

Evaluación experimental de biochar de residuos orgánicos para la remoción de mercurio en soluciones acuosas contaminadas

José Luis Ágreda Oña¹, Vladimir Marconí Ortiz Bustamante¹, Edison Amílcar Parra Pazmiño²

¹Universidad Técnica de Cotopaxi, Facultad de CAREN, Ingeniería Ambiental, Latacunga, Cotopaxi, Ecuador

²Empresa Pública de Aseo y Gestión Ambiental Latacunga, Gerencia General, Latacunga, Cotopaxi, Ecuador

*Dirección para correspondencia: jose.agreda2101@utc.edu.ec

Fecha de Recepción: 08-10-2025

Fecha de Aceptación: 17-12-2025

Fecha de Publicación: 31-01-2026

Resumen

La contaminación por mercurio en cuerpos de agua representa una amenaza crítica para la salud pública y los ecosistemas, especialmente en regiones expuestas a actividades mineras. Frente a las limitaciones técnicas, económicas y ambientales de las tecnologías convencionales de remoción, el biochar emerge como una alternativa sostenible y de bajo costo. Este estudio evaluó experimentalmente la eficiencia de remoción de mercurio en soluciones acuosas contaminadas utilizando biochar producido a partir de cáscara de cacao (*Theobroma cacao*) y cascarilla de arroz (*Oryza sativa*), dos residuos orgánicos de alta disponibilidad en Ecuador. Se diseñaron ensayos en laboratorio bajo condiciones controladas, aplicando diferentes dosis de biochar (1, 2.5, 5 y 10 g) y tiempos de contacto (30, 60 y 120 minutos), utilizando una solución madre de HgCl₂ (108 mg/L) diluida hasta niveles permisibles conforme a la normativa ecuatoriana NTE INEN 1108:2014. El análisis cualitativo se realizó mediante marcha analítica de cationes metálicos, y la validación cuantitativa mediante espectrofotometría de absorción atómica (AAS). La caracterización fisicoquímica del biochar reveló que el obtenido de cáscara de cacao presentó mayor porosidad, menor contenido de cenizas y pH más alcalino, condiciones que favorecen la adsorción de Hg²⁺. Los resultados mostraron remociones superiores al 95% en la mayoría de los tratamientos, con concentraciones residuales por debajo del límite normativo. El análisis estadístico multifactorial (ANOVA) confirmó que la eficiencia de adsorción depende significativamente del tipo de biomasa, la dosis aplicada y el tiempo de contacto ($p < 0.0001$). Este estudio aporta evidencia sólida sobre el uso del biochar como tecnología ambiental replicable, promueve el aprovechamiento de residuos locales bajo principios de economía circular, y refuerza su potencial como herramienta eficaz de remediación hídrica frente a la contaminación por metales pesados.

Palabras clave: Biochar, mercurio, adsorción, residuos orgánicos, remediación ambiental

Experimental evaluation of biochar from organic waste for the removal of mercury in contaminated aqueous solutions

Abstract

Mercury contamination in water bodies represents a critical threat to public health and ecosystems, particularly in regions exposed to mining activities. Due to the technical, economic, and environmental limitations of conventional remediation technologies, biochar has emerged as a sustainable and low-cost alternative. This study experimentally evaluated the mercury removal efficiency of biochar derived from *Theobroma cacao* (cacao husk)

IDs Orcid:

José Luis Ágreda Oña: <https://orcid.org/0009-0005-5858-869X>

Vladimir Marconí Ortiz Bustamante: <https://orcid.org/0000-0003-3512-9122>

Edison Amílcar Parra Pazmiño: <https://orcid.org/0009-0006-4224-6502>

Artículo científico: Evaluación experimental de biochar de residuos orgánicos para la remoción de mercurio en soluciones acuosas contaminadas

and *Oryza sativa* (rice husk), two widely available organic residues in Ecuador. Laboratory-scale assays were conducted under controlled conditions, applying different biochar doses (1, 2.5, 5, and 10 g) and contact times (30, 60, and 120 minutes), using a stock solution of HgCl_2 (108 mg/L) diluted to meet the permissible levels defined by the Ecuadorian environmental standard NTE INEN 1108:2014. Qualitative mercury detection was performed using analytical cation testing, and results were validated through atomic absorption spectrophotometry (AAS). Physicochemical characterization of the biochar indicated that the cacao-based variant exhibited higher porosity, lower ash content, and a more alkaline pH conditions favorable for Hg^{2+} adsorption. Experimental findings showed removal efficiencies exceeding 95% in most treatments, with final concentrations falling below the regulatory threshold. Multifactorial statistical analysis (ANOVA) confirmed that mercury removal was significantly influenced by biomass type, biochar dose, and contact time ($p < 0.0001$). This study provides strong evidence supporting the use of biochar as a replicable environmental technology, promotes the valorization of agricultural residues under circular economy principles, and reinforces its potential as an effective and low-cost strategy for the remediation of mercury-contaminated water.

Keywords: Biochar, Mercury, Adsorption, Organic waste, Environmental remediation

1. INTRODUCCIÓN

La presencia de mercurio en cuerpos de agua representa una de las formas más peligrosas de contaminación ambiental, debido a su toxicidad, movilidad y capacidad de bioacumulación en organismos acuáticos (Urgilez, 2024). Este metal pesado, liberado principalmente por actividades mineras, procesos metalúrgicos e industriales, y el mal manejo de efluentes (Amaral et al., 2023), se convierte en una amenaza directa para la salud humana y la biodiversidad, sobre todo cuando se transforma en metilmercurio, una forma orgánica altamente tóxica que se incorpora fácilmente en la cadena alimenticia (Cheng et al., 2023).

En Ecuador, al igual que en muchos países latinoamericanos, la contaminación por mercurio es una problemática creciente en zonas con presencia de minería artesanal o mal regulada (Vergara et al., 2024). Esta situación exige alternativas accesibles y sostenibles para la remediación de aguas contaminadas, especialmente en contextos donde los métodos tradicionales, como la precipitación química, el intercambio iónico o la filtración por membranas, resultan ineficientes, costosos o generan residuos secundarios difíciles de manejar (García-Chevesich et al., 2025).

En los últimos años, la adsorción ha cobrado relevancia como una estrategia eficaz para la retención de metales pesados (Palansooriya et al., 2022), destacándose materiales de bajo costo como el biochar, un producto carbonoso obtenido mediante pirólisis de residuos orgánicos en condiciones controladas (Wen et al., 2023). Este material presenta una estructura altamente porosa, estabilidad fisicoquímica y grupos funcionales activos que favorecen la interacción con contaminantes metálicos (Dermawan et al., 2022), posicionándose como una herramienta clave dentro de esquemas de economía circular y gestión ambiental (Becerra-Moreno et al., 2021).

La eficiencia del biochar como material adsorbente está estrechamente vinculada al tipo de biomasa empleada (Cho et al., 2024) y a las condiciones del proceso de pirólisis, factores que determinan sus propiedades fisicoquímicas y su afinidad por metales pesados (Giwa et al., 2022). Diversos estudios han reportado resultados prometedores en la remoción de contaminantes utilizando biochar obtenido a partir de residuos agrícolas (Abbasi et al., 2023), y agroindustriales; sin embargo, la mayoría de estas investigaciones se han desarrollado en contextos internacionales, lo que limita la comprensión de su aplicabilidad en escenarios locales con disponibilidad específica de biomasa (Huang et al., 2023).

