







Bioadsorción del ion cobre (II) en solución acuosa mediante el uso de vaina de arveja (*Pisum sativum* L.)

Biosorption of copper (II) ion in aqueous solution using pea pods (*Pisum sativum* L.)

Yessenia Velasquez Zúñiga^{1,*} , Javier Mamani Paredes¹ , Wilson Calsin Berrios²  y
Carmen Villanueva Quispe³ 

¹Universidad Nacional del Altiplano, Puno-Perú, Correo: vzy.4234@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5006-5991>, Correo: javierparedes@unap.edu.pe, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4375-3892>

²Universidad Nacional de Juliaca, Puno-Perú, Correo: wilsoncalsinberrios@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2820-9290>

³Instituto del Mar del Perú – IMARPE Puno-Perú, Correo: Cvillanueva@imarpe.gob.pe, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6768-4836>

Resumen

La evaluación de la bioadsorción del ion cobre (II) en solución acuosa mediante el uso de la vaina de arveja (*Pisum sativum* L.), un residuo agroindustrial abundante y económico. El objetivo fue determinar la capacidad de bioadsorción del ion cobre (II) en solución acuosa mediante el uso de la vaina de arveja (*Pisum sativum* L.). La metodología es cuantitativa, experimental y nivel aplicativo. Se caracterizó la biomasa en términos de humedad, cenizas, extracto etéreo, fibra cruda, densidad aparente y pH; la vaina de arveja fue sometida a un tratamiento físico y químico que incluye una activación ácida con HCl y alcalina con NaOH; en las pruebas de bioadsorción se aplicó un diseño experimental de segundo orden, variando la cantidad de adsorbente, pH y temperatura; se evaluó las isotermas y modelos cinéticos de adsorción. La caracterización de la vaina de arveja presentó un alto contenido de fibra de 51,94 % y un pH ácido de 4,7 en la vaina de arveja; se consiguió mejores resultados con la activación alcalina de NaOH 0.1 M; los parámetros adecuados obtenidos en las pruebas de bioadsorción son 0,1 g de adsorbente, pH de 5,5 y temperatura 25 °C; el proceso se ajustó a la isoterma de Langmuir con una capacidad máxima de adsorción de 45,45 mg/g, indicando una adsorción en monocapa sobre una superficie homogénea. La cinética de adsorción fue descrita por el modelo de pseudo segundo orden. Se concluye que la vaina de arveja activada con NaOH, tiene alta capacidad de bioadsorción del cobre (II) en aguas contaminadas.

Palabras clave: bioadsorción, cobre (II), isoterma de Langmuir, modelo cinético de pseudo segundo orden, vaina de arveja.

Abstract

The evaluation of the bioadsorption of the copper (II) ion in aqueous solution by using the pea pod (*Pisum sativum* L.), an abundant and economical agro-industrial residue. The objective was to determine the bioadsorption capacity of the Cu (II) ion in aqueous solution by using the pea pod (*Pisum sativum* L.). The methodology is quantitative, experimental and application-level. Biomass was characterized in terms of moisture, ash, ethereal extract, crude fiber, bulk density, and pH; the pea pod was subjected to a physical and chemical treatment that includes an acid activation with HCl and alkaline with NaOH; in the bioadsorption tests, a second-order experimental design was applied, varying the amount of adsorbent, pH and temperature; Isotherms and kinetic adsorption models were evaluated. The characterization of the pea pod showed a high fiber content of 51.94 % and an acidic pH of 4.7 in the pea pod; better results were achieved with alkaline activation of 0.1 M NaOH; the appropriate parameters obtained in the bioadsorption tests are 0.1 g of adsorbent, pH of 5.5 and temperature 25 °C; the process was adjusted to the Langmuir isotherm with a maximum adsorption capacity of 45.45 mg/g, indicating a monolayer adsorption on a homogeneous surface. Adsorption kinetics were described by the pseudo-second-order model. It is concluded that the pea pod activated with NaOH has a high capacity for bioadsorption of copper (II) in contaminated waters.

Key words: bioadsorption, copper (II), Langmuir isotherm, pseudo second order kinetic model, pea pod.

Recibido: 04/08/2025

Aceptado: 05/09/2025

Publicado: 30/09/2025

***Autor para correspondencia:** vzy.4234@gmail.com

Cómo citar: Velasquez Zúñiga, Y., Mamani Paredes, J., Calsin Berrios, W., & Villanueva Quispe, C. (2025). Bioadsorción del Ion Cobre (II) en solución acuosa mediante el uso de vaina de arveja (*Pisum sativum* L.). *Revista De Investigaciones*, 14(3) 144-156. <https://doi.org/10.26788/ri.v14i3.7041>

Introducción

Actualmente, en el departamento de Puno, Perú, se desarrolla una intensa actividad minera (Raji et al., 2023). Como consecuencia, las aguas residuales generadas son descargadas en el río Llallimayo, las cuales presentan altas concentraciones de metales pesados, entre ellos el cobre (ANA, 2025). Asimismo, en esta región el destino final de las aguas contaminadas es la bahía del lago Titicaca (Maldonado et al., 2023; Meftah et al., 2025).

El cobre resulta altamente tóxico para los organismos acuáticos, incluso a bajas concentraciones (Akaangee Pam et al., 2023); cuando su concentración en el agua potable supera los 4 mg/L, puede provocar náuseas, dolor abdominal, vómitos y diarrea en los seres humanos (Mohammad et al., 2024). Además, una vez que el cobre ingresa al organismo, tiende a acumularse en el hígado, generando daños hepáticos característicos de la enfermedad de Wilson (Dev et al., 2022).

Ante este contexto, se hace necesario implementar tecnologías sostenibles que permitan la remoción eficiente del cobre (Aguiar et al., 2022); si bien los métodos tradicionales, como la precipitación química o el intercambio iónico, han sido ampliamente utilizados, presentan altos costos operativos y generan residuos secundarios (Elewa et al., 2023). En contraste, la bioadsorción se destaca como una alternativa eficiente, económica y ecológica (Darweesh et al., 2022).

Esta técnica emplea biomateriales de origen vegetal capaces de retener metales pesados como el cobre (Eleryan et al., 2024). Entre ellos destacan residuos como el bagazo de palma, la cáscara de naranja y la vaina de arveja (Herrera et al., 2020; Medhi et al., 2020), los cuales se caracterizan por su alto contenido de fibra (Wu et al., 2025); dichos materiales presentan grupos funcionales (hidroxilo, carboxilo y carbonilo) que incrementan su capacidad de adsorción (Ndekei et al., 2021; Mohammed et al., 2025).

