Moringa oleifera Seed Flour as a Biosorbent Agent for Cadmium Removal in the Cois Irrigation Channel, Chiclayo - 2026

Carlos Yeison Guerrero-Cabrejo[1]; Melissa Rosmery Plasencia-Flores[2]; Cristian Michel Gomez-Cornejo[3]
[1,2,3]Universidad César Vallejo, Perú, cguerreroca@ucvvirtual.edu.pe, mrplasenciaf@ucvvirtual.edu.pe, Gcornejocm@ucvvirtual.edu.pe

Abstract– ***Within the framework of SDG 6 "Clean Water and Sanitation" and SDG 3 "Good Health and Well-Being", this research evaluated the efficiency of Moringa oleifera seed flour as a natural biosorbent to reduce cadmium levels in the water of the Cois irrigation channel, Chiclayo, 2026. An initial cadmium concentration of 0.046 mg/L was determined, exceeding the ECA-Water Category 3-D1 limit (0.01 mg/L). The flour was prepared through dehydration, dehulling, and grinding, and characterized by FTIR-ATR spectroscopy, identifying functional groups N-H, O-H, C-H, C=O, and C-O with chelating capacity. A 4×3 factorial design was applied with doses (1, 5, 10, and 15 g/L) and contact times (30, 60, and 90 min). The optimal combination was 10 g/L and 30 minutes, achieving a removal efficiency of 83.4 % and a final cadmium concentration of 0.00764 mg/L, below the ECA limit. ANOVA confirmed significant effects of dose, time, and their interaction ($p < 0.05$), with $R^2 = 89.96$ %. Moringa oleifera seed flour is an effective, economical, and natural biosorbent for cadmium removal from surface water bodies in the Lambayeque region, representing a sustainable and low-cost alternative to conventional physicochemical treatment methods for the remediation of heavy-metal-contaminated irrigation water.***

Keywords– ***Cadmium; Water; Water Pollution; Heavy Metals; Water Treatment.***

Harina de semilla de Moringa oleífera como agente bioadsorbente en la remoción de cadmio en la acequia Cois, Chiclayo - 2026

Carlos Yeison Guerrero-Cabrejo[1]; Melissa Rosmery Plasencia-Flores[2]; Cristian Michel Gomez-Cornejo[3]
[1,2,3]Universidad César Vallejo, Perú, cguerreroca@ucvvirtual.edu.pe, mrplasenciaf@ucvvirtual.edu.pe, Gcornejocm@ucvvirtual.edu.pe

Resumen*– En el marco del ODS 6 "Agua Limpia y Saneamiento" y el ODS 3 "Salud y Bienestar", la presente investigación evaluó la eficiencia de la harina de semilla de Moringa oleífera como bioadsorbente para reducir el cadmio en el agua de la acequia Cois, Chiclayo, 2026. Se determinó una concentración inicial de 0,046 mg/L, superior al límite ECA-Agua Categoría 3-D1 (0,01 mg/L). La harina se elaboró mediante deshidratación, descascarado y molienda, y se caracterizó por FTIR-ATR, identificándose grupos funcionales N-H, O-H, C-H, C=O y C-O con capacidad quelante. Se aplicó un diseño factorial 4×3 con dosis (1, 5, 10 y 15 g/L) y tiempos de contacto (30, 60 y 90 min). La combinación óptima fue 10 g/L y 30 minutos, con una eficiencia de remoción de 83,4 % y una concentración final de 0,00764 mg/L, por debajo del ECA. El ANOVA confirmó efectos significativos de la dosis, el tiempo y su interacción ($p < 0,05$), con $R^2 = 89,96$ %. La harina de semilla de Moringa oleífera es un bioadsorbente eficaz, económico y natural para la remoción de cadmio en cuerpos hídricos de la región Lambayeque, constituyendo una alternativa sostenible y accesible frente a los métodos convencionales de tratamiento de agua contaminada con metales pesados.

***Palabras clave*– Cadmio; Agua; Contaminación del agua; Metales pesados; Tratamiento del agua.**

I. Introducción

A escala internacional, garantizar la disponibilidad de agua de calidad adecuada es un requisito indispensable para salvaguardar la salud humana y el equilibrio de los ecosistemas acuáticos. Entre los contaminantes de mayor preocupación destacan los metales pesados, que persisten en el entorno al acumularse en suelos y aguas y se transfieren paulatinamente a los seres vivos a través de las cadenas alimentarias [1]. El cadmio (Cd) resalta por su elevada toxicidad y por figurar en el grupo 1 de sustancias cancerígenas para el ser humano según la IARC, mostrando un vínculo robusto con tumores de pulmón, próstata y riñón [2]. Este metal se distingue por su tendencia a bioacumularse y por su prolongada persistencia en los medios acuáticos, provocando perjuicios tanto en la fauna acuática como en la terrestre al incorporarse a la red trófica [3].

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) y ONU-Agua, cerca de 1 700 millones de personas se abastecen de fuentes de agua contaminadas o no aptas para el consumo, lo que evidencia la magnitud global de la contaminación hídrica [4]. La exposición prolongada al cadmio desencadena daño renal progresivo, alteraciones óseas y desórdenes metabólicos vinculados al estrés oxidativo [5], expresados en cuadros como la enfermedad de Itai-Itai, con efectos teratogénicos y mutagénicos documentados [6]. Asimismo, el cadmio es un contaminante prioritario no biodegradable que aparece de manera natural en concentraciones traza en ríos no contaminados y alcanza valores muy superiores en cuerpos de agua afectados, permaneciendo en sedimentos y tejidos y reactivándose ante variaciones fisicoquímicas del medio [7].

Frente a las limitaciones de las tecnologías convencionales, los materiales biosorbentes de origen vegetal constituyen una opción sostenible por su abundancia, bajo costo y naturaleza biodegradable; en su estructura poseen grupos funcionales activos (carboxilos, hidroxilos y aminos) con gran afinidad por los iones metálicos [8]. Entre los métodos tradicionales para depurar aguas con cadmio se encuentran la precipitación química, el intercambio iónico, la ósmosis inversa y la filtración por membranas [9]; sin embargo, presentan costos elevados, requieren personal especializado, generan subproductos contaminantes y demandan alta energía, lo que dificulta su uso en regiones con recursos limitados [10]. El cadmio, el plomo y el mercurio se cuentan entre los contaminantes prioritarios del agua por su toxicidad para los ecosistemas acuáticos [11].