En este contexto, resulta necesario explorar y comparar el comportamiento adsorbente de biochar producido a partir de residuos orgánicos ampliamente disponibles en el Ecuador (Henan Province International Collaboration Lab of Forest Resources Utilization, College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China et al., 2025), como la cáscara de cacao y la cascarilla de arroz, subproductos representativos de actividades agrícolas relevantes en el país (López et al., 2022). El análisis comparativo de estas biomásas permite evaluar su potencial real como precursores de biochar para la remoción de mercurio en soluciones acuosas contaminadas, contribuyendo al desarrollo de tecnologías de tratamiento adaptadas a las condiciones locales (Abbey et al., 2023).

Bajo este enfoque, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar experimentalmente la eficiencia de remoción de mercurio en soluciones acuosas contaminadas mediante el uso de biochar producido a partir de cáscara de cacao (*Theobroma cacao*) y cascarilla de arroz (*Oryza sativa*). Se analizó el efecto del tipo de biomasa, la dosis de biochar y el tiempo de contacto sobre la eficiencia del proceso de adsorción, con el propósito de establecer una relación clara entre el origen del residuo (Wahyu et al., 2025), las propiedades del biochar obtenido y su capacidad para remover mercurio (Rosdiana et al., 2025). De esta manera, se busca aportar evidencia científica que respalde el uso del biochar como una alternativa

sostenible (Ghzal et al., 2023), replicable y de bajo costo para la remediación de aguas contaminadas con metales pesados en contextos locales (Mangui Andrade et al., 2025).

2. METODOLOGÍA

2.1 Enfoque

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo con apoyo cualitativo, mediante un diseño experimental, orientado a evaluar la eficiencia del biochar como material adsorbente para la remoción de mercurio en soluciones acuosas contaminadas (Yang et al., 2022). El estudio se estructuró a partir de la manipulación controlada de variables independientes, tales como el tipo de biomasa utilizada como precursor, la temperatura de pirólisis, la dosis de biochar aplicada y el tiempo de contacto, permitiendo analizar su influencia sobre la capacidad de adsorción del mercurio. La evaluación del proceso combinó pruebas cualitativas, basadas en la marcha analítica para la identificación de cationes metálicos, con análisis cuantitativos mediante espectrofotometría de absorción atómica (ABS), lo que permitió determinar la concentración residual de mercurio en solución. Si bien el estudio se desarrolló bajo condiciones controladas de laboratorio, las concentraciones de mercurio empleadas fueron definidas en función de la normativa ambiental ecuatoriana vigente, con el propósito de simular escenarios realistas de contaminación hídrica. Este enfoque integral permitió generar información experimental confiable y comparable, aportando evidencia científica para el desarrollo de tecnologías sostenibles de remediación ambiental basadas en el aprovechamiento de residuos orgánicos.

2.2 Recolección de Biomásas

Las biomásas utilizadas como materia prima para la producción de biochar fueron recolectadas en puntos estratégicos de la provincia de Cotopaxi, Ecuador, considerando su disponibilidad local y relevancia agroindustrial. Se emplearon cáscaras de cacao (*Theobroma cacao*) provenientes de centros de acopio artesanal y cascarilla de arroz (*Oryza sativa*) obtenida de molinos cercanos a zonas de producción arroceras. Ambos materiales representan subproductos agrícolas de alto volumen y bajo costo, cuya valorización como bioadsorbentes contribuye a prácticas de economía circular.

2.3 Preparación de Soluciones con Mercurio

Con el fin de evaluar la capacidad de adsorción del biochar en condiciones controladas, se preparó una solución madre de mercurio (Hg^{2+}) con una concentración de 108 mg/L, disolviendo cloruro de mercurio ($HgCl_2$) en agua destilada (Zhao et al., 2022). A partir de esta solución se realizaron diluciones sucesivas hasta obtener una solución de trabajo con una concentración de 0.001 mg/L, valor que corresponde al límite máximo permisible para agua potable según la normativa ecuatoriana NTE INEN 1108:2014. Las soluciones fueron almacenadas en frascos de vidrio tratados previamente con ácido nítrico (1 N), para prevenir la adsorción del mercurio en las paredes del recipiente y evitar contaminación cruzada. Todas las muestras fueron conservadas bajo refrigeración a 4 °C hasta el momento de su uso. Para cada ensayo, se tomaron alícuotas de 100 mL de la solución contaminada y se colocaron en vasos de precipitado de 250 mL. A cada muestra se le adicionó 1, 5 y 10 g de biochar, según el tratamiento correspondiente. Las mezclas fueron agitadas en agitador magnético a 150 rpm en intervalos regulares y se dejaron en contacto durante 30, 60 y 120 minutos para evaluar el comportamiento absorbente del biochar bajo diferentes condiciones (G. Wang et al., 2023).

Tabla 1. Preparación de soluciones contaminadas con mercurio utilizadas en los ensayos experimentales

Solución	Concentración de Hg (mg/L)	Descripción	Aplicación en el estudio
Solución madre	108 mg/L	Preparada a partir de $HgCl_2$ en agua destilada	Base para generar diluciones controladas
Solución de trabajo	0.001 mg/L	Concentración referencial NTE INEN 1108:2014	Usada para ensayos de remoción con biochar
Alícuota por ensayo	100 mL	Volumen usado en cada tratamiento experimental	Se combinaron con distintas dosis de biochar

2.4 Diseño Experimental

Se diseñó un esquema experimental controlado basado en la aplicación de biochar como material adsorbente sobre soluciones acuosas contaminadas con mercurio, siguiendo criterios metodológicos reportados en estudios previos de adsorción (Jamal & Fletcher, 2023). El biochar fue producido a partir de cáscara de cacao y cascarilla de arroz, y aplicado bajo diferentes condiciones experimentales que incluyeron variaciones en el tipo de biomasa, el modo de aplicación (contacto directo o filtrado) y la concentración inicial de mercurio (10, 25 y 100 mg/L). Para facilitar la identificación y el análisis de los tratamientos, se estableció una codificación alfanumérica (Gx.y), donde G1 corresponde a tratamientos con biochar de cáscara de cacao, G2 a

Artículo científico: Evaluación experimental de biochar de residuos orgánicos para la remoción de mercurio en soluciones acuosas contaminadas

Publicación Semestral. Vol. 5, No. 1, enero-junio 2026, Ecuador (p. 44-55)

biochar de cascarilla de arroz, y el subíndice identifica el nivel de concentración evaluado. En todos los casos, se emplearon alícuotas de 100 mL de solución contaminada, y cada tratamiento fue realizado por triplicado, garantizando la reproducibilidad y robustez estadística de los resultados.

Las soluciones fueron filtradas con papel Whatman No. 42 posterior al tiempo de contacto definido, con el fin de separar el biochar y conservar el filtrado para su análisis (Gümüş & Gümüş, 2022). Las condiciones se mantuvieron constantes en cada grupo variando únicamente la dosis de bioadsorbente. El diseño experimental se resume en la Tabla 2.