En este sentido, un residuo agrícola de gran relevancia es la vaina de arveja (*Pisum sativum* L.), que posee un alto contenido de fibra (Galvis et al., 2024; El-Nemr et al., 2022) y ofrece ventajas

significativas frente a otros biomateriales, debido a su alta capacidad de adsorción, bajo costo, gran disponibilidad estacional y facilidad de modificación química para mejorar su rendimiento (El-Nemr et al., 2022). En el Perú, solo en el año 2021, se produjeron aproximadamente 51 840 toneladas de granos de arveja, lo que implica una gran cantidad de residuos de vainas potencialmente aprovechable (MIDAGRI, 2021).

Por otro lado, la activación química, ya sea ácida o alcalina, incrementa la capacidad adsorbente de estos biomateriales, al promover la solubilización de hemicelulosas y el aumento de lignina en la estructura vegetal (Eleryan et al., 2024; Adegoke et al., 2023; Da Costa et al., 2024). Seguidamente, para optimizar el proceso de bioadsorción, se aplican diseños experimentales de segundo orden, como el central compuesto ortogonal, que permiten determinar las condiciones óptimas de cantidad de adsorbente, pH y temperatura (Montgomery, 2020; Fertu et al., 2022; Tenza et al., 2025; Kuśmierk et al., 2025).

De manera complementaria, la evaluación del proceso se realiza mediante modelos isotérmicos y cinéticos. En este sentido, la isoterma de Langmuir describe la adsorción en monocapa, indicando una cobertura uniforme del metal sobre la superficie del adsorbente (Ndekei et al., 2021; Darweesh et al., 2022; Mozaffari et al., 2022; Ivanchenko et al., 2025). Por su parte, el modelo de pseudo segundo orden sugiere un proceso de quimisorción, lo cual implica la existencia de interacciones químicas entre el adsorbato y el adsorbente (Aguiar et al., 2022; Darweesh et al., 2022; Ciobanu et al., 2023; Aita et al., 2025).

En este marco, el objetivo general del estudio es determinar la capacidad de bioadsorción del ion cobre (II) en solución acuosa mediante el uso de la vaina de arveja (*Pisum sativum* L.). Para lograrlo, se plantean los siguientes objetivos específicos: realizar la caracterización fisicoquímica de la vaina de arveja, evaluar las variables que influyen significativamente en el proceso de bioadsorción y determinar la isoterma y el modelo cinético que describan de manera más precisa el comportamiento de adsorción del ion cobre (II) en solución acuosa utilizando este biomaterial.

Métodos

Ámbito o lugar de estudio

La ejecución de la investigación se realizó en el Megalaboratorio del Vicerrectorado de Investigación de la UNA – PUNO, a condiciones ambientales de 487 mm de Hg de presión, altitud de 3832 m.s.n.m y temperatura de 14 °C, durante los meses de octubre a diciembre del 2024.

Descripción de métodos

Tabla 1

Caracterización de la vaina de arveja

Parámetro	Método de Análisis	Autor
Humedad (%)	Secado en estufa a 103 ± 2 °C hasta peso constante. NTP 251.010 (Método A)	(Galvis et al., 2024)
Ceniza (%)	Calcinación en mufla (600°C). EN 14775 / ASTM D7582	(Gutiérrez et al., 2025)
Extracto etéreo (%)	Extracción Soxhlet durante 4 horas. Adaptación de método Soxhlet (no NTP formal)	(Bontzolis et al., 2024)
Fibra cruda (%)	Digestión ácidaalcalina (AOAC/ISO)	(Wu et al., 2025)
Densidad (g/mL)	Pesaje volumétrico de muestra. UNEEN 15103 / ISO 172252	(Bontzolis et al., 2024)
pH	Medición con pHmetro. Basado en protocolos tipo EPA 9045 D	(Galvis et al., 2024)

Tratamientos de la vaina de arveja.

Se desarrollaron con 2 tratamientos, físicos y químicos.

Tratamiento físico. Se siguió las operaciones de selección, lavado, filtrado, secado, molienda y tamizado (Adegoke et al., 2023).

Tratamiento químico. La biomasa de vaina de arveja obtenida del tratamiento anterior se dividió en 2 partes: la primera se activó con HCl (grado analítico, Merck) al 0,1 M y la segunda se activó con NaOH (grado analítico, Merck) al 0,1 M, en ambas muestras se realizaron las operaciones de decantado, lavado, filtrado y secado (Eleryan et al., 2024).

Preparación de solución patrón de Cu²⁺

Se pesó 3,8009 g de Cu (NO₃)₂·3H₂O (grado analítico, Aldrich) y se disolvió en agua bidestilada hasta aforo de 1 litro, esta solución tuvo una

La presente investigación es cuantitativa, de tipo experimental y es de nivel aplicativo.

Caracterización de la vaina de arveja (*Pisum sativum* L.)

La materia prima empleada fue 1 Kg de vaina de arveja (*Pisum sativum* L.), de la variedad Alderman, procedente de Tiabaya, Arequipa y adquirida en la Ciudad Juliaca del departamento de Puno. Se presentan los métodos de análisis para la caracterización de la vaina de arveja (Tabla 1).

concentración de 1000 mg/L de Cu²⁺. Luego se tomó de esta solución 100 mL y se disolvió hasta volumen de 1000 mL. Esta nueva solución tuvo una concentración de 100 mg/L de Cu (II) (Isaac & Siddiqui, 2022).

Procedimiento para las pruebas de bioadsorción del Cu²⁺

Se realizaron 2 experimentos: en el primer ensayo se midió 50 mL de solución de Cu (II) de 100 mg/L y se añadió 0,08 g de biomasa activada con HCl 0,1 M; lo mismo se realizó en el segundo ensayo con la diferencia que se colocó 0,08 g de biomasa activada con NaOH 0,1 M, ambos ensayos se agitaron a 120 rpm durante 40 minutos (Eleryan et al., 2024).

