, correspondientes a publicaciones repetidas en distintas bases de datos o con el mismo DOI.	148
3. Revisión de título y resumen	Tras revisar los títulos y resúmenes, se excluyeron 35 estudios porque no abordaban la remoción de cadmio en agua mediante biocarbón.	113
4. Revisión de texto completo	Se evaluaron los artículos en texto completo y se descartaron 36 estudios que no cumplían con los criterios metodológicos establecidos.	77
5. Artículos que cumplen criterios de inclusión	Se excluyeron 25 estudios adicionales por no presentar información suficiente sobre la cinética o las isotermas de adsorción, por emplear materiales distintos al biocarbón de cacao como adsorbente o por describir metodologías que no podían reproducirse adecuadamente.	52

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2

Capacidad máxima de adsorción (q_{max}) de cadmio, en mg/g, reportada en estudios centrados en residuos de Theobroma cacao

Autor(es), año	Material evaluado	País	q_{max} Cd ²⁺ (mg/g)
Abbey et al., 2023	Biocarbón de cáscara de cacao (Pb, Hg, Cd)	Ghana	44,8 – 48,6
Arellano Martínez y Paredes Salazar, 2021	Cascarilla de semilla de cacao	Perú	32,7
Correa-Abril et al., 2024	Biocarbón de cáscara de mazorca, síntesis por microondas	Ecuador	> 45
Lavado-Meza et al., 2023	Residuos agroindustriales de Theobroma cacao (Box–Behnken)	Perú	41,2
Villabona-Ortíz et al., 2022	Biomasa de Theobroma cacao (comparativo con 4 biomásas más)	Colombia	35,8

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3

Porcentaje de remoción o eficiencia de remoción de cadmio reportado en estudios centrados en residuos de Theobroma cacao

Autor(es), año	Material evaluado	País	% remoción / eficiencia
Hamzah et al., 2022	Biocarbón de cascarilla de cacao (reactores a escala de granja)	Indonesia	> 85 % remoción
Landry et al., 2025	Biocarbón de cáscara de cacao, activado y sin activar	Costa de Marfil	72,0 ± 1,1 % remoción
Lara et al., 2016	Residuos de cacao, columna de lecho fijo	Colombia	Eficiencia 88 %
Sánchez Salamea, 2016 y Uguña Rosas, 2020	Cáscara de cacao, tanque agitado	Ecuador	n.d. (selectividad Pb > Cd, sin valor cuantitativo reportado)

Fuente: Elaboración propia