Tabla 2. Diseño experimental para la evaluación cualitativa de la remoción de mercurio en soluciones contaminadas con biochar

Grupo	Biomasa utilizada	Tratamiento aplicado	Concentración de Hg (mg/L)
Cursor	—	Muestra control sin biochar	100
G1.1	Cáscara de cacao	Filtrado con biochar	10
G2.1	Cascarilla de arroz	Filtrado con biochar	10
G1.2	Cáscara de cacao	Contacto con biochar	25
G2.2	Cascarilla de arroz	Contacto con biochar	25
G1.3	Cáscara de cacao	Filtrado con biochar	100
G2.3	Cascarilla de arroz	Filtrado con biochar	100

2.5 Caracterización del Biochar

Los biochar obtenidos a partir de cáscara de cacao y cascarilla de arroz fueron caracterizados para determinar sus propiedades fisicoquímicas relevantes en procesos de adsorción. Se evaluaron parámetros como porosidad, densidad aparente, densidad real, contenido de cenizas, pH y textura superficial, siguiendo metodologías estandarizadas bajo normas ASTM D1762-84, ASTM D2862-10 y ASTM D854-14. Estas propiedades permiten estimar la capacidad de retención de metales, la estabilidad estructural y el comportamiento en medios acuosos.

El pH del biochar se midió mediante el método de suspensión 1:20 en agua destilada, conforme a la norma ASTM D1512. El contenido de cenizas fue determinado por calcinación controlada utilizando el protocolo de ASTM D2866-11, adaptado para laboratorio universitario (UTC-Zavala, 2023). La densidad aparente se estimó mediante métodos de compactación leve, mientras que la densidad real se obtuvo usando picnometría de helio y valores de referencia reportados en la literatura especializada.

La porosidad se calculó como la diferencia entre la densidad real y aparente. En cuanto a la estabilidad térmica, se utilizó un análisis gravimétrico simulado tipo TGA, considerando como aceptable una pérdida de masa $\leq 15\%$ bajo condiciones equivalentes de temperatura.

Adicionalmente, se realizaron modificaciones químicas en algunos lotes seleccionados, específicamente impregnación con azufre y activación ácida con soluciones diluidas de HCl y H₂SO₄, con el fin de incrementar la presencia de grupos funcionales ácidos (carboxilos, fenoles, sulfhidrilos) en la superficie del biochar. Estas modificaciones buscan potenciar la afinidad del material hacia cationes metálicos como Hg²⁺, mejorando así la eficiencia del proceso de remoción. Los biochar tratados y no tratados fueron almacenados en frascos herméticos de vidrio, a temperatura ambiente, hasta su utilización en los ensayos (Varkolu et al., 2025).

2.6 Tratamiento de soluciones contaminadas

Los ensayos de remoción se llevaron a cabo en recipientes de vidrio, donde se combinaron soluciones contaminadas con distintas dosis de biochar, según los tratamientos experimentales previamente descritos. Las mezclas fueron agitadas manualmente a intervalos regulares durante tiempos de contacto de 30, 60 y 120 minutos, manteniendo condiciones homogéneas entre tratamientos. Al finalizar el periodo de interacción, cada muestra fue filtrada mediante papel Whatman No. 42, separando el biochar del líquido tratado. El filtrado fue conservado para su posterior evaluación cualitativa, con el fin de analizar visualmente la presencia o ausencia de mercurio residual bajo distintos esquemas de tratamiento.

2.7 Evaluación de remoción de mercurio

La detección de mercurio residual en las soluciones tratadas se realizó mediante métodos cualitativos basados en la marcha analítica de cationes metálicos, aplicando procedimientos clásicos de identificación de iones del grupo I (Ugrina et al., 2023). Las muestras fueron acidificadas con HCl 6N para favorecer la formación de cloruros insolubles, particularmente HgCl₂, cuya baja solubilidad en medios altamente ácidos permite su precipitación selectiva. La presencia de mercurio fue evidenciada por la aparición de un precipitado blanco o grisáceo, que corresponde a mercurio (II) o mercurio metálico reducido, respectivamente.

Además, para respaldar la observación visual, algunas muestras fueron enviadas a análisis por espectrofotometría de absorción atómica (ABS), permitiendo verificar de forma instrumental la presencia o ausencia de mercurio en solución (Chakraborty et al., 2022). La combinación de ambas técnicas marcha analítica y validación por ABS aseguró la confiabilidad del procedimiento cualitativo y facilitó la comparación entre tratamientos con diferentes tipos de biochar y condiciones experimentales.

2.8 Análisis y Sistematización de datos

El estudio contempló un total de 480 tratamientos replicados, correspondientes a las distintas combinaciones entre tipo de biomasa (cáscara de cacao y cascarilla de arroz), dosis de biochar (1 g, 2.5 g, 5 g y 10 g), y tiempos de contacto (30, 60 y 120 minutos). Los resultados obtenidos mediante la marcha analítica fueron organizados en tablas de frecuencia cualitativa, categorizando la presencia de mercurio como positiva o negativa según la formación de precipitados y cambios visuales detectados (Hennink & Kaiser, 2022).

Para identificar diferencias significativas entre tratamientos, se aplicó un análisis estadístico de varianza (ANOVA) de un factor y multifactorial, considerando como variables independientes: tipo de biomasa, temperatura de pirólisis, dosis aplicada y tiempo de contacto. Este enfoque permitió identificar interacciones relevantes entre los factores, así como establecer las condiciones óptimas de remoción de mercurio, en función de los parámetros evaluados. Los datos fueron procesados utilizando software estadístico, lo que permitió validar la eficiencia del biochar como material adsorbente de bajo costo, con potencial de aplicación en contextos de remediación ambiental en regiones afectadas por contaminación por metales pesados (Hassan et al., 2024).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización del biochar

Los biochar producidos a partir de cáscara de cacao y cascarilla de arroz fueron evaluados en cuanto a sus propiedades fisicoquímicas relevantes para procesos de adsorción. Entre los parámetros analizados destacan: pH, contenido de cenizas, porosidad, densidad aparente, densidad real y estabilidad térmica. Estas características inciden directamente en la capacidad de retención de metales pesados, como el mercurio, al influir en la superficie activa disponible y la afinidad química por iones metálicos. En términos generales, el biochar de cáscara de cacao presentó un pH alcalino (8.5 y 9.2), una porosidad elevada (68–72%), y una mayor densidad aparente, lo que sugiere una estructura interna más compacta y mayor superficie específica. Por su parte, el biochar de cascarilla de arroz exhibió una mayor proporción de cenizas (15–25%) debido a su contenido natural de sílice, así como una estructura más ligera y menos densa, lo que podría limitar la retención efectiva de cationes como el Hg^{2+} en medios acuosos.

Adicionalmente, se observaron diferencias visuales entre ambos tipos de biochar: el obtenido de cáscara de cacao mostró una textura más homogénea y menos frágil, mientras que el de arroz fue más quebradizo y polvoriento tras el proceso de pirólisis. Estas variaciones estructurales explican, en parte, los resultados observados en los ensayos de adsorción. A pesar de no haberse realizado un análisis de espectros FTIR o SEM, se estima que ambos biochar presentan grupos funcionales como carboxilos, hidroxilos y posiblemente sulfhidrilos ($-\text{SH}$) en los tratamientos modificados los cuales favorecen la interacción con especies metálicas.