En este contexto, la atención sobre los bioadsorbentes vegetales se ha incrementado por su sencilla obtención, bajo costo, biodegradabilidad y menor impacto ecológico frente a los adsorbentes sintéticos [12]. Diversos estudios respaldan el potencial de la Moringa oleífera: Nwagbara et al. reportaron una eficiencia de remoción del 81,77 % a pH 5 y una retención máxima de 5,03 mg/g, ajustada al modelo de Langmuir (R^2 = 0,9974) [13], atribuyendo la captación a los grupos carboxilo (–COOH), hidroxilo (–OH) y amino ($–NH_2$) de las proteínas de la semilla, que quelan e intercambian iones con el Cd^{2+} [14]. Ngounouno et al. informaron remociones del 91,66 % para Cd(II) en aguas afectadas por minería de oro [15], mientras que el pH del medio resultó determinante en la eficiencia, al modificar la especiación del cadmio y la protonación de los grupos funcionales [16]. En conjunto, la evidencia señala que la semilla de Moringa oleífera opera como un bioadsorbente eficiente al regular la dosis, el tiempo de contacto y la agitación [17].

A nivel nacional, la contaminación del agua por metales pesados es un problema ambiental de notable importancia: en el Perú solo cerca del 30 % de las aguas residuales recibe tratamiento [18], y los seguimientos del ANA en la cuenca del río Moche evidenciaron superaciones reiteradas de los ECA-Agua fijados en el D.S. N.° 004-2017-MINAM [19]. Dicho marco normativo fija en 0,01 mg/L el valor máximo de cadmio para aguas de riego de la Categoría 3-D1 [20], en tanto que la

OMS establece un valor guía de 0,003 mg/L para agua de consumo [21]. El Estado peruano fomenta el manejo sostenible del agua mediante infraestructura natural y tecnologías ecológicas de bajo costo [22], [23].

En Chiclayo, la acequia Cois abastece principalmente labores agropecuarias; sin embargo, trabajos previos registraron niveles de plomo y cadmio superiores a los límites para agua de Categoría 3, tornándola inadecuada para el riego [24], y reportes recientes ratifican la persistencia de la contaminación por residuos sólidos y aguas residuales [25]. Antecedentes internacionales confirman el potencial de la Moringa: se ha descrito una capacidad máxima de 5,03 mg/g para cadmio con ajuste a Langmuir y proceso espontáneo y exotérmico [26]; ventajas del material por su disponibilidad y mineralización biológica [27]; y su idoneidad frente a un contaminante no biodegradable con tendencia a bioacumularse [28]. Las proteínas solubles de carga positiva de la semilla son responsables de la floculación y la captación de iones metálicos [29]. A nivel local, se ha verificado además la presencia de cadmio en lodos de la propia acequia Cois y su remoción mediante Trichoderma [30].

Respecto al marco teórico, la biosorción es un fenómeno fisicoquímico en el que las sustancias disueltas son retenidas por adhesión a un material biológico sólido, con independencia de la actividad metabólica celular, e involucra intercambio iónico, complejación superficial, interacciones electrostáticas y microprecipitación [31]. Su eficacia depende del pH, la temperatura, el tiempo de contacto y la concentración inicial del metal; el modelo de Langmuir describe la adsorción en monocapa y el de Freundlich las superficies heterogéneas [32]. La captura de cadmio por Moringa oleífera converge en el intercambio de cationes, la formación de complejos con grupos carboxílicos y amínicos y la microprecipitación de formas hidroxiladas bajo condiciones alcalinas [33], [34].

Por consiguiente, el objetivo general fue evaluar en qué medida la harina de semilla de Moringa oleífera presenta un efecto significativo como bioadsorbente para disminuir la concentración de cadmio en el agua de la acequia Cois, Chiclayo – 2026. Los objetivos específicos fueron: (1) caracterizar la presencia de cadmio en el agua de la acequia Cois; (2) elaborar la harina de semilla de Moringa oleífera y determinar sus propiedades físicas y químicas asociadas a su capacidad adsorbente; y (3) establecer el nivel de bioadsorción de cadmio desarrollado por la harina en el agua de la acequia Cois. El estudio se alinea con el ODS 6 (meta 6.3), el ODS 12 (metas 12.2 y 12.4) [35] y el ODS 3 (meta 3.9) al reducir la exposición a un elemento cancerígeno [36], y aporta una alternativa natural y de bajo costo cuya eficacia ha sido respaldada por síntesis verdes de nanopartículas de Moringa [37].

II. METODOLOGÍA

A. Tipo y diseño de investigación

La investigación fue de tipo aplicado, pues buscó dar respuesta práctica a un problema concreto mediante el uso de harina de semilla de Moringa oleífera como bioadsorbente natural para abatir el cadmio en las aguas de la acequia Cois [38]. Las investigaciones aplicadas en biosorción emplean materiales biológicos como tecnologías limpias, eficaces y económicas para resolver problemas de contaminación del agua por metales pesados [39]. El enfoque fue cuantitativo y el diseño experimental, en el que se controlaron y modificaron de manera deliberada factores operativos dosis de biosorbente y tiempo de contacto para determinar relaciones de causa y efecto sobre la eficiencia de remoción [40]. Se consideró como variable dependiente la cantidad de cadmio retirada (eficiencia de remoción, %, y concentración residual, mg/L) y como variables independientes la dosis (1, 5, 10 y 15 g/L) y el tiempo de contacto (30, 60 y 90 min) [41], [42], [43].

B. Área de estudio, muestreo y preservación

La población quedó conformada por las aguas de la acequia Cois, distrito de Chiclayo, Lambayeque, cuyo caudal medio es de 0,25 m³/s y su sección de 1,4 m de ancho por 0,4 m de profundidad. El muestreo fue no probabilístico intencional, conforme al protocolo nacional del ANA para aguas superficiales [44]. Se recolectaron muestras en dos puntos estratégicos: Av. José Balta – Av. Castañeda Iparraguirre (6,762706° S; 79,840615° W) y Av. Jorge Chávez – Av. Nicolás de Piérola (6,762809° S; 79,837776° W). La muestra total ascendió a 20 L, repartidos en dos recipientes rotulados y sellados, conservados a 4 °C para preservar sus características fisicoquímicas [45].