Seguidamente el contenido de los matraces fue filtrado y se analizó la concentración final de Cu (II) por la técnica de titulación complejo métrica EDTA descrita por (Doble et al., 2024). La capacidad de adsorción (q) se calculó aplicando la siguiente ecuación (Tenza et al., 2025).

$$q = \frac{V * (C_i - C_f)}{W} \quad (1)$$

Donde: q es la capacidad del proceso de adsorción (mg/g), C_i y C_f es la concentración inicial y final del metal contaminante en la solución (mg/L), V es el volumen de la solución (L) y W es la cantidad del adsorbente utilizada (g) (Tenza et al., 2025). En el cálculo del porcentaje de adsorción de Cu (II) se empleó la siguiente ecuación (Shamohammadi et al., 2022).

$$\%A = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} * 100 \quad (2)$$

Evaluación de las variables más influyentes

Para la evaluación se realizaron 17 ensayos en un diseño experimental central compuesto ortogonal, se incluyó como variables independientes, W : cantidad de adsorbente (g), pH y T : temperatura ($^{\circ}\text{C}$); este tipo de diseño requiere de cinco niveles por cada factor, codificados como $-\alpha$, -1 , 0 , $+1$ y $+\alpha$, siendo los valores de los puntos axiales $-1,4$ y $1,4$, dado que se trabajó con tres factores (Li et al., 2024).

Determinación de los parámetros y rangos

La variable dependiente es:

Y : Capacidad de adsorción de Cu (II), mg/g

Para llevar a cabo los ensayos experimentales, se colocó en 17 matraces Erlenmeyer un mismo volumen de 50 mL de una solución de Cu (II) con una concentración de 100 mg/L. Se incorporaron diferentes cantidades de adsorbente entre 0,08 y 0,12 g; ajustando el pH a valores de 4 a 6 mediante soluciones de HCl y NaOH al 0,1 M. Las pruebas se realizaron a temperaturas entre 15 y 35 $^{\circ}\text{C}$ (Tabla 2).

Tabla 2

Variables independientes de estudio

Variables Independientes	Niveles				
	$-\alpha$	-1	0	$+1$	$+\alpha$
X_1 : W (g)	0,07	0,08	0,1	0,12	0,13
X_2 : pH	3,65	4	5	6	6,35
X_3 : T ($^{\circ}\text{C}$)	11,47	15	25	35	38,53

La representación de la ecuación de regresión de segundo orden para la variable dependiente es descrita por Montgomery (2020)

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_1^2 + b_5X_2^2 + b_6X_3^2 + b_7X_1X_2 + b_8X_1X_3 + b_9X_2X_3 \quad (3)$$

Determinación de la isoterma y modelo cinético de adsorción

Ensayos para las Isotermas de Adsorción

Se prepararon 10 matraces Erlenmeyer, cada uno con 50 mL de solución, variando las concentraciones de Cu (NO₃)₂·3H₂O de (20, 40, 52, 60, 72, 80, 100, 120, 140 y 160 mg/L). Los ensayos se realizaron bajo las condiciones óptimas determinadas en el segundo objetivo de la cantidad de adsorbente, pH y temperatura.

Los modelos de Isotermas de Langmuir y Freundlich son ampliamente empleados para representar el equilibrio de adsorción, relacionando la cantidad del adsorbato que son los iones Cu (II) fijado por el adsorbente que es la vaina de arveja (q_e en mg/g) con la concentración del adsorbato restante en la solución acuosa (C_e en mg/L) (Mozaffari et al., 2022).

Isoterma de Langmuir. La adsorción se realiza sobre una monocapa o superficie homogénea del adsorbente (Darweesh et al., 2022a). Su ecuación es la siguiente:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max} * b} + \frac{1}{q_{max}} * C_e \quad (4)$$

Donde: C_e es la concentración del adsorbato en equilibrio (mg/L), q_e (mg/g), es la capacidad de adsorción en el equilibrio, q_{max} es la capacidad máxima de adsorción y b es la constante de Langmuir (Ivanchenko et al., 2025).

Isoterma de Freundlich. La adsorción ocurre sobre superficies heterogéneas y se demuestra con la siguiente ecuación (Ghibate et al., 2025).

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} * \log C_e \quad (5)$$

Donde, K_f constante de Freundlich y n indica la intensidad de adsorción (Ghibate et al., 2025).

Ensayos para la cinética de adsorción

Se colocaron en 10 matraces Erlenmeyer, un volumen de 50 mL, una solución de Cu (II) de 100 mg/L, y se aplicaron las condiciones óptimas previamente determinadas en el diseño experimental, variando el tiempo (5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120 minutos) con agitación de 120 rpm.

La cinética de adsorción es la velocidad en la que el ion metálico es retirado del medio acuoso y ocurre en 2 fases, la primera en forma rápida y la segunda cuando la velocidad de adsorción disminuye, debido a que los iones del adsorbato ocuparon todos los sitios activos del adsorbente (Aita et al., 2025). Seguidamente se presenta los modelos cinéticos de adsorción.

Modelo de pseudo primer orden. Este modelo indica que el ion metálico se adsorbe en un sitio activo sobre la superficie del adsorbente y su ecuación es (Kuśmierek et al., 2025):

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 * t \quad (6)$$

Donde q_t (mg/g), es la capacidad de adsorción a un tiempo t y k_1 es la constante cinética del modelo en (min^{-1}) (Kuśmierek et al., 2025).

Modelo de segundo orden. Se aplica en procesos de quimiadsorción, indica que el adsorbato se adsorbe en dos sitios activos de la biomasa (Darweesh et al., 2022):

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 * q_e^2} + \frac{1}{q_e} * t \quad (7)$$

Donde: q_t (mg/g), es la capacidad de adsorción a un tiempo t y k_2 es la constante cinética de pseudo 2do orden ($\text{g.mg}^{-1}.\text{min}^{-1}$) (Darweesh et al., 2022).

Modelo de Elovich. Indica que los sitios activos del adsorbente son heterogéneos y tienen diferentes energías de activación, su ecuación es expresada por Packiyam et al. (2025).

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln t \quad (8)$$

Donde, α es la velocidad inicial de adsorción ($\text{mg.g}^{-1}.\text{min}^{-1}$) y β tiene relación con la energía de activación por quimiadsorción (g/mg) (Packiyam et al., 2025).

Modelo de difusión intraparticular. Está basado en el transporte del adsorbato a través de la estructura interna de los poros del adsorbente y su ecuación es (Darweesh et al., 2022):

$$\% A = k_{id}(t)^a \quad (9)$$

Donde $\% A$ es el porcentaje de metal adsorbido, k_{id} es la constante de velocidad de difusión intraparticular, t es el tiempo de contacto (min) y a es el descriptor del mecanismo de adsorción (Darweesh et al., 2022b).