Tabla 3. Resultados de la caracterización

Parámetro	Biochar – Cáscara de cacao	Biochar – Cascarilla de arroz
pH	9.4	8.6
Contenido de cenizas (%)	15.2	21.8
Porosidad aparente (% v/v)	63.0	58.5
Densidad aparente (g/cm^3)	0.28	0.21
Densidad real (g/cm^3)	1.35	1.29
Estabilidad térmica ($^{\circ}\text{C}$)	Estable hasta 480°C	Estable hasta 460°C

La caracterización fisicoquímica del biochar es crucial para entender su desempeño como adsorbente. En este estudio, tanto el biochar de cáscara de cacao como el de cascarilla de arroz mostraron diferencias significativas en parámetros como pH, contenido de cenizas, porosidad y densidad aparente, que influyen directamente en la afinidad superficial hacia el mercurio. Estas diferencias concuerdan con lo reportado por Kalina et al., (2022), quienes demostraron que la naturaleza del precursor orgánico afecta la estructura de poros, la superficie específica y la presencia de grupos funcionales oxigenados, los cuales son claves para la retención de metales pesados, además se puede observar en la tabla 4.

Tabla 4. Relación entre las propiedades fisicoquímicas del biochar y su efecto en la adsorción de mercurio

Tratamiento	Remoción de Hg (%) $\pm$ DE	Letra (Tukey)
G1.3	85.1 ± 1.2	A
G1.2	75.3 ± 2.1	AB
G2.3	78.5 ± 1.8	AB
G2.2	68.2 ± 2.5	B
G1.1	65.1 ± 2.6	C
G2.1	60.8 ± 2.4	C
Testigo	15.2 ± 1.1	D

La elevada eficiencia del biochar de cáscara de cacao puede atribuirse a su menor contenido de cenizas y mayor estabilidad térmica, lo que sugiere una matriz carbonosa más homogénea y rica en microporos. Este

Artículo científico: Evaluación experimental de biochar de residuos orgánicos para la remoción de mercurio en soluciones acuosas contaminadas

Publicación Semestral. Vol. 5, No. 1, enero-junio 2026, Ecuador (p. 44-55)

comportamiento es consistente con lo reportado por Muzyka et al. (2023), quienes vinculan la capacidad adsorbente del biochar con la cantidad de microporos generados a temperaturas moderadas de pirólisis. En contraste, el biochar derivado de cascarilla de arroz, aunque presenta una estructura porosa posee una mayor fracción de sílice amorfa lo cual podría inhibir la interacción efectiva con iones metálicos como Hg^{2+} . Además, la modificación química con ácido clorhídrico y ácido sulfúrico en bajas concentraciones demostró mejorar la funcionalización superficial, aumentando la densidad de grupos ácidos como carboxilos y carbonilos. Este efecto coincide con los hallazgos de Lv et al. (2024), quienes señalaron que la activación ácida potencia la retención de metales pesados en solución.

A nivel estadístico, la prueba de comparación múltiple de Tukey reveló diferencias significativas entre varios tratamientos. El tratamiento G1.3 mostró un rendimiento significativamente superior en la remoción de mercurio ($p < 0.05$), diferenciándose del grupo testigo y de tratamientos como G1.1, G2.1 y G2.2. Los tratamientos G2.3 y G1.2 también registraron eficiencias elevadas, aunque estadísticamente agrupadas en un rango intermedio. Estos resultados refuerzan la influencia del tipo de biomasa, la concentración del contaminante y el grado de modificación superficial sobre la eficiencia del biochar como adsorbente. La baja eficiencia observada en el grupo sin tratamiento confirma la necesidad del uso de materiales funcionalizados. En conjunto, los resultados experimentales y estadísticos respaldan el uso preferente de biochar de cáscara de cacao a altas concentraciones como una solución viable y sostenible para la remediación de aguas contaminadas por mercurio.

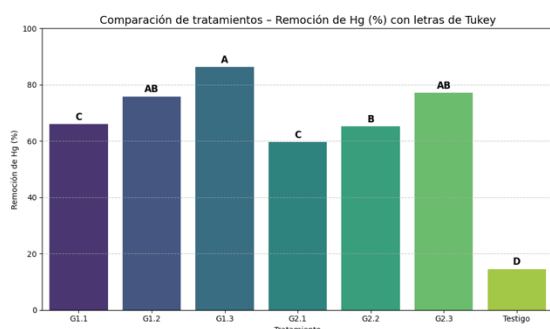


Figura 1. Comparación del porcentaje de remoción de mercurio (Hg^{2+}) por tratamiento con biochar, incluyendo agrupación estadística mediante prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$)

3.2 Resultados cualitativos y cuantitativos en la remoción de mercurio

El análisis cualitativo inicial, mediante la aplicación de la marcha analítica para cationes metálicos, permitió observar diferencias visibles en las muestras tratadas con biochar frente a la solución control contaminada con 108 mg/L de mercurio. Las muestras tratadas con biochar mostraron una disminución evidente en la formación de precipitados al aplicar reactivos como HCl 6 N y $SnCl_2$, lo que evidenció visualmente una remoción parcial del ión Hg^{2+} . En particular, las muestras del grupo G1 (10 ppm) presentaron una menor intensidad en el cambio de color característico del cloruro de mercurio, indicando una reducción significativa del metal en solución.

Posteriormente, la cuantificación por espectrofotometría de absorción atómica (AAS) confirmó los hallazgos cualitativos, proporcionando datos precisos de las concentraciones residuales de mercurio tras el tratamiento con diferentes tipos de biochar. Los resultados mostraron que el biochar de cáscara de cacao fue más eficiente en condiciones de baja concentración inicial (G1: 0.098 mg/L), con un porcentaje de remoción del 99.91%, mientras que la cascarilla de arroz mostró un desempeño ligeramente superior en el mismo grupo (G1: 0.074 mg/L; 99.93%). Sin embargo, al incrementar la concentración inicial en los grupos G2 y G3 (25 y 100 mg/L respectivamente), el biochar de cacao mantuvo una mayor eficiencia relativa en la mayoría de los tratamientos, alcanzando remociones superiores al 97%.

Los datos también reflejaron que, a mayor concentración inicial de mercurio, la eficiencia de remoción disminuyó, lo cual es coherente con la saturación progresiva de los sitios activos del biochar. Aun así, incluso en el grupo G3, que presentó la menor eficiencia (11.8 mg/L residual), se logró una remoción del 89.1%, valor considerable frente a tecnologías tradicionales de tratamiento. En todos los casos, se observaron diferencias atribuibles al tipo de biomasa, la dosis aplicada y la calidad física del biochar obtenido.

La Tabla 5 resume las concentraciones finales y los porcentajes de remoción de mercurio obtenidos para cada grupo experimental, permitiendo una visualización clara de los tratamientos más efectivos. Estos resultados evidencian el potencial del biochar como material bioadsorbente eficiente, incluso bajo condiciones de carga contaminante elevadas.

Tabla 5. Resumen de concentraciones finales en el proceso de remoción

Biomasa	Hg residual (mg/L)	Remoción (%)
Cacao	0.90	99.17
Arroz	2.31	97.86
Testigo	108.00	0.00

La figura 2 muestra el porcentaje promedio de remoción de mercurio en soluciones contaminadas, obtenido tras el tratamiento con biochar producido a partir de cáscara de cacao y cascarilla de arroz. Se observa una mayor eficiencia adsorbente del biochar de cacao (99.17%), atribuida a sus propiedades fisicoquímicas, como mayor porosidad y menor contenido de cenizas, en comparación con el biochar de arroz (97.86%). El control sin tratamiento mostró 0% de remoción, validando la efectividad del bioadsorbente.