C. Elaboración y caracterización del bioadsorbente

La preparación de la harina siguió una secuencia estandarizada de limpieza, descascarado, secado, trituración y tamizado, asegurando la homogeneidad y estabilidad del material. La humedad se determinó por secado en estufa a 65 °C durante 24 h hasta masa constante, según la Ecuación (2). La composición proximal se obtuvo con la metodología FAO Food and Nutrition Paper Vol. 14/7, y los grupos funcionales se identificaron por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR-ATR) en un equipo Perkin Elmer (450–4000 cm^{-1}, norma ASTM E1252). El cadmio se cuantificó por espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) bajo el EPA Method 200.7, Rev. 4.4.

Formula del porcentaje de humedad, se muestra en la Ecuación (2):

$$Humedad\ (\%) = \frac{P_i - P_f}{P_i} x\ 100 \qquad (2)$$

D. Diseño experimental de bioadsorción y análisis estadístico

Para los ensayos batch se emplearon volúmenes de 250 mL por unidad experimental. Se aplicó un diseño factorial de dos factores, dosis (4 niveles) y tiempo de contacto (3 niveles) con dos repeticiones por combinación, conforme a la Ecuación (1), lo que originó 12 combinaciones y 24 unidades experimentales, más 2 blancos, para un total de 26 unidades [46]. Los ensayos se realizaron a temperatura ambiente (25 ± 2 °C), rango en el cual estudios previos reportaron remociones de cadmio superiores al 80 % [47]. La eficiencia de remoción se calculó

con la Ecuación (3), a partir de las concentraciones inicial (C_i) y final (C_e) del metal.

Formula del diseño experimental que se muestra en la Ecuación (1):

$$N = d\ x\ t\ x\ r \quad (1)$$

Fórmula para remover el cadmio que se muestra en la Ecuación (3)

$$Remoción\ (\%) = \frac{C_i - C_f}{C_i} x\ 100 \quad (3)$$

Los datos se analizaron mediante Análisis de Varianza (ANOVA) con el software Minitab 22.3.1 para verificar diferencias significativas entre tratamientos y medir los efectos individuales y de interacción de los factores. Posteriormente se aplicó la prueba post hoc de Tukey (HSD, 95 %) para identificar grupos homogéneos [48]. La ecuación de remoción utilizada es de amplio uso en estudios de adsorción de metales en solución acuosa [49]. La investigación se rigió por el Código de Ética en Investigación de la Universidad César Vallejo, con citación bajo la norma ISO 690 y verificación de originalidad mediante Turnitin [50].

Antecedentes recientes con Moringa oleífera respaldan estos rangos experimentales: se reportaron eficiencias del 99 % para aluminio y arsénico en el río Tambo [51], remociones de turbidez del 56,24 % en una PTAR de Arequipa [52], y del 93 -96 % para plomo en el río Santa mediante biofiltro de Moringa [53], además de una clarificación del 88,74 % en el Canal Monsefú, Lambayeque [54].

III. Resultados y Discusión

A. Caracterización fisicoquímica del agua de la acequia Cois

La caracterización inicial del agua (Tabla I) arrojó una concentración de cadmio de 0,047 mg/L (Blanco 1) y 0,045 mg/L (Blanco 2), con un promedio de referencia de 0,046 mg/L y una desviación estándar de 0,0014 mg/L, lo que confirma la estabilidad de la medición inicial. Este valor excede en más de cuatro veces el límite de 0,01 mg/L fijado por el ECA-Agua (Categoría 3-D1) del D.S. N.° 004-2017-MINAM, lo que justifica la aplicación de un tratamiento de remoción. Estos resultados concuerdan con lo informado por Romero Guzmán r [24] para la acequia Cois y con las superaciones del ECA registradas por el ANA en la cuenca del río Moche [19].

El pH ligeramente alcalino (7,38–7,44) reduce la competencia de iones H^+ por los grupos funcionales del bioadsorbente y favorece la interacción Cd–superficie [16]. La conductividad eléctrica moderada (812–826 µS/cm) revela una carga iónica que puede competir con el Cd por los sitios de adsorción [11], mientras que el ORP oxidante (188–196 mV) mantiene el cadmio en su forma iónica divalente (Cd^{2+}), disponible para el contacto con el material [6] . La temperatura (22,4–22,8 °C) otorga pertinencia práctica al ensayo, realizado sin calentamiento externo.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL AGUA DE LA ACEQUIA COIS

Muestra	Cd (mg/L)	pH	Conduct. (µS/cm)	ORP (mV)	Temp. (°C)
Blanco 1	0,047	7,38	812	188	22,4
Blanco 2	0,045	7,44	826	196	22,8
Promedio	0,046	7,41	819	192	22,6

Fuente: elaboración propia.

B. Composición y grupos funcionales de la harina de Moringa oleífera

La harina se elaboró mediante limpieza, descascarado, secado, trituración y tamizado. El análisis proximal (Tabla II) reveló un contenido de humedad de 5,3 %, que asegura la estabilidad del material, y un elevado contenido de proteínas (33,52 %) y grasa (36,12 %). Las proteínas solubles de carga positiva son responsables de la floculación y de la captación de iones metálicos [29] , mientras que el perfil de composición es acorde con harinas oleaginosas empleadas como biosorbentes naturales [14] .

TABLA II
COMPOSICIÓN PROXIMAL DE LA HARINA DE SEMILLA DE MORINGA OLEÍFERA

Parámetro	Unidad	Resultado
Humedad	%	5,3
Proteínas	%	33,52
Grasa	%	36,12
Carbohidratos	%	14,43
Cenizas	%	4,79
Energía total	kcal/kg	5134,4

Fuente: elaboración propia.

La caracterización se completó con FTIR-ATR (Fig. 1), cuyo espectro permitió reconocer seis bandas de absorción características (Tabla III).