Modelo reversible de primer orden. Indica que la difusión de los iones metálicos en la biomasa, es a través de una película superficial y su ecuación es (Raji et al., 2023):

$$\ln(1 - \theta) = -K_e t \quad (10)$$

Donde θ es la fracción de la capacidad de adsorción (q/q_e) a un tiempo t , K_e es la constante cinética global de equilibrio (min^{-1}) (Raji et al., 2023).

Resultados y discusión

Caracterización de la vaina de arveja (*Pisum sativum* L.)

Resultados

Los resultados mostraron una humedad del 72,07 %; lo cual indico que tuvo mayor contenido de agua; se observó un menor porcentaje de ceniza 6,05 % este valor constituye el residuo inorgánico, contiene la cantidad de minerales como: calcio, fósforo, potasio, magnesio y sodio presentes en la vaina de arveja, estos minerales son los que compiten por los sitios activos de la superficie del adsorbente. El extracto etéreo fue de 7,22 % indico un menor contenido de lípidos. La fibra cruda fue mayor de 51,94% revelo que tiene un alto contenido de grupos funcionales hidroxilo, carboxilo y carbonilo que son indispensables para formar ligandos con los iones Cu^{2+} , (Tabla 3).

En el primer objetivo se encontraron los siguientes resultados de la tabla 3.

Tabla 3

Análisis fisicoquímico de la vaina de arveja

Composición	Unidades	Valores promedios
Humedad	%	72,07
Cenizas	%	6,05
Extracto etéreo	%	7,22
Fibra cruda	%	51,94
Densidad aparente	g/mL	0,46
pH	pH	4,71

Discusión

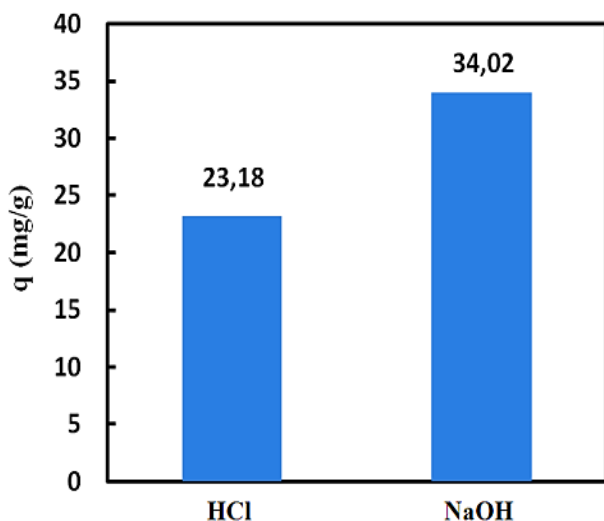
En el estudio realizado por El-Nemr et al. (2022), es favorable tener un menor porcentaje de ceniza. revelo que tiene un alto contenido de grupos funcionales hidroxilo, carboxilo y carbonilo que son indispensables para formar ligandos con los iones Cu^{2+} según lo descrito por (Mohammed et al., 2025). La densidad aparente fue de 0,46 g/mL, significa que en 1 mL están contenidos 0,46 g de vaina de arveja y el pH fue de 4,71 indico carácter ácido como los residuos vegetales como el bagazo de palma y la cascara de naranja estudiados por Herrera et al. (2020).

Resultados

Seguidamente se realizó una activación acida con HCL (0,1M) y una activación alcalina con NaOH (0,1 M) a la biomasa de la vaina de arveja (Figura 1).

Figura 1

Evaluación de la biomasa con HCL (0,1M) e NaOH (0,1M)



Discusión

Se observo que la biomasa de vaina de arveja activada con NaOH (0,1 M) alcanzó una mayor capacidad de adsorción de 34,02 mg/g en comparación con el HCL (0,1 M) de 23,18 mg/g, lo que indica que el tratamiento con NaOH (0,1 M), favoreció en la solubilización de la hemicelulosa y aumento el contenido de lignina según lo mencionado por (Da Costa et al., 2024), mejorando la capacidad de retención de metales pesados según lo descrito por Elewa et al. (2023).

Por lo tanto, en los siguientes ensayos se trabajó con la biomasa activada con NaOH (0,1 M).

Evaluación de las variables más influyentes

Resultados

En la evaluación de las variables independientes se utilizó un diseño experimental de segundo orden. Se observó que en el experimento 15 se consiguió una alta capacidad de adsorción de 38,84 mg/g con la aplicación de las variables independientes de cantidad de adsorbente de 0,1 g; pH de 5,5 y temperatura de 25 °C, estos valores se emplearon en el siguiente apartado, en el estudio de las isotermas y cinética de adsorción (Tabla 4).

Tabla 4

Valores obtenidos de la variable repuesta

N°	W (g)	pH	T (°C)	Y (mg/g)
1	0,08	4	15	24,75
2	0,12	4	15	19,91
3	0,08	6	15	33,64
4	0,12	6	15	27,86
5	0,08	4	35	21,38
6	0,12	4	35	15,79
7	0,08	6	35	29,60
8	0,12	6	35	23,48
9	0,07	5	25	31,70
10	0,13	5	25	24,57
11	0,1	3,65	25	25,01
12	0,1	6,35	25	35,96
13	0,1	5	11,47	33,30
14	0,1	5	38,53	28,08
15	0,1	5	25	38,84
16	0,1	5	25	36,52
17	0,1	5	25	38,03

Discusión

Comparando estos resultados con los obtenidos en el estudio realizado por Zhang et al. (2024), adsorbieron los iones Cu (II) con biocarbón, se encontraron parámetros adecuados de cantidad de adsorbente 0,2 g; pH 5 y temperatura de 25 °C, los cuales son similares al presente estudio.

Tabla 5
Análisis de Varianza (ANOVA)

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
A: W (g)	87,683	1	87,683	212,910	0,0000
B: pH	194,016	1	194,016	471,110	0,0000
C: T(°C)	45,256	1	45,256	109,890	0,0000
AA	189,190	1	189,190	459,400	0,0000
AB	0,270	1	0,270	0,660	0,4447
AC	0,149	1	0,149	0,360	0,5671
BB	108,813	1	108,813	264,220	0,0000
BC	0,108	1	0,108	0,260	0,6242
CC	102,849	1	102,849	249,740	0,0000
Error total	2,883	7	0,412		
Total (corr.)	731,215	16			
Datos de ANOVA					
R-cuadrada			99,606 %		
R-cuadrada (ajustada por g.l.)			99,099 %		

Discusión

Los resultados del análisis de varianza (ANOVA) evidencian que las variables cantidad de adsorbente (A), pH (B) y temperatura (C) influyen significativamente en la bioadsorción del ion Cu (II) mediante la vaina de arveja (*Pisum sativum* L.), dado que presentan valores-P menores a 0,05, lo cual indica significancia estadística al 95 % de confianza; asimismo, las interacciones cuadráticas AA, BB y CC también mostraron efectos significativos sobre la capacidad de adsorción, mientras que las interacciones AB, AC y BC no fueron estadísticamente relevantes según Kadimpati et al. (2024).