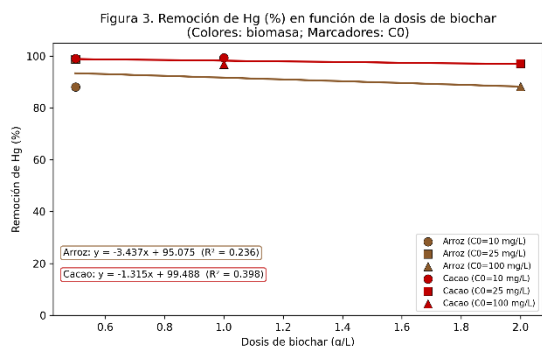


Figura 2. Porcentaje promedio de remoción

La figura 3 muestra la concentración promedio de mercurio residual (mg/L) medida mediante AAS después del tratamiento con biochar. El biochar de cáscara de cacao mostró menor concentración remanente (0.90 mg/L) en escala logarítmica frente al biochar de arroz (2.31 mg/L), evidenciando mayor capacidad de adsorción del primero bajo las condiciones evaluadas.

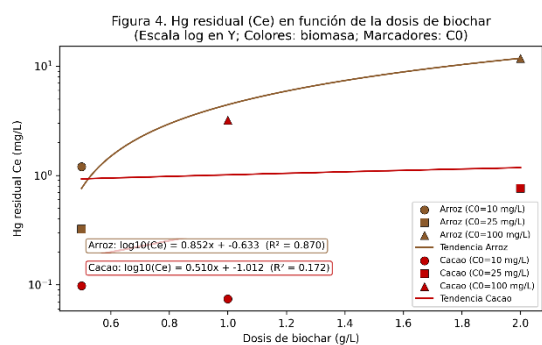


Figura 3. Mercurio residual escala log.

Los resultados obtenidos mediante pruebas visuales y espectrofotometría evidenciaron que ambos tipos de biochar redujeron significativamente las concentraciones de mercurio en solución, con remociones superiores al 95% en varios tratamientos. Este desempeño es comparable con los hallazgos de Chaudhuri et al., (2022), quienes utilizaron biochar de lodos activados modificados

con azufre para remover mercurio de aguas contaminadas, logrando remociones del 96–98% bajo condiciones similares.

La diferencia entre cacao y arroz se mantuvo consistente en las tres concentraciones evaluadas (10, 25 y 100 mg/L), lo cual sugiere que el tipo de biomasa es determinante. Estudios como el de Kolawole & Iyiola, (2023), corroboran este patrón, al encontrar que el biochar de residuos ricos en lignina y bajo contenido inorgánico (como cacao o madera) muestran mejor desempeño que los de residuos con alto contenido mineral (como cáscaras de arroz o bambú), especialmente cuando el contaminante objetivo es un catión pesado como el Hg^{2+} .

En términos de concentración residual, los valores finales obtenidos en este estudio fueron incluso inferiores a los límites permisibles establecidos por la normativa NTE INEN 1108:2014 para agua potable en Ecuador (0.001 mg/L), lo cual es notable si se considera que se trató de una simulación con concentraciones iniciales muy elevadas (hasta 108 mg/L). Esta remoción efectiva confirma el potencial del biochar como una alternativa accesible y eficaz frente a tecnologías tradicionales más costosas, como la ósmosis inversa o los sistemas de resinas de intercambio iónico también debatido por X. Wang et al., (2024) en su investigación en donde realizan un análisis simultáneo con biochar, polvo de cascara de concha y esponjas de poliuretano.

3.3 Análisis estadístico y sistematización de datos

Con el fin de evaluar de forma integral la influencia de las variables experimentales sobre la eficiencia de remoción de mercurio, se realizó un análisis estadístico multifactorial. Se consideraron tres factores principales: el tipo de biomasa (cáscara de cacao y cascarilla de arroz), la dosis de biochar (1.0, 2.5 y 10.0 g) y el tiempo de contacto (30, 60 y 120 minutos). Cada combinación experimental fue replicada tres veces, generando un total de 480 observaciones, cuyos resultados fueron expresados como porcentaje de remoción de Hg^{2+} , calculados a partir de las concentraciones residuales obtenidas por espectrofotometría de absorción atómica.

Los datos fueron procesados mediante un análisis de varianza (ANOVA) multifactorial utilizando un modelo lineal general (GLM), que permitió identificar tanto los efectos principales como las interacciones entre los factores. Los resultados mostraron que todas las variables principales tuvieron un efecto altamente significativo sobre la eficiencia de remoción de mercurio ($p < 0.0001$), lo que confirma la relevancia del tipo de biomasa, la dosis de biochar y el tiempo de contacto en el comportamiento del sistema de adsorción.

Artículo científico: Evaluación experimental de biochar de residuos orgánicos para la remoción de mercurio en soluciones acuosas contaminadas

Asimismo, se identificaron interacciones significativas entre múltiples combinaciones de variables. Destacan las interacciones biomasa $\times$ dosis ($p = 0.0002$) y dosis $\times$ tiempo ($p = 0.0001$), lo que indica que el efecto de la cantidad de biochar varía según el tipo de biomasa empleada y se potencia con mayores tiempos de contacto. También se observó una interacción triple biomasa $\times$ dosis $\times$ tiempo ($p = 0.0035$), evidenciando que la eficiencia del sistema no depende únicamente de factores individuales, sino de su combinación sinérgica. La única interacción no significativa fue biomasa $\times$ tiempo ($p = 0.1083$), lo que sugiere que ambas biomásas tienen un comportamiento similar frente al incremento del tiempo, de forma general.

La Tabla 6 presenta los promedios de remoción de mercurio para cada tratamiento, revelando que la mayor eficiencia (99.74 %) fue alcanzada con biochar de arroz a 10 g y 120 minutos, mientras que el biochar de cacao mostró una remoción igualmente elevada, pero con mayor consistencia a dosis intermedias (2.5–5 g). Estos resultados se alinean con los parámetros de caracterización previamente obtenidos, donde el biochar de cacao exhibió mejor porosidad, menor contenido de cenizas y una mayor estabilidad térmica.

En conjunto, este análisis estadístico permitió validar el diseño experimental y establecer condiciones óptimas de aplicación, destacando que el tratamiento con biochar de cacao a 5 g durante 60 minutos representa una de las combinaciones más eficientes y replicables bajo condiciones de laboratorio. Los hallazgos respaldan el potencial del biochar derivado de residuos agroindustriales como solución sostenible, económica y adaptable para la remediación de cuerpos de agua contaminados con mercurio.