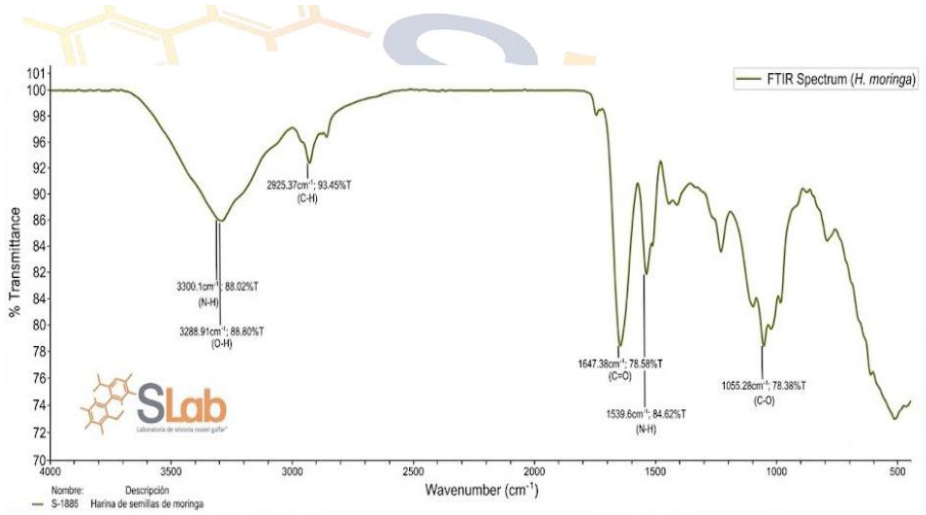


Fig. 1 Espectro FTIR-ATR de la harina de semilla de Moringa oleífera.
Fuente: Informe de Ensayo IE-2026-3252, SLab Perú (2026).

TABLA III
GRUPOS FUNCIONALES IDENTIFICADOS POR FTIR-ATR DE LA HARINA DE SEMILLA DE MORINGA OLEÍFERA

Vibración	Grupo	Rango teórico (cm⁻¹)	Exp. (cm⁻¹)	Origen posible	Notas clave
Tensión	N-H	3400–3200	3300	Amidas (proteínas)	Solapamiento con O-H; indica proteínas
Tensión	O-H	3400–3200	3288	Hidroxilos (celulosa/almidón)	Banda ancha; humedad
Tensión	C-H	2950–2800	2925	Cadenas alifáticas (lípidos)	Coincide con alto contenido de grasa
Tensión	C=O	1790–1688	1647	Amida I (enlace peptídico)	Banda característica de proteínas
Flexión	N-H	1600–1500	1539	Amida II (proteínas)	Evidencia clara de proteínas
Tensión	C-O	1300–1000	1055	Éteres (polisacáridos)	Asociado a polisacáridos

Fuente: Informe de Ensayo IE-2026-3252, SLab Perú (2026).

El perfil espectral ratifica la presencia de grupos hidroxilo (–OH), amino (–NH_2) y carbonilo (C=O) en la superficie de la harina, que operan como sitios activos aptos para formar complejos con iones metálicos por quelación e intercambio iónico. Las bandas en 1647 y 1539 cm^{-1} (amida I y II) confirman proteínas estructurales, y la señal en 1055 cm^{-1} (C-O) se asocia a polisacáridos. Estos hallazgos coinciden con Benettayeb et al. [14] y Nwagbara et al. [13] , y con Morquencho Apolo [34] y Quaicoe et al. [33], quienes asignaron a los grupos C-C, C-O y N-H el papel principal en la captación de metales; el proceso de elaboración preservó, por tanto, la integridad de los sitios quelantes del material [27].

C. Eficiencia de remoción de cadmio

El diseño factorial 4×3 permitió evaluar el efecto de la dosis y el tiempo de contacto sobre la concentración residual de cadmio (Tabla IV). Con 1 g/L la remoción fue baja (16,7–27,2 % en promedio), por la escasa masa adsorbente frente a la concentración inicial. Con 5 g/L la eficiencia aumentó (39,2–57,2 %), y con 10 g/L a 30 min se alcanzó el mejor desempeño del ensayo: 83,4 % de remoción y una concentración final media de 0,00764 mg/L, por debajo del límite ECA. Con 15 g/L la eficiencia creció al prolongar el tiempo (hasta 76,7 % a 90 min), lo que evidencia que la respuesta no depende solo de la dosis, sino de su combinación con el tiempo de contacto [55], [56], [57], [58].

TABLA IV
CONCENTRACIÓN FINAL Y EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE CADMIO POR TRATAMIENTO

Dosis (g/L)	Tiempo (min)	Cd final medio (mg/L)	Remoción media (%)
1	30	0,03349	27,2
1	60	0,03625	21,2
1	90	0,03832	16,7
5	30	0,01969	57,2
5	60	0,02383	48,2
5	90	0,02797	39,2
10	30	0,00764	83,4
10	60	0,02144	53,4
10	90	0,03004	34,7
15	30	0,01900	58,7
15	60	0,01486	67,7
15	90	0,01072	76,7

Fuente: elaboración propia a partir de los datos del diseño factorial.

La Fig. 2 muestra la eficiencia de remoción por dosis y tiempo, con el óptimo claramente localizado en 10 g/L y 30 min. La Fig. 3 confirma la interacción dosis × tiempo: la dosis de 10 g/L alcanza su pico a 30 min, mientras que la de 15 g/L responde mejor a tiempos prolongados. Estos resultados son equiparables a los de Nwagbara et al. (81,77 % de remoción de Cd a pH 5, con 5,03 mg/g) [13]; las diferencias se atribuyen a la matriz del agua (real frente a sintética), el pH y la concentración inicial, factores reconocidos como decisivos [44]. Ngounouno et al. reportaron eficiencias del 91,66 % para Cd(II) en aguas de minería [15], lo que sitúa a este biosorbente entre los más eficaces descritos para la remoción de cadmio.

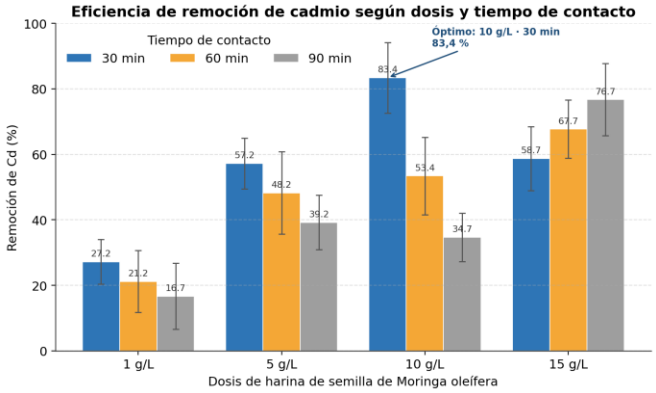


Fig. 2 Eficiencia de remoción de cadmio según la dosis de harina de Moringa oleífera y el tiempo de contacto.
Fuente: elaboración propia.