Por otro lado, los coeficientes de determinación $R^2 = 99,606 \%$ y R^2 ajustado = 99,099 % reflejan un buen ajuste del modelo, lo que sugiere que las variables independientes consideradas explican casi en su totalidad la variabilidad del proceso de bioadsorción; el error total del cuadrado medio (0,412), al ser menor que uno, confirma la consistencia y fiabilidad del modelo estadístico,

Seguidamente se realizó el análisis de varianza con el uso del paquete estadístico STATGRAPHICS Centurión XVI.I, que se adquirió como licencia de instalación académica con recursos propios de los autores, para el análisis de los resultados (Tabla 5).

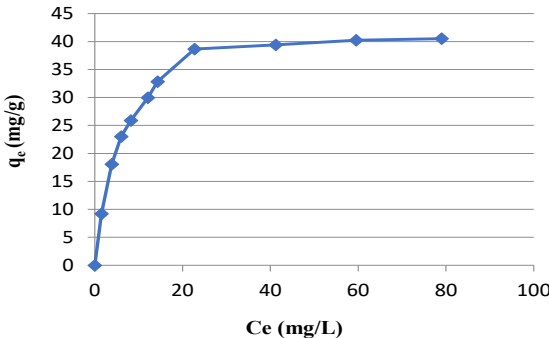
en conjunto, estos resultados concuerdan con lo señalado por Montgomery (2020), quien destaca que valores de R^2 superiores al 95 % indican un modelo predictivo robusto y adecuado para la optimización experimental.

Determinación de la isoterma y modelo cinético de adsorción

Resultados

Se observa la capacidad de adsorción (mg/g) versus la C_e (mg/L) (Figura 2).

Figura 2
Isoterma de adsorción de Cu (II)



Discusión

Se aprecia que la capacidad de adsorción aumenta en mayor grado hasta una concentración en el equilibrio $C_e = 22,72$ mg/L debido a que la vaina de arveja disponía de mayor cantidad de sitios activos para atrapar a los cationes Cu^{2+} como lo indica (Akaangee Pam et al., 2023) (Figura 3).

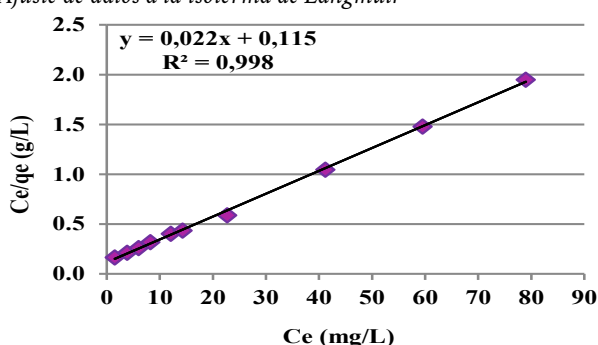
Después de esta concentración, la capacidad aumenta en menor grado, lo que indica que los sitios activos del adsorbente están ocupados por los iones Cu^{2+} como lo menciona (Burk et al., 2020). Con una concentración de equilibrio C_e de 59,54 mg/L se obtiene una capacidad de adsorción constante de 40,23 mg/g (q_e), evidenciando que se ha llegado a un estado de equilibrio entre los iones Cu^{2+} fijados en la superficie del adsorbente y aquellos iones Cu^{2+} que se encuentran disueltos en el medio acuoso según (Ciobanu et al., 2023).

Resultados

Se muestra el ajuste de los datos experimentales al modelo de Langmuir en su expresión lineal, la capacidad máxima de adsorción (q_{max}) y la constante de Langmuir (b) se determinaron del intercepto y pendiente de la gráfica de C_e/q_e versus C_e de la ecuación (4) (Figura 3).

Figura 3

Ajuste de datos a la isoterma de Langmuir



Se presentan las constantes de las isotermas se muestra que la isoterma de Langmuir presente un mejor ajuste con los datos experimentales, el valor de $q_{\text{max}} = 45,45$ mg/g representa la capacidad máxima de adsorción de Cu (II) que presenta la superficie activada del material adsorbente y el valor de $b = 0,191$ L/mg refleja el grado de afinidad del adsorbente por el adsorbato con un coeficiente

de correlación $R^2 = 0,998$, indicando que la superficie del adsorbente es uniforme (Tabla 6).

Tabla 6

Constantes de las isotermas de Langmuir y Freundlich

Isoterma	Constantes isotérmicas	R^2
Langmuir	q_m 45,45 mg/g	0,998
	b 0,191 L/mg	
Freundlich	K_f 11,04	0,863
	n 2,87	

Discusión

Para Darweesh et al. (2022), el modelo indica que la superficie y la máxima adsorción se forma en monocapa como lo describe, los iones metálicos del Cu (II) se encuentran localizados y no se mueven sobre la superficie del adsorbente según Ndekei et al. (2021).

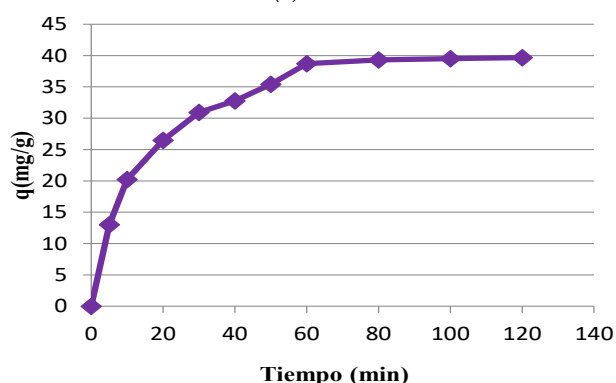
Resultados

Cinetica de adsorción

En este apartado se presenta el comportamiento de la capacidad de adsorción de Cu (II) con respecto al tiempo. Se describe la velocidad en la que son adsorbidos los iones Cu (II) por la vaina de arveja, se muestra que la velocidad de adsorción se incrementa en los primeros 60 minutos después sufre una disminución la velocidad hasta llegar a un equilibrio total a los 100 minutos (Figura 4).