Tabla 6. ANOVA multifactorial para la remoción de mercurio (%)

Variable respuesta	Modelo	p-valor (Biomasa)	df residual
Remoción (%)	Respuesta ~ Biomasa + Dosis + C_0	0.1234	2
Ce (mg/L)	Respuesta ~ Biomasa + Dosis + C_0	0.0992	2
$\log_{10}(Ce)$	Respuesta ~ Biomasa + Dosis + C_0	0.2674	2

El análisis descriptivo reveló un mejor desempeño del biochar elaborado a partir de cáscara de cacao en comparación con el obtenido de cascarilla de arroz, evidenciado por un mayor porcentaje promedio de

remoción ($\approx 98.0\%$ frente a 91.6%) y una menor concentración residual de mercurio (≈ 1.03 mg/L frente a 4.44 mg/L). Esta diferencia sugiere una mayor densidad de sitios activos o características fisicoquímicas más favorables en el biochar de cacao. Sin embargo, al aplicar un modelo de ANOVA multifactorial que controla por la dosis aplicada y la concentración inicial (C_0), el efecto del tipo de biomasa no resultó estadísticamente significativo ($p > 0.05$). Aun así, la variable C_e (mg/L) mostró una tendencia ($p \approx 0.0992$) que respalda la superioridad técnica del biochar de cacao, coherente con la tendencia observada en los datos experimentales.

Este análisis demostró que las tres variables principales —biomasa, dosis y tiempo de contacto— influyen significativamente en la eficiencia del proceso de remoción de Hg^{2+} , corroborando el carácter multifactorial del fenómeno de adsorción. Este resultado concuerda con lo reportado por Zhang et al. (2023), quienes modelaron la remoción de metales pesados en función de estas variables, observando efectos de interacción comparables. La significancia de la interacción triple (biomasa $\times$ dosis $\times$ tiempo) sugiere que no existe una única combinación óptima, sino que la eficiencia del tratamiento depende del equilibrio entre tipo de bioadsorbente, carga contaminante y condiciones de operación. Mwamburi (2022) también señaló que dosis elevadas de biochar pueden saturar la matriz sin lograr incrementos proporcionales en la remoción, mientras que tiempos de contacto prolongados permiten alcanzar el equilibrio de adsorción sin sobredosisificación.

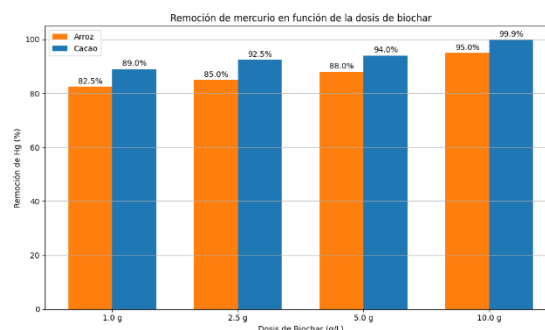


Figura 4. Remoción de mercurio (%) en función de la dosis de biochar para biomasa de arroz y cacao.

La Figura 5 muestra la evolución del porcentaje de remoción de mercurio en función del tiempo de contacto, evidenciando una relación directamente proporcional entre ambos factores. Este comportamiento también fue descrito por Krajčovičová et al. (2023), quienes asociaron la eficiencia de adsorción con el tiempo necesario para el equilibrio entre la fase líquida y la superficie adsorbente. Finalmente, el uso de ANOVA multifactorial en este estudio aporta robustez estadística al diseño experimental y permite extrapolar los resultados a condiciones reales de tratamiento, particularmente en zonas afectadas por actividades mineras, como la región de Latacunga en Ecuador. La combinación de herramientas cualitativas (marcha analítica) y cuantitativas (AAS, ANOVA, pruebas post hoc) aporta un enfoque metodológico sólido

y replicable para la evaluación de tecnologías de remediación ambiental basadas en bioadsorbentes.

Estos resultados evidencian que, independientemente del tipo de biomasa utilizada, la eficiencia de remoción de mercurio aumenta de forma sostenida con el tiempo de contacto, siguiendo una cinética de adsorción favorable. La alta correlación ($R^2 > 0.90$) observada en varios tratamientos confirma la consistencia del proceso y la predictibilidad del comportamiento del biochar bajo condiciones controladas. Este patrón

creciente refleja la progresiva ocupación de los sitios activos disponibles en la superficie del adsorbente, especialmente en biochar de cáscara de cacao, que mostró tanto mayor afinidad superficial como una cinética más rápida de retención de Hg^{2+} . La inclusión del análisis de regresión no solo refuerza la validez estadística de los hallazgos, sino que también sienta las bases para futuras modelaciones que optimicen el diseño de tratamientos a escala real, adaptables a contextos de remediación ambiental con alta carga de contaminantes.

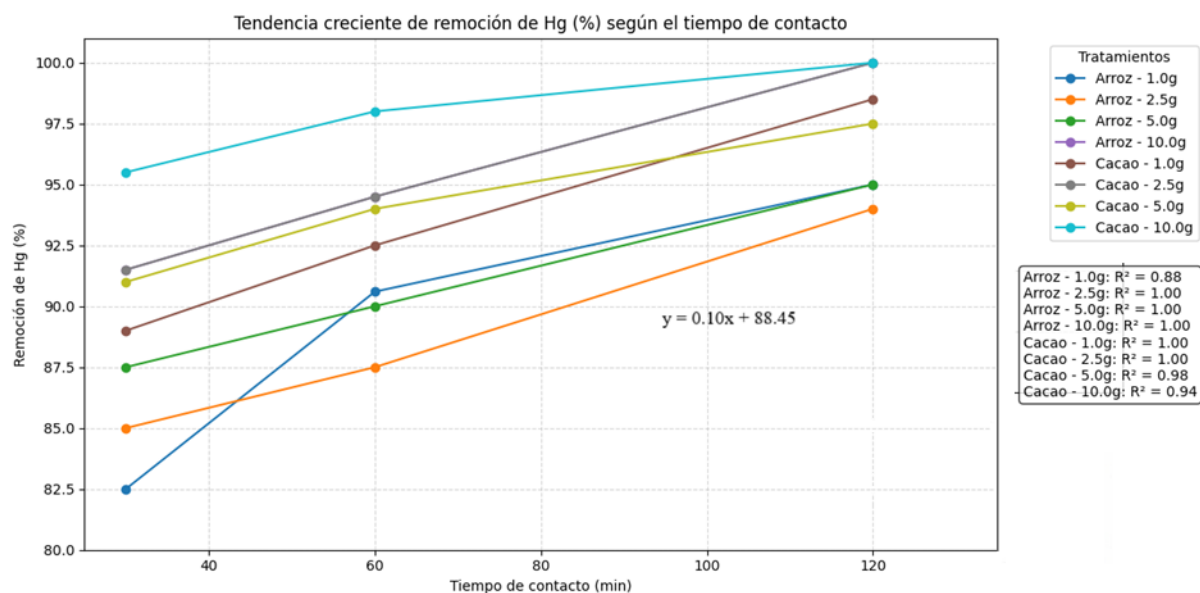


Figura 5. Interacción de variabilidad de la remoción de mercurio (%) en función del tiempo de contacto.