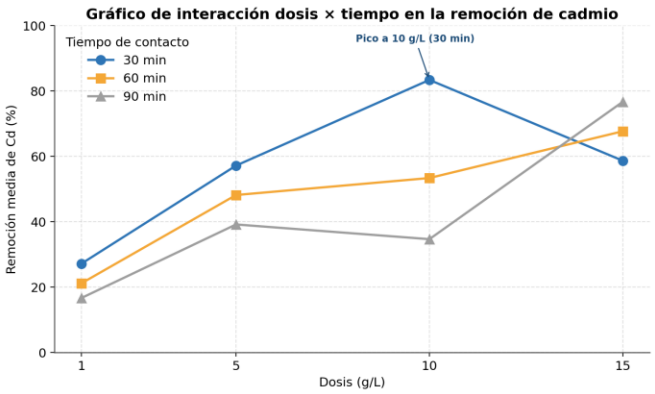


Fig. 3 Gráfico de interacción dosis × tiempo en la remoción media de cadmio.
Fuente: elaboración propia.

D. Análisis estadístico del proceso

El ANOVA factorial (Tabla V) fue significativo para el modelo ($F = 9,77$; $p < 0,001$). La dosis fue el factor de mayor peso ($F = 24,62$; $p < 0,001$), seguida del tiempo ($F = 4,71$; $p = 0,031$) y de la interacción dosis × tiempo ($F = 4,03$; $p = 0,019$). La significancia de la interacción constituye uno de los hallazgos centrales, pues indica que el efecto de la dosis está condicionado por el tiempo de contacto y justifica el uso de un diseño factorial en lugar de uno de un solo factor. Estos resultados concuerdan con Hinostroza Tejeda [59], quien comprobó por ANOVA la influencia significativa ($p \leq 0,05$) de dosis y tiempo en la remoción con Moringa oleífera.

TABLA V
ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) DEL DISEÑO FACTORIAL

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	11	0,002147	0,000195	9,77	0,000
Lineal	5	0,001663	0,000333	16,66	0,000
Dosis (g/L)	3	0,001475	0,000492	24,62	0,000
Tiempo (min)	2	0,000188	0,000094	4,71	0,031
Interacción D×T	6	0,000483	0,000081	4,03	0,019
Error	12	0,000240	0,000020	—	—
Total	23	0,002386	—	—	—

Fuente: elaboración propia.

El resumen del modelo arrojó S = 0,0044687 mg/L, R^2 = 89,96 %, R^2 ajustado = 80,75 % y R^2 predictivo = 79,83 %, lo que refleja una alta capacidad explicativa y predictiva, apropiada para una matriz acuosa real donde el comportamiento del metal se ve afectado por el pH, la conductividad y las especies iónicas competidoras [31] . La prueba de Tukey al 95 % para la dosis (Tabla VI, Fig. 4) situó a 1 g/L en el grupo A (mayor concentración residual, 0,03602 mg/L), a 5 y 10 g/L en el grupo B, y a 15 g/L en el grupo C (menor residuo promedio, 0,01486 mg/L). La prueba de Tukey para el tiempo (Tabla VII) ubicó a 30 min en el grupo B con la media más baja (0,01995 mg/L), diferenciándose de 60 y 90 min (grupo A). Así, 15 g/L es la mejor dosis global promediada, pero la combinación 10 g/L–30 min constituye el óptimo puntual, con la mayor remoción y el menor consumo de material [8], [12].

TABLA VI
PRUEBA DE TUKEY (95 %) PARA LA DOSIS

Dosis (g/L)	N	Media (mg/L)	Agrup.
1	6	0,03602	A
5	6	0,02383	B
10	6	0,01970	B
15	6	0,01486	C

Nota. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

TABLA VII
PRUEBA DE TUKEY (95 %) PARA EL TIEMPO DE CONTACTO

Tiempo (min)	N	Media (mg/L)	Agrup.
90	8	0,02676	A
60	8	0,02409	A
30	8	0,01995	B

Nota. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

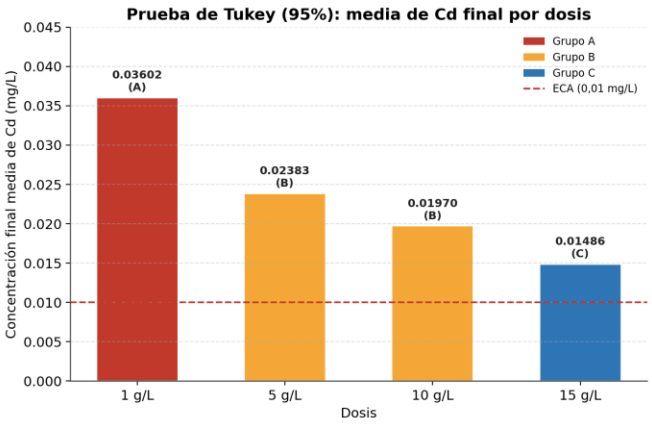


Fig. 4 Prueba de Tukey (95 %) para la media de concentración final de cadmio por dosis.

Fuente: elaboración propia.

IV. Conclusiones

El agua de la acequia Cois presentó una concentración inicial de cadmio de 0,046 mg/L, que excede en más de cuatro veces el límite de 0,01 mg/L del ECA-Agua (Categoría 3-D1), confirmando que no es apta para riego agrícola. Los parámetros fisicoquímicos (pH 7,38–7,44; conductividad 812–826 µS/cm; ORP 188–196 mV) fueron compatibles con la bioadsorción al mantener el cadmio en su forma iónica divalente.

Se elaboró satisfactoriamente la harina de semilla de Moringa oleífera mediante limpieza, secado a 65 °C, descascarado y molienda. El análisis proximal verificó una humedad de 5,3 % y la caracterización por FTIR-ATR reconoció grupos funcionales activos N-H (3300 cm^{-1}), O-H (3288 cm^{-1}), C-H (2925 cm^{-1}), C=O (1647 cm^{-1}), N-H de amida (1539 cm^{-1}) y C-O (1055 cm^{-1}), lo que ratifica la integridad de sus sitios quelantes.