Figura 4

Cinética de adsorción de Cu (II)



Discusión

Para tiempos mayores la capacidad de adsorción no se incrementa como lo describe (Zhang et al.,

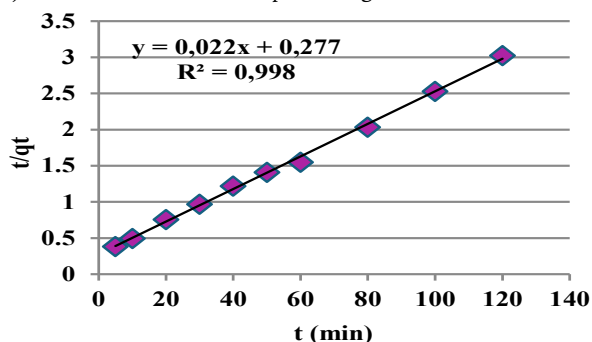
2024) y permanece constante, lo cual indica la finalización del proceso de bioadsorción de iones cobre (II) según Medhi et al. (2020).

Resultados

Se presenta a la capacidad de adsorción de Cu (II) en el equilibrio (q_e) y la constante cinética de pseudo 2do orden (k_2) se determinaron del intercepto y de la pendiente de la gráfica de t/q_t versus t de la ecuación (7). muestra el ajuste de los datos experimentales al modelo de pseudo segundo orden en su ecuación lineal (Figura 5).

Figura 5

Ajuste de datos al modelo de pseudo segundo orden.



Se muestran las constantes de los modelos cinéticos de la bioadsorción de cobre (II) con vaina de arveja. se muestra que el mayor coeficiente de correlación es para el modelo de pseudo segundo orden con un coeficiente de correlación ($R^2 = 0,998$), así mismo se muestra el valor de $q_e = 45,45$ mg/g que representa los iones Cu (II) adsorbidos por gramo de adsorbente y el valor de $k_2 = 0,002$ g/mg.min está relacionado con la velocidad total de la bioadsorción de Cu (II) por vaina de arveja (Tabla 7).

Tabla 7

Constantes de los modelos cinéticos de adsorción

Modelo cinético	Cosnstantes cinéticos	R^2
Pseudo primer orden	q_e 41,76 mg/g	0,971
	k_1 0,055 L/min	
Pseudo segundo orden	q_e 45,45 mg/g	0,998
	k_2 0,002 g/mg.min	
Elovich	α 8,81 mg/g.min	0,976
	β 0.113 g/mg	
Difusión intraparticular	k_{id} 17,458 h ⁻¹	0,935
	a 0,344	
Reversible de primer orden	K_e 0,055 min ⁻¹	0,951

Discusión

Se demuestra un proceso de quimiosorción homogénea, significa que los iones Cu (II) se adsorbieron en dos sitios activos disponibles sobre la superficie homogénea de la vaina de arveja como lo describe Darweesh et al. (2022), lo cual coincide con el estudio de otras biomásas vegetales que adsorbieron los iones cobre (II) según Jiang et al. (2022) y Ciobanu et al. (2023). Se observó que el segundo coeficiente de correlación significativo es para el modelo de Elovich con un $R^2 = 0,976$ indicando que también se presentó interacciones químicas entre los iones cobre (II) con una superficie heterogénea en la vaina de arveja como lo describe Packiyam et al. (2025).

Conclusiones

En la caracterización de la vaina de arveja se determinaron sus propiedades fisicoquímicas encontrando un alto contenido de fibra cruda de 51,94 %; lo cual significa que en su pared celular presenta grupos funcionales que le permiten formar ligandos con los iones cobre (II). El pH fue de 4,71 indicando que la vaina de arveja presento carácter ácido, por lo que es adecuado una activación alcalina como el NaOH.

En la evaluación de las variables más influyentes, se obtuvieron condiciones favorables empleando una cantidad de adsorbente de 0,1 g; un pH de 5,5 y una temperatura de 25 °C, lo cual significa que no se requiere de cantidades elevadas del adsorbente vaina de arveja para remover los iones cobre (II) en un medio acuoso ligeramente ácido como las muestras de agua de mina y no se requiere la aplicación de temperaturas elevadas.

La Isoterma de Langmuir se ajustó adecuadamente a los datos, con una capacidad máxima de adsorción de 45,45 mg/g, indicando una bioadsorción en monocapa sobre una superficie uniforme del adsorbente vaina de arveja. En la cinética, el modelo de pseudo segundo orden describió mejor la velocidad del proceso bioadsorción de los iones Cu (II) en un tiempo no muy prolongado de 60 minutos.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses en relación con este trabajo.

Agradecimientos

Agradecemos de forma muy especial al programa de Doctorado de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Altiplano.

Contribución del autores

Conceptualización: Velasquez Zúñiga Y. (60%), Mamani Paredes J. (15%), Calsin Berrios W. (15%), Villanueva Quispe C. (10%); *Metodología:* Velasquez Zúñiga Y. (80%), Mamani Paredes J. (5%), Calsin Berrios W. (10%), Villanueva Quispe C. (5%); *Curación de datos:* Velasquez Zúñiga Y. (75%), Mamani Paredes J. (5%), Calsin Berrios W. (10%), Villanueva Quispe C. (10%); *Análisis formal:* Velasquez Zúñiga Y. (70%), Mamani Paredes J. (10%), Calsin Berrios W. (10%), Villanueva Quispe C. (10%); *Investigación:* Velasquez Zúñiga Y. (80%), Mamani Paredes J. (5%), Calsin Berrios W. (10%), Villanueva Quispe C. (5%); *Redacción – borrador original:* Velasquez Zúñiga Y. (75%), Mamani Paredes J. (10%), Calsin Berrios W. (10%), Villanueva Quispe C. (5%); *Redacción – revisión y edición:* Velasquez Zúñiga Y. (70%), Mamani Paredes J. (10%), Calsin Berrios W. (10%), Villanueva Quispe C. (10%). *Visualización:* Velasquez Zúñiga Y. (75%), Mamani Paredes J. (10%), Calsin Berrios W. (10%), Villanueva Quispe C. (5%). *Supervisión:* Velasquez Zúñiga Y. (65%), Mamani Paredes J. (10%), Calsin Berrios W. (15%), Villanueva Quispe C. (10%).