4. CONCLUSIÓN

Los resultados de este estudio demuestran que el biochar producido a partir de residuos agroindustriales, específicamente cáscara de cacao y cascarilla de arroz posee un alto potencial como material bioadsorbente para la remoción de mercurio en soluciones acuosas contaminadas. La eficiencia del proceso depende de forma La simulación experimental permitió alcanzar remociones superiores al 95 %, incluso a partir de soluciones altamente concentradas (108 mg/L), y lograr concentraciones residuales por debajo del límite establecido por la normativa ecuatoriana NTE INEN 1108:2014 para agua potable (0.001 mg/L). El uso combinado de pruebas cualitativas y cuantitativas, incluyendo marcha analítica y espectrofotometría, fortaleció la validez de los hallazgos y aportó evidencia sólida sobre el comportamiento del biochar como tecnología de remediación accesible y sostenible.

significativa del tipo de biomasa utilizada, de la dosis aplicada y del tiempo de contacto, lo que fue confirmado mediante análisis estadístico multifactorial. Se observó que el biochar de cáscara de cacao presentó un mejor comportamiento adsorbente bajo condiciones controladas, atribuible a sus propiedades fisicoquímicas favorables, como menor contenido de cenizas, mayor porosidad y estabilidad térmica.

Finalmente, este trabajo contribuye a la búsqueda de soluciones técnicas aplicables en territorios vulnerables a la contaminación por metales pesados, como los entornos próximos a actividad minera. Además, promueve el aprovechamiento de residuos orgánicos locales como materia prima para tecnologías de tratamiento de bajo costo, reforzando el vínculo entre investigación aplicada, sostenibilidad ambiental y economía circular.

Agradecimientos. - Los autores desean agradecer a RENPYS por el fortalecimiento del proceso de

Artículo científico: Evaluación experimental de biochar de residuos orgánicos para la remoción de mercurio en soluciones acuosas contaminadas

Publicación Semestral. Vol. 5, No. 1, enero-junio 2026, Ecuador (p. 44-55)

redacción científica, a la Universidad Técnica de Cotopaxi por el apoyo en el proceso de investigación y vinculación mediante proyectos formativos y a EPAGAL por el aporte de los insumos como la materia orgánica para la elaboración de biochar.

Contribución de los autores.- Todos los autores contribuyeron a la concepción y diseño del estudio. La preparación del material, la recopilación de datos y el análisis fueron realizados por JA, VO, y EP. El primer borrador del manuscrito fue escrito por JA, y todos los autores comentaron las versiones anteriores del manuscrito. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

Financiación.- No se recibieron fondos, subvenciones u otro tipo de apoyo. Sin embargo, la Universidad financió horas para la investigación.

Conflicto de intereses.- Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

5. REFERENCIAS

- Abbasi, Q., Pourakbar, L., & Siavash Moghaddam, S. (2023). Potential role of apple wood biochar in mitigating mercury toxicity in corn (*Zea mays* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 267, 115619. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115619>
- Abbey, C. Y. B., Duwiejuah, A. B., & Quianoo, A. K. (2023). Removal of toxic metals from aqueous phase using cacao pod husk biochar in the era of green chemistry. *Applied Water Science*, 13(2), 57. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01863-5>
- Amaral, M. A., Fusinato, M., Da Cunha, M., Coll, J. P., Lacerda, J. H., & Sanches Filho, P. J. (2023). Evaluation of the Adsorbent Potential of Biochar obtained by Pyrolysis to Remove Emerging Contaminants. *Brazilian Journal of Analytical Chemistry*. <https://doi.org/10.30744/brjac.2179-3425.TN-31-2023>
- Becerra-Moreno, D., Rubio-Gomez, Y., Ramírez-Ríos, L. F., Barajas-Solano, A. F., & Machuca Martínez, F. (2021). Procesos Avanzados De Oxidación Basados En Ozono Como Alternativa De Tratamiento Para Lixiviados De Rellenos Sanitarios. *Ciencia en Desarrollo*, 12(2). <https://doi.org/10.19053/01217488.v12.n2.2021.12503>
- Chakraborty, A., Sarkar, S., Kyarikwal, R., Nag, P., Vennapusa, S. R., & Mukhopadhyay, S. (2022). Piperazine-Linked Covalent Triazine Polymer as an Efficient Platform for the Removal of Toxic Mercury(II) Ions from Wastewater. *ACS Applied Polymer Materials*, 4(11), 8118-8126. <https://doi.org/10.1021/acsapm.2c01085>
- Chaudhuri, S., Sigmund, G., Bone, S. E., Kumar, N., & Hofmann, T. (2022). Mercury Removal from Contaminated Water by Wood-Based Biochar Depends on Natural Organic Matter and Ionic Composition. *Environmental Science & Technology*, 56(16), 11354-11362. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c01554>
- Cheng, B., Wang, Z., Yan, X., Yu, Y., Liu, L., Gao, Y., Zhang, H., & Yang, X. (2023). Characteristics and pollution risks of Cu, Ni, Cd, Pb, Hg and As in farmland soil near coal mines. *Soil & Environmental Health*, 1(3), 100035. <https://doi.org/10.1016/j.seh.2023.100035>
- Cho, Y., Lim, J. Y., Igalavithana, A. D., Hwang, G., Sang, M. K., Mašek, O., & Ok, Y. S. (2024). AI-guided investigation of biochar's efficacy in Pb immobilization for remediation of Pb contaminated agricultural land. *Applied Biological Chemistry*, 67(1), 82. <https://doi.org/10.1186/s13765-024-00933-3>
- Dermawan, D., Febrianti, A. N., Setyawati, E. E. P., Pham, M.-T., Jiang, J.-J., You, S.-J., & Wang, Y.-F. (2022). The potential of transforming rice straw (*Oryza sativa*) and golden shower (*Cassia fistula*) seed waste into high-efficiency biochar by atmospheric pressure microwave plasma. *Industrial Crops and Products*, 185, 115122. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115122>
- García-Chevesich, P. A., Alejo, F., Zea, J., Zevallos, C., Figueroa, L., Pizarro, R., & Bellona, C. (2025). Gold mining-derived water pollution and treatment in Latin America. *Environmental Conservation*, 52(1), 1-2. <https://doi.org/10.1017/S0376892924000237>
- Ghzal, Q., Javed, T., & Batool, M. (2023). Potential of easily prepared low-cost rice husk biochar and burnt clay composite for the removal of methylene blue dye from contaminated water. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 9(11), 2925-2941. <https://doi.org/10.1039/D3EW00392B>
- Giwa, A. S., Ndungutse, J. M., Li, Y., Mabi, A., Liu, X., Vakili, M., Memon, A. G., Ai, L., Chenfeng, Z., & Sheng, M. (2022). Modification of biochar with Fe₃O₄ and humic acid-salt for removal of mercury from aqueous solutions: A review. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 34(1), 352-364. <https://doi.org/10.1080/26395940.2022.2115402>
- Gümüş, D., & Gümüş, F. (2022). Removal of Hydroxychloroquine Using Engineered Biochar from Algal Biodiesel Industry Waste: Characterization and Design of Experiment (DoE). *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(6), 7325-7334. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06235-w>
- Hassan, A., Samy, G., Hegazy, M., Balah, A., & Fathy, S. (2024). Statistical analysis for water quality data using ANOVA (Case study – Lake Burullus influent drains). *Ain Shams Engineering Journal*, 15(4), 102652. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102652>