La condición óptima de bioadsorción fue 10 g/L de harina con 30 min de contacto, alcanzando una eficiencia de remoción promedio de 83,4 % y una concentración final de 0,00764 mg/L, por debajo del límite ECA. El ANOVA factorial confirmó efectos significativos de la dosis ($p < 0,001$), el tiempo ($p = 0,031$) y su interacción ($p = 0,019$), con $R^2 = 89,96$ %. La harina de semilla de Moringa oleífera constituye, por tanto, un bioadsorbente eficaz, económico y sostenible para la remoción de cadmio en cuerpos hídricos de la región Lambayeque.

Referencias

[1] O. Biedunkova y P. Kuznietsov, «Dataset on heavy metal pollution assessment in freshwater ecosystems», *Sci Data*, vol. 11, n.º 1, p. 1241, nov. 2024, doi: 10.1038/s41597-024-04116-z.

[2] M. Peana *et al.*, «Biological Effects of Human Exposure to Environmental Cadmium», *Biomolecules*, vol. 13, n.º 1, p. 36, dic. 2022, doi: 10.3390/biom13010036.

[3] S. Das, I. Kar, y A. K. Patra, «Cadmium induced bioaccumulation, histopathology, gene regulation in fish and its amelioration – A review», *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, vol. 79, p. 127202, sep. 2023, doi: 10.1016/j.jtemb.2023.127202.

[4] ONU-Agua, «Resumen actualizado de 2021 sobre los progresos en el ODS 6: agua y saneamiento para todos», ONU-Agua, Ginebra, Suiza, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.unwater.org/publication_categories/sdg6-progress-reports/

[5] O. R. Umeh, E. M. Ibo, C. I. Eke, H. C. Afeku-Amenyo, y D. U. Ophori, «A review of the sidelined pollutant: Reviving the fight against heavy metal contamination in an era of emerging contaminants», *Toxicology Reports*, vol. 15, p. 102073, dic. 2025, doi: 10.1016/j.toxrep.2025.102073.

[6] Y. Lee, C. Lee, K. J. Min, y S. Park, «Efficient cadmium removal from industrial wastewater generated from smelter using chemical precipitation and oxidation assistance», *Water Environment Research*, vol. 96, n.º 6, p. e11059, jun. 2024, doi: 10.1002/wer.11059.

[7] J. P. Farias *et al.*, «Cadmium Contamination in Aquatic Environments: Detoxification Mechanisms and Phytoremediation Approach», *Sustainability*, vol. 16, n.º 22, p. 10072, nov. 2024, doi: 10.3390/su162210072.

[8] S. Xie, «Biosorption of heavy metal ions from contaminated wastewater: an eco-friendly approach», *Green Chemistry Letters and Reviews*, vol. 17, n.º 1, p. 2357213, dic. 2024, doi: 10.1080/17518253.2024.2357213.

[9] L. Zapién Serrano, N. Ortiz Lara, R. Ríos Vera, y D. Cholico-González, «Removal of Fe(III), Cd(II), and Zn(II) as Hydroxides by Precipitation–Flotation System», *Sustainability*, vol. 13, n.º 21, p. 11913, oct. 2021, doi: 10.3390/su132111913.

[10] D. Simón, C. Palet, y A. Cristóbal, «Cadmium Removal by Adsorption on Biochars Derived from Wood Industry and Craft Beer Production Wastes», *Water*, vol. 16, n.º 13, p. 1905, jul. 2024, doi: 10.3390/w16131905.

[11] D. Piwowarska, E. Kiedrzyńska, y K. Jaszczyszyn, «A global perspective on the nature and fate of heavy metals polluting water ecosystems, and their impact and remediation», *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 54, n.º 19, pp. 1436-1458, oct. 2024, doi: 10.1080/10643389.2024.2317112.

[12] N. H. A. Hamid *et al.*, «A state-of-art review on the sustainable technologies for cadmium removal from wastewater», *Water Reuse*, vol. 14, n.º 3, pp. 312-341, sep. 2024, doi: 10.2166/wrd.2024.143.

[13] V. U. Nwagbara, K. Chigayo, W. A. Iyama, y H. M. Kwaambwa, «Removal of lead, cadmium, and copper from water using *Moringa oleifera* seed biomass», *Journal of Water and Climate Change*, vol. 13, n.º 7, pp. 2747-2760, jul. 2022, doi: 10.2166/wcc.2022.091.

[14] A. Benettayeb, M. Usman, C. C. Tinashe, T. Adam, y B. Haddou, «A critical review with emphasis on recent pieces of evidence of Moringa oleifera biosorption in water and wastewater treatment», *Environ Sci Pollut Res*, vol. 29, n.º 32, pp. 48185-48209, jul. 2022, doi: 10.1007/s11356-022-19938-w.

[15] M. A. Ngounouno, L. L. M. Ngueyep, S. T. Kingni, S. N. Nforsoh, y I. Ngounouno, «Evaluation of the impact of gold mining activities on the waters and sediments of Lom River, Wakaso, Cameroon and the restorative effect of Moringa Oleifera seeds», *Appl Water Sci*, vol. 11, n.º 7, p. 113, jul. 2021, doi: 10.1007/s13201-021-01445-x.

[16] V. D. Nguyen, M. T. Nguyen, y A.-T. Vu, «Production of green biosorbent from chemically modified moringa leaves for enhanced removal of heavy metal in aqueous environment», *Biomass Conv. Bioref.*, vol. 15, n.º 9, pp. 13933-13953, may 2025, doi: 10.1007/s13399-024-06164-2.

[17] Rajeswari. M *et al.*, «Modelling and efficiency assessment of the up flow fixed bed process packed with Moringa oleifera for continuous Cd(II) removal from drinking water», *Journal of Molecular Structure*, vol. 1236, p. 130328, jul. 2021, doi: 10.1016/j.molstruc.2021.130328.