Referencias

Adegoke, K. A., Akinnawo, S. O., Adebusi, T. A., Ajala, O. A., Adegoke, R. O., Maxakato, N. W., & Bello, O. S. (2023). Modified biomass adsorbents for removal of organic pollutants: a review of batch and optimization studies. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(10), 11615–11644. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04872-2>

Aguiar, A. B. S., Costa, J. M., Santos, G. E., Sancinetti, G. P., & Rodriguez, R. P. (2022). Removal of Metals by Biomass Derived

Adsorbent in Its Granular and Powdered Forms: Adsorption Capacity and Kinetics Analysis. *Sustainable Chemistry*, 3(4), 535–550. <https://doi.org/10.3390/suschem3040033>

Aita, S. A., Mahmoud, R., Hafez, S. H. M., & Zaher, A. (2025). Investigating adsorption of aqueous heavy metals through isotherms and kinetics with Zn-Co-Fe/LDH for remarkable removal efficiency. *Applied Water Science*, 15(4), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s13201-025-02390-9>

Akaangee Pam, A., Oluseun Elemile, O., Ephraim Musa, D., Chijoke Okere, M., Olusegun, A., & Ahmed Ameh, Y. (2023). Removal of Cu (II) via chitosan-conjugated iodate porous adsorbent: Kinetics, thermodynamics, and exploration of real wastewater sample. *Results in Chemistry*, 5, 100851. <https://doi.org/10.1016/J.RECHEM.2023.100851>

ANA. (2025). *INFORME TECNICO N° 0043-2025-ANA-AAA.TIT/RWAA. Resultados de monitoreo de la calidad del agua superficial en la Unidad Hidrográfica Pucará (24 al 27 de marzo de 2025)*.

Bontzolis, C. D., Dimitrellou, D., Plioni, I., Kandyli, P., Soupioni, M., Koutinas, A. A., & Kanellaki, M. (2024). Effect of solvents on aniseed aerial plant extraction using soxhlet and ultrasound methods, regarding antimicrobial activity and total phenolic content. *Food Chemistry Advances*, 4, 100609. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHA.2024.100609>

Burk, G. A., Herath, A., Crisler, G. B., Bridges, D., Patel, S., Pittman, C. U., & Mlsna, T. (2020). Cadmium and Copper Removal From Aqueous Solutions Using Chitosan-Coated Gasifier Biochar. *Frontiers in Environmental Science*, 8(November), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.541203>

Ciobanu, A. A., Bulgariu, D., Ionescu, I. A., Puiu, D. M., Vasile, G. G., & Bulgariu, L. (2023). SS symmetry Evaluation of Thermodynamic Parameters for Cu (II) Ions Biosorption on Algae Biomass and Derived Biochars. *li*, 1–15.

Da Costa, Y., Salvestrini, S., Gomez, C., Coelho, J., Alves, A., Serra, J., Melo, H., Sena, D., De Paula, F., & Pereira, R. (2024). Sorption thermodynamic and kinetic study of Cu(II) onto modified plant stem

bark. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(52), 61740–61762. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35194-6>

Darweesh, M. A., Elgendy, M. Y., Ayad, M. I., Ahmed, A. M. M., Elsayed, N. M. K., & Hammad, W. A. (2022a). Adsorption isotherm, kinetic, and optimization studies for copper (II) removal from aqueous solutions by banana leaves and derived activated carbon. *South African Journal of Chemical Engineering*, 40, 10–20. <https://doi.org/10.1016/J.SAJCE.2022.01.002>

Darweesh, M. A., Elgendy, M. Y., Ayad, M. I., Ahmed, A. M. M., Elsayed, N. M. K., & Hammad, W. A. (2022b). Adsorption isotherm, kinetic, and optimization studies for copper (II) removal from aqueous solutions by banana leaves and derived activated carbon. *South African Journal of Chemical Engineering*, 40, 10–20. <https://doi.org/10.1016/J.SAJCE.2022.01.002>

Dev, S., Kruse, R. L., Hamilton, J. P., & Lutsenko, S. (2022). Wilson Disease: Update on Pathophysiology and Treatment. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 10(May), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fcell.2022.871877>

Doble, J., Grabau, E., Henry, K., Rosenberg, R., Tomasko, C., Karshbaum, M., Gute, B., & Wainman, J. W. (2024). Visualización del principio de Le Châtelier mediante titulaciones complexométricas de plomoEDTA. *Revista de Educación Química*, 102(1), 1–466.

Eleryan, A., Aigbe, U. O., Ukhurebor, K. E., Onyancha, R. B., Eldeeb, T. M., ElNemr, M. A., Hassaan, M. A., Ragab, S., Osibote, O. A., Kusuma, H. S., Darmokoesoemo, H., & Nemr, A. El. (2024). Copper(II) ion removal by chemically and physically modified sawdust biochar. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(8), 9283–9320.

Elewa, A. M., Amer, A. A., Attallah, M. F., Gad, H. A., Al-Ahmed, Z. A. M., & Ahmed, I. A. (2023). Chemically Activated Carbon Based on Biomass for Adsorption of Fe(III) and Mn(II) Ions from Aqueous Solution. *Materials*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/ma16031251>

El-Nemr, M. A., El Nemr, A., Hassaan, M. A., Ragab, S., Tedone, L., De Mastro, G., & Pantaleo, A. (2022). Microporous Activated Carbon from *Pisum sativum* Pods Using Various Activation Methods and Tested for Adsorption of Acid Orange 7 Dye from Water. *Molecules*, 27(15). <https://doi.org/10.3390/molecules27154840>

Galvis, D. E., Lozano, A. S., & Guerrero, C. A. (2024). Valorización de vainas de guisante: Explorando la influencia de la relación biomasa/agua, el tamaño de partícula, la agitación y los catalizadores en las plataformas químicas y la producción de biocarbón. *Sustainability*, 16(17), 1–25.