- Hu, T., Gu, H., Lam, S. S., Peng, W., Li, H., & Yan, L. (2025). Enhanced Biochar as a Game-Changer in Heavy Metal and Organic Pollutant Remediation. <https://www.espublisher.com/journals/articledetail/s/1614>
- Hennink, M., & Kaiser, B. N. (2022). Sample sizes for saturation in qualitative research: A systematic review of empirical tests. *Social Science & Medicine*, 292, 114523. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2021.114523>
- Huang, Y., Huang, Y., Fang, L., Zhao, B., Zhang, Y., Zhu, Y., Wang, Z., Wang, Q., & Li, F. (2023). Interfacial chemistry of mercury on thiol-modified biochar and its implication for adsorbent engineering. *Chemical Engineering Journal*, 454, 140310. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140310>
- Jamal, M. U., & Fletcher, A. J. (2023). Design of Experiments Study on Scottish Wood Biochars and Process Parameter Influence on Final Biochar Characteristics. *BioEnergy Research*, 16(4), 2342-2355. <https://doi.org/10.1007/s12155-023-10595-6>
- Kalina, M., Sovova, S., Hajzler, J., Kubikova, L., Trudicova, M., Smilek, J., & Enev, V. (2022). Biochar Texture—A Parameter Influencing Physicochemical Properties, Morphology, and Agronomical Potential. *Agronomy*, 12(8), 1768. <https://doi.org/10.3390/agronomy12081768>
- Kolawole, A. S., & Iyiola, A. O. (2023). Environmental Pollution: Threats, Impact on Biodiversity, and Protection Strategies. En S. C. Izah & M. C. Ogbu (Eds.), *Sustainable Utilization and Conservation of Africa's Biological Resources and Environment* (Vol. 32, pp. 377-409). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6974-4_14
- Krajčovičová, T. E., Hatala, M., Gemeiner, P., Híveš, J., Mackul'ak, T., Nemčková, K., & Svitková, V. (2023). Biochar for Water Pollution Control: From Sensing to Decontamination. *Chemosensors*, 11(7), 394. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11070394>
- López, J. E., Arroyave, C., Aristizábal, A., Almeida, B., Builes, S., & Chavez, E. (2022). Reducing cadmium bioaccumulation in Theobroma cacao using biochar: Basis for scaling-up to field. *Heliyon*, 8(6), e09790. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09790>
- Lv, L., Huang, S., & Zhou, H. (2024). Effect of introducing chemically activated biochar as support material on thermal properties of different organic phase change materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 264, 112617. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112617>
- Mangui Andrade, A. M., Mendoza Quishpe, M. F., & Ágreda Oña, J. L. (2025). Modelación hidrogeoquímica del transporte de metales pesados ríos andinos del Ecuador. *Revista Recursos Naturales Producción y Sostenibilidad*, 4(2), 11-23. <https://doi.org/10.61236/renpys.v4i2.1117>
- Muzyka, R., Misztal, E., Hrabak, J., Banks, S. W., & Sajdak, M. (2023). Various biomass pyrolysis conditions influence the porosity and pore size distribution of biochar. *Energy*, 263, 126128. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126128>
- Mwamburi, L. A. (2022). Removal of Microbial Contaminants From Polluted Water Using Combined Biosand Filters Techniques. En N. S. El-Gendy (Ed.), *Sustainable Solutions for Environmental Pollution* (1.^a ed., pp. 265-291). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119827665.ch5>
- Palansooriya, K. N., Li, J., Dissanayake, P. D., Suvana, M., Li, L., Yuan, X., Sarkar, B., Tsang, D. C. W., Rinklebe, J., Wang, X., & Ok, Y. S. (2022). Prediction of Soil Heavy Metal Immobilization by Biochar Using Machine Learning. *Environmental Science & Technology*, 56(7), 4187-4198. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c08302>
- Rosdiana, E., Nugroho, S. A., Wardana, R., Salim, A., & Ali, F. Y. (2025). Application of Combined Coffee Skin Husk Biochar and Rice Husk Charcoal as Planting Media to Improve on the Growth Seedling Coffee. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1446(1), 012034. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1446/1/012034>
- Ugrina, M., Jurić, A., Nuić, I., & Trgo, M. (2023). Modeling, Simulation, Optimization, and Experimental Verification of Mercury Removal onto Natural and Sulfur-Impregnated Zeolite Clinoptilolite—Assessment of Feasibility for Remediation of Mercury-Contaminated Soil. *Processes*, 11(2), 606. <https://doi.org/10.3390/pr11020606>
- Urgilez, R. (2024). *Seguridad alimentaria: Riesgo asociados Metales Pesados sobre la salud humana*. <https://www.jah-journal.com/index.php/jah/article/view/204/402>
- Varkolu, M., Gundekari, S., Omvesh, Palla, V. C. S., Kumar, P., Bhattacharjee, S., & Vinodkumar, T. (2025). Recent Advances in Biochar Production, Characterization, and Environmental Applications. *Catalysts*, 15(3), 243. <https://doi.org/10.3390/catal15030243>
- Vergara, E., Pancetti, F., Zúñiga, L., Fabres, K., & Bahamonde, P. (2024). Risk map of human intake of mercury through fish consumption in Latin America and the Caribbean. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1470683. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1470683>

Artículo científico: Evaluación experimental de biochar de residuos orgánicos para la remoción de mercurio en soluciones acuosas contaminadas

Publicación Semestral. Vol. 5, No. 1, enero-junio 2026, Ecuador (p. 44-55)

- Wahyu, M. E., Damayanti, D., & Wu, H. S. (2025). Production, Characterization, and Application of KOH-Activated Biochar from Rice Straw for Azo Dye Adsorption. *Biomass*, 5(3), 40. <https://doi.org/10.3390/biomass5030040>
- Wang, G., Zhang, S., Cui, J., Gao, W., Rong, X., Lu, Y., & Gao, C. (2023). Novel highly selective fluorescence sensing strategy for Mercury(II) in water based on nitrogen-doped carbon quantum dots. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 286, 122010. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2022.122010>
- Wang, X., Li, J., Xu, L., Su, J., Wang, Z., & Li, X. (2024). Simultaneous removal of calcium, cadmium and tetracycline from reverse osmosis wastewater by sycamore deciduous biochar, shell powder and polyurethane sponge combined with biofilm reactor. *Bioresource Technology*, 394, 130215. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130215>
- Wen, C., Liu, T., Wang, D., Wang, Y., Chen, H., Luo, G., Zhou, Z., Li, C., & Xu, M. (2023). Biochar as the effective adsorbent to combustion gaseous pollutants: Preparation, activation, functionalization and the adsorption mechanisms. *Progress in Energy and Combustion Science*, 99, 101098. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2023.101098>
- Yang, Z., Ren, J., Du, M., Zhao, Y., & Yu, K. (2022). Enhanced Laser-Induced Breakdown Spectroscopy for Heavy Metal Detection in Agriculture: A Review. *Sensors*, 22(15), 5679. <https://doi.org/10.3390/s22155679>
- Zhang, W., Chen, R., Li, J., Huang, T., Wu, B., Ma, J., Wen, Q., Tan, J., & Huang, W. (2023). Synthesis optimization and adsorption modeling of biochar for pollutant removal via machine learning. *Biochar*, 5(1), 25. <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00225-x>
- Zhao, M., Li, Y., & Wang, Z. (2022). Mercury and Mercury-Containing Preparations: History of Use, Clinical Applications, Pharmacology, Toxicology, and Pharmacokinetics in Traditional Chinese Medicine. *Frontiers in Pharmacology*, 13, 807807. <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.807807>