[18] M. C. Tarazona García, «Eficacia de biofiltros utilizando moringa (Moringa oleífera) y cáscara de plátano (Musa balbisiana) en la captura de metales pesados del río Higueras – Huánuco 2023», Universidad de Huánuco, Huánuco, 2024. [En línea]. Disponible en: http://repositorio.udh.edu.pe/handle/123456789/2949

[19] S. M. Malo Méndez y O. Aduvire Pataca, «Contaminación hídrica por metales pesados en la cuenca alta del río Moche debido a pasivos ambientales mineros y propuesta de remediación», *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, vol. 27, n.º 54, p. 7, 2024, doi: 10.15381/iigeo.v27i54.28328.

[20] Ministerio del Ambiente (MINAM), «Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM que aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establece disposiciones complementarias», El Peruano, Lima, 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf

[21] World Health Organization, Ed., *Guidelines for drinking-water quality*, Fourth edition incorporating the first and Second addenda. Geneva: World Health Organization, 2022.

[22] G. L. Vasquez-Ramirez, «El desarrollo potencial de proyectos en infraestructura natural para la seguridad hídrica», *S. Sust*, pp. e097-e097, 2024, doi: 10.21142/SS-0501-2024-e097.
[23] Ministerio del Ambiente (MINAM), «Gestión sostenible del agua», Gobierno del Perú, Lima, 2020. [En línea]. Disponible en: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2679238/Gesti%C3%B3n%20sostenible%20del%20agua.pdf
[24] B. M. Romero Guzmán, «Impactos Ambientales Significativos Generados por las Acequias Cois, Pulen y Yortuque de la Ciudad de Chiclayo y Propuesta de un Plan de Mitigación», oct. 2017, Accedido: 20 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/1246
[25] «Gore». Accedido: 10 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.regionlambayeque.gob.pe/web/noticia/detalle/34595?pass=MTA2MQ==
[26] A. Alghamdi, K. P. Rajan, y S. P. Thomas, «Comprehensive evaluation of Moringa oleifera seed as a low-cost adsorbent for removal of manganese (Mn) from aqueous solutions», *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 9, p. 100635, jun. 2024, doi: 10.1016/j.cscee.2024.100635.
[27] A. Karim, Z. Raji, A. Karam, y S. Khalloufi, «Valorization of Fibrous Plant-Based Food Waste as Biosorbents for Remediation of Heavy Metals from Wastewater—A Review», *Molecules*, vol. 28, n.º 10, p. 4205, may 2023, doi: 10.3390/molecules28104205.
[28] K. H. D. Tang, «Valorization of organic waste as biosorbents for wastewater treatment», *Water Emerg Contam Nanoplastics*, vol. 3, n.º 4, dic. 2024, doi: 10.20517/wecn.2024.53.
[29] E. O. Hamed y N. Kh. H. Elbarbary, «Chitosan and Moringa Oleifera Seeds Controlling Heavy Metal Residues in Water and Fish Meat», *Egypt. J. of Aquatic Biolo. and Fish.*, vol. 27, n.º 4, pp. 63-75, jul. 2023, doi: 10.21608/ejabf.2023.307321.
[30] J. Bustamante Santisteban, «Eficiencia de Trichoderma en la remoción de cadmio y plomo en lodos de la acequia Cois - Chiclayo», Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, 2025. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/14135
[31] A. Aslam, F. Kanwal, S. Javied, N. Nisar, y A. A. J. Torriero, «Microbial biosorption: a sustainable approach for metal removal and environmental remediation», *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 22, n.º 13, pp. 13245-13276, sep. 2025, doi: 10.1007/s13762-025-06611-1.
[32] G. E. Hegazy, N. A. Soliman, M. E. Ossman, Y. R. Abdel-Fattah, y M. N. Moawad, «Isotherm and kinetic studies of cadmium biosorption and its adsorption behaviour in multi-metals solution using dead and immobilized archaeal cells», *Sci Rep*, vol. 13, n.º 1, p. 2550, feb. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-29456-5.
[33] I. Quaicoe, N. A. Lasidzi, L. K. Amartey, M. Bonsu, y S. Quaicoe, «Application of *Cassia fistula* Seed Extract as a Natural Coagulant for Small-Scale Gold Mining Effluent Treatment», *GEP*, vol. 13, n.º 07, pp. 29-45, 2025, doi: 10.4236/gep.2025.137002.
[34] S. V. Morquencho Apolo, «Producción de hidrocarbon de semilla de Moringa oleifera modificada con ácido cítrico para la adsorción de metales pesados presentes en aguas del Río Tumbes», Universidad Nacional de Tumbes, Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Medio Ambiente, Tumbes, Perú, 2023. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.untumbes.edu.pe/handle/123456789/1217
[35] D. Ferraz y A. Pyka, «Circular economy, bioeconomy, and sustainable development goals: a systematic literature review», *Environ Sci Pollut Res*, sep. 2023, doi: 10.1007/s11356-023-29632-0.
[36] Y. Yang, M. F. Hassan, W. Ali, H. Zou, Z. Liu, y Y. Ma, «Effects of Cadmium Pollution on Human Health: A Narrative Review», *Atmosphere*, vol. 16, n.º 2, p. 225, feb. 2025, doi: 10.3390/atmos16020225.
[37] H. Perumalsamy *et al.*, «A comprehensive review on Moringa oleifera nanoparticles: importance of polyphenols in nanoparticle synthesis, nanoparticle efficacy and their applications», *J Nanobiotechnol*, vol. 22, n.º 1, p. 71, feb. 2024, doi: 10.1186/s12951-024-02332-8.
[38] OECD y Eurostat, «Oslo Manual 2018: Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation, 4th Edition», *The Measurement of Scientific, Technological and Innovation Activities*, vol. 2018, oct. 2018, doi: 10.1787/9789264304604-en.
[39] A. M. Elgarahy, K. Z. Elwakeel, S. H. Mohammad, y G. A. Elshoubaky, «A critical review of biosorption of dyes, heavy metals and metalloids from wastewater as an efficient and green process», *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 4, p. 100209, oct. 2021, doi: 10.1016/j.clet.2021.100209.
[40] D. I. Fertu, L. Bulgariu, y M. Gavrilescu, «Modeling and Optimization of Heavy Metals Biosorption by Low-Cost Sorbents Using Response Surface Methodology», *Processes*, vol. 10, n.º 3, p. 523, mar. 2022, doi: 10.3390/pr10030523.
[41] W. M. Hoyos-Alayo y J. L. Leiva-Piedra, «Comparative evaluation of an organic and an inorganic coagulant in the clarification of vinasse: dose optimization for BOD5 and turbidity reduction», *Rev. Interdiscip. Cienc. Aplicada.*, vol. 10, n.º 15, 2026, doi: 10.18226/25253824.v10.n15.04.
[42] W. M. Hoyos-Alayo, J. L. Leiva-Piedra, J. L. Amaro-Mellado, y E. Ramirez-Juidias, «Comparative evaluation of Citrus aurantifolia and Passiflora edulis peel flours as bioadsorbents for arsenic removal from drinking water», *Rev. Bras. Meio. Ambient.*, vol. 14, n.º 1, pp. 58-83, 2026, doi: 10.66205/rvbma.v14i1.1980.
[43] W. M. Hoyos-Alayo, J. E. Vélez-Verona, A. C. Pérez-Sandoval, y A. L. Yenque-Aguilar, «Comparative Effectiveness of Emerging and Conventional Technologies for Arsenic Removal in Drinking Water: A Systematic Review (2015–2025)», en *Proc. LACCEI int. multi-conf. eng. educ. technol.*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2025. doi: 10.18687/LEIRD2025.1.1.216.
[44] A. N. del A. D. de G. de C. de los R. Hídricos, «Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales», *Autoridad Nacional del Agua*, mar. 2016, Accedido: 13 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/209
[45] H. D. O. Gomes, P. D. T. C. Freire, R. F. Do Nascimento, y R. N. Pereira Teixeira, «Removal of contaminants from water using Moringa oleifera Lam. as biosorbent: An overview of the last decade», *Journal of Water Process Engineering*, vol. 46, p. 102576, abr. 2022, doi: 10.1016/j.jwpe.2022.102576.
[46] A. Jaafar *et al.*, «Optimization of cadmium ions biosorption by fish scale from aqueous solutions using factorial design analysis and Monte Carlo simulation studies», *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, n.º 1, p. 104727, feb. 2021, doi: 10.1016/j.jece.2020.104727.
[47] I. Hegazy, M. E. A. Ali, E. H. Zaghlool, y R. Elsheikh, «Heavy metals adsorption from contaminated water using moringa seeds/ olive pomace byproducts», *Appl Water Sci*, vol. 11, n.º 6, p. 95, jun. 2021, doi: 10.1007/s13201-021-01421-5.
[48] C. E. Agbangba, E. Sacla Aide, H. Honfo, y R. Glèlè Kakai, «On the use of post-hoc tests in environmental and biological sciences: A critical review», *Heliyon*, vol. 10, n.º 3, p. e25131, feb. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e25131.
[49] W. Jing *et al.*, «Simultaneous Adsorption of Cu2+ and Cd2+ by a Simple Synthesis of Environmentally Friendly Bamboo Pulp Aerogels: Adsorption Properties and Mechanisms», *Polymers (Basel)*, vol. 14, n.º 22, p. 4909, nov. 2022, doi: 10.3390/polym14224909.
[50] «Universidad César Vallejo». Accedido: 19 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.ucv.edu.pe/
[51] H. R. Gonzales Villanueva, «Análisis de la capacidad de remoción de metales mediante residuos sólidos y moringa oleifera para el tratamiento de agua contaminada en el río Tambo, sector distrito de Omate, Arequipa, 2022», *Analysis of the metal removal capacity of solid waste and moringa oleifera for the treatment of contaminated water in the Tambo River, Omate district sector, Arequipa, 2022*, 2025, Accedido: 12 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/17448
[52] A. Loayza Gama, «Eficiencia de Moringa oleífera Lam. como coagulante natural en la remoción de turbidez en la planta de tratamiento de aguas residuales de Punta de Bombón - Arequipa, 2024», *Efficiency of Moringa oleifera Lam. as a natural coagulant in turbidity removal at the Punta de Bombón wastewater treatment plant - Arequipa, 2024*, 2025, Accedido: 12 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/17649
[53] J. A. Arellano Flores y M. M. Rojas Valuis, «Remoción de plomo en el Río Santa, tramo Recuay – Ticapampa,mediante biofiltro con polvo de Semilla de Moringa – Ancash, 2021», *Repositorio Institucional - UCV*, 2021, Accedido: 12 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/72550
[54] C. Castro y H. Santiago, «EFECTO COAGULANTE DE LA SEMILLA DE MORINGA (Moringa oleífera) PARA CLARIFICAR AGUA DEL CANAL MONSEFÚ, CENTRO POBLADO CALLANCA, DISTRITO MONSEFÚ, 2019», *Universidad de Lambayeque*, feb. 2020, Accedido: 22