Ghibate, R., Chrachmy, M., Kerrou, M., Ben Baaziz, M., Alaqarbeh, M., Amechrouq, A., Taouil, R., & Senhaji, O. (2025). Eco-friendly adsorption of Rhodamine B dye using *Punica granatum* peel from an aqueous medium. *Green Analytical Chemistry*, 12, 100201. <https://doi.org/10.1016/J.GREEAC.2024.100201>

Gutiérrez, P., Aldas, M., Gavilanes, D., Cadena, F., & Valle, V. (2025). Corn cob valorization: Synthesis of a polymer based on crystalline cellulose with poly(ethylene glycol) diacrylate and N-vinylcaprolactam. *Cleaner Engineering and Technology*, 27, 101019. <https://doi.org/10.1016/J.CLET.2025.101019>

Herrera, A., Tejada-Tovar, C., & González-Delgado, Á. D. (2020). Enhancement of cadmium adsorption capacities of agricultural residues and industrial fruit byproducts by the incorporation of Al₂O₃ nanoparticles. *ACS Omega*, 5(37), 23645–23653. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02298>

Isaac, R., & Siddiqui, S. (2022). Adsorption of divalent copper from aqueous solution by magnesium chloride co-doped *Cicer arietinum* husk biochar: Isotherm, kinetics, thermodynamic studies and response surface methodology. *Bioresource Technology Reports*, 18, 101004. <https://doi.org/10.1016/J.BITEB.2022.101004>

Ivanchenko, A., Soroka, O., Yelatontsev, D., & Panasenkov, V. (2025). Heavy metal ions removal from an aqueous solution using an adsorbent derived from walnut shell: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Desalination and Water*

Treatment, 321, 101048. <https://doi.org/10.1016/J.DWT.2025.101048>

Jiang, W., Hu, Y., & Zhu, Z. (2022). Biosorption Characteristic and Cytoprotective Effect of Pb²⁺, Cu²⁺ and Cd²⁺ by a Novel Polysaccharide from *Zingiber striatum*. *Molecules*, 27(22). <https://doi.org/10.3390/molecules27228036>

Kadimpati, K. K., Sanneboina, S., Thadikamala, S., & Mondithoka, K. P. (2024). Biosorption of Cu²⁺ by Green Algae, *Ulva fasciata*: Optimization by Response Surface Methodology. *National Academy Science Letters*, 47(6), 633–637. <https://doi.org/10.1007/s40009-024-01419-y>

Kuśmierek, K., Świątkowski, A., Zienkiewicz-Strzałka, M., & Deryło-Marczewska, A. (2025). Studies of the kinetics and isotherms of copper ions adsorption on APTES-modified silica materials. *Desalination and Water Treatment*, 321, 100965. <https://doi.org/10.1016/J.DWT.2024.100965>

Li, Y., Yang, J., Zhang, Z., & Yuan, J. (2024). Optimization of phosphorus adsorption on honeycomb briquette ash by application of response surface methodology. *Desalination and Water Treatment*, 317, 100224. <https://doi.org/10.1016/J.DWT.2024.100224>

Maldonado, I., Miranda-Mamani, J., & Paredes-Espinal, C. (2023). Heavy metals and ecological alterations resulting from wastewater discharge in Inner Puno Bay, Lake Titicaca. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 20, 100903. <https://doi.org/10.1016/J.ENMM.2023.100903>

Medhi, H., Chowdhury, P. R., Baruah, P. D., & Bhattacharyya, K. G. (2020). Kinetics of Aqueous Cu(II) Biosorption onto *Thevetia peruviana* Leaf Powder. *ACS Omega*, 5(23), 13489–13502. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b04032>

Meftah, S., Meftah, K., Drissi, M., Radah, I., Malous, K., Amahrous, A., Chahid, A., Tamri, T., Rayyad, A., Darkaoui, B., Hanine, S., ElHassan, O., & Bouyazza, L. (2025). Heavy metal polluted water: Effects and sustainable treatment solutions using bioadsorbents aligned with the SDGs. *Discover Sustainability*, 6(137), 20.

MIDAGRI. (2021). *Agro en cifras: Boletín estadístico anual 2021*.

Mohammad, A., Asgedom, A., K., M., A., T., T., G., & Van der Bruggen, B. (2024). Evaluación de la calidad del agua subterránea para beber utilizando un índice de calidad en Abyi Adi, Tigrai, norte de Etiopía. *Heliyon*, 10(16).

Mohammed, A. H., Shartooh, S. M., & Trigui, M. (2025). Biosorption and Isotherm Modeling of Heavy Metals Using *Phragmites australis*. *Sustainability (Switzerland)*, 17(12), 1–17. <https://doi.org/10.3390/su17125366>

Montgomery, D. (2020). *Design and analysis of experiments* (10ma ed.). John Wiley & Sons.

Mozaffari Majd, M., Kordzadeh-Kermani, V., Ghalandari, V., Askari, A., & Sillanpää, M. (2022). Adsorption isotherm models: A comprehensive and systematic review (2010–2020). *Science of The Total Environment*, 812, 151334. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.151334>

Ndekei, A., Gitita, M., Njomo, N., & Mbui, D. (2021). Synthesis and Characterization of Rice Husk Biochar and its Application in the Adsorption Studies of Lead and Copper. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, June, 36–50. <https://doi.org/10.9734/irjpac/2021/v22i430402>

Packiyam, T., Raja, K., Chengalvarayan, D. V., Anbalagan, S., Ragini, Y. P., & Sundaram, V. A. (2025). Green energy-compatible cadmium (II) biosorption from wastewater using *Codium decortatum*: Environmental impact, adsorption dynamics, and neural network modeling. *Next Materials*, 8, 100619. <https://doi.org/10.1016/J.NXMATE.2025.100619>

Raji, Z., Karim, A., Karam, A., & Khalloufi, S. (2023). Adsorption of Heavy Metals: Mechanisms, Kinetics, and Applications of Various Adsorbents in Wastewater Remediation—A Review. *Waste*, 1(3), 775–805. <https://doi.org/10.3390/waste1030046>

Shamohammadi, S., Khajeh, M., Fattahi, R., & Kadkhodahosseini, M. (2022). Introducing the new model of chemical adsorption for heavy metals by Jacobi activated carbon adsorbents, Iranian

activated carbon and blowy sand. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6, 100220. <https://doi.org/10.1016/J.CSCEE.2022.100220>

Tenza, N. P., Schmidt, S., & Mahlambi, P. N. (2025). Unlocking the potential of *Chlorella* sp. biomass: an effective adsorbent for heavy metals removal from wastewater. *Frontiers in Environmental Chemistry*, 6(April), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fenvc.2025.1531726>

Wu, Y., You, Y., Wu, L., Tong, L., Zhang, F., Yang, J., & Zheng, J. (2025). Physicochemical

and structural characterization coupled with untargeted metabolomics analysis of metabolic variations in different bamboo shoot powders. *LWT*, 224, 117820. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2025.117820>

Zhang, Y., He, Q., Yang, Y., & Bai, Q. (2024). Preparation of a biochar-lignosulfonate composite material and its adsorption performance for Cu²⁺. *RSC Advances*, 14(31), 22335–22343. <https://doi.org/10.1039/d4ra00588k>