de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/6500324

[55] W. Manuel Hoyos Alayo y S. Lourdes Vidal Taboada, «Adsorption as a predominant technology for industrial wastewater treatment: a systematic review», en *Proc. LACCEI int. multi-conf. eng. educ. technol.*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2025. doi: 10.18687/LACCEI2025.1.1.281.

[56] W. Manuel Hoyos Alayo, «Bioadsorption of arsenic by fruit residues: A systematic review», en *Proc. LACCEI int. multi-conf. eng. educ. technol.*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2025. doi: 10.18687/LACCEI2025.1.1.589.

[57] W. Manuel Hoyos Alayo y J. Luis Leiva Piedra, «Emerging technologies in industrial wastewater treatment: a systematic review», en *Proc. LACCEI int. multi-conf. eng. educ. technol.*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2025. doi: 10.18687/LACCEI2025.1.1.278.

[58] W. M. Hoyos-Alayo, «Frugal Innovation in Industrial Water Treatment Processes in Emerging Economies (2015–2025): A Systematic Review.», en *Proc. LACCEI int. multi-conf. eng. educ. technol.*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2025. doi: 10.18687/LEIRD2025.1.1.140.

[59] J. N. Hinostroza Tejeda, «Evaluación del rendimiento de remoción de nitrato en aguas superficiales mediante el uso de semilla de moringa (Moringa oleifera Lam) como bioadsorbente en la cuenca baja del río Chillón - distrito Puente Piedra, 2023». [En línea]. Disponible en: https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/36837/Hinostroza%20Tejeda%2c%20Junior%20Nicolas%20-%20Junco%20Palomino%2c%20Fiorella%20Rosmery.pdf?sequence=1&isAllowed=y