Avocado Seed Flour as a Bioadsorbent Agent for Arsenic Removal from Groundwater in the Eureka Rural Settlement, Lambayeque

Edinson Issac Arroyo-Cervera[1]; Angel Alexis Aponte-Lopez[2]; Cristian Michel Gomez-Cornejo[3]
[1,2,3]Universidad César Vallejo, Perú, earroyoce@ucvvirtual.edu.pe, aapontel@ucvvirtual.edu.pe, Gcornejocm@ucvvirtual.edu.pe

Abstract– ***The research will contribute to SDG 6 on clean water and sanitation, particularly Target 6.3, which aims to improve water quality by reducing pollution and minimising the discharge of hazardous chemicals and materials. The effectiveness of avocado seed meal (Persea americana) as a bioadsorbent for the removal of arsenic from groundwater was evaluated. The flour was characterised physicochemically using proximate analysis and FTIR-ATR spectroscopy, revealing a predominantly polysaccharide composition (80.53% carbohydrates) and functional groups O–H, C=O, –COOH and C–O, associated with adsorption processes. The initial concentration of arsenic in the groundwater was 0.136 mg/L, a value that far exceeded the maximum permissible limit for human consumption. The experiments were carried out using the batch method, evaluating dosages of 1, 3, 6 and 10 g/L and contact times of 30, 60 and 90 minutes. Factor regression analysis determined that the optimal conditions were a dose of 10 g/L and a contact time of 90 minutes, achieving a removal efficiency of 93.38% and a final concentration of 0.009 mg/L, which is below the current regulatory limit.***

Keywords-- ***Groundwater, Well, Pollutant, Water treatment, Water pollution.***

Harina de Semilla de Palta como Agente Bioadsorbente de Arsénico en Aguas Subterráneas del Caserío Eureka, Lambayeque

Edinson Issac Arroyo-Cervera[1]; Angel Alexis Aponte-Lopez[2]; Cristian Michel Gomez-Cornejo[3]
[1,2,3]Universidad César Vallejo, Perú, earroyoce@ucvvirtual.edu.pe, aapontel@ucvvirtual.edu.pe, Gcornejocm@ucvvirtual.edu.pe

Resumen*– La investigación aportara al ODS: 6 relacionado con agua limpia y saneamiento, particularmente la Meta 6.3 que estableció mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos. Se evaluó la eficacia de la harina de semilla de palta (Persea americana) como bioadsorbente para la remoción de arsénico en aguas subterráneas. Se caracterizó fisicoquímicamente la harina mediante análisis proximal y espectroscopía FTIR-ATR, identificándose una composición predominantemente polisacarídica (80,53 % de carbohidratos) y grupos funcionales O–H, C=O, –COOH y C–O, asociados a procesos de adsorción. La concentración inicial de arsénico en el agua subterránea fue de 0,136 mg/L, valor que superó ampliamente el límite máximo permisible para consumo humano. Los ensayos se realizaron mediante el método batch, evaluando dosis de 1, 3, 6 y 10 g/L y tiempos de contacto de 30, 60 y 90 minutos. El análisis de regresión factorial determinó que la condición óptima correspondió a una dosis de 10 g/L y un tiempo de contacto de 90 minutos, alcanzando una eficiencia de remoción de 93,38 % y una concentración final de 0,009 mg/L, inferior al límite normativo vigente.

Palabras clave*-- Agua subterránea, pozo, contaminante, tratamiento del agua, contaminación del agua.

I. Introducción

La presencia de arsénico en acuíferos representa uno de los desafíos ambientales y sanitarios más apremiantes a escala global. Se estima que decenas de millones de personas se encuentran expuestas a concentraciones de arsénico superiores a los límites recomendados a través del consumo de agua subterránea, siendo las llanuras aluviales de Asia meridional y las cuencas sedimentarias de origen volcánico en América Latina algunas de las zonas más afectadas [1], [2].

En América Latina, la presencia geogénica de arsénico en aguas subterráneas ha sido documentada en varios países, asociada principalmente a la actividad volcánica andina y a procesos de disolución de minerales arsenicales en acuíferos sedimentarios [3]. En el territorio peruano, estudios recientes identificaron concentraciones anómalas de arsénico y manganeso en pozos ubicados en llanuras aluviales de la Amazonía, superando en varios casos los límites establecidos por la normativa nacional e internacional [4]. De manera similar, en la región altiplánica de Puno se han reportado concentraciones elevadas de arsénico en la cuenca del río Callacame, con implicancias directas sobre la calidad de suelos agrícolas y fuentes de abastecimiento [5].

En el caserío Eureka, distrito y región Lambayeque, medios periodísticos y estudios preliminares han documentado que la población infantil consume agua proveniente de pozos con concentraciones de arsénico que exceden el límite máximo permisible establecido por la normativa peruana, situación que motivó la presente investigación como respuesta directa a una problemática ambiental y de salud pública identificada en la propia comunidad [6].

La exposición crónica al arsénico, incluso a concentraciones relativamente bajas, se asocia con manifestaciones clínicas cutáneas, cardiovasculares y neurológicas, además de incrementar el riesgo de diversos tipos de cáncer [7]. Investigaciones recientes han vinculado la exposición prolongada, incluso por debajo de los límites regulatorios vigentes, con un mayor riesgo de cáncer renal [8], mientras que estudios en población infantil han evidenciado biomarcadores de exposición asociados al consumo de agua y alimentos contaminados. Revisiones recientes coinciden en que las tecnologías convencionales de remediación coagulación-floculación, ósmosis inversa, intercambio iónico y procesos de oxidación presentan altos costos de inversión y operación, además de generar lodos y subproductos de difícil disposición, lo que ha impulsado la búsqueda de alternativas de bajo costo y base biológica [9], [10].

En este contexto, la bioadsorción ha sido señalada como una de las tecnologías más prometedoras para la remoción de arsénico y otros contaminantes inorgánicos del agua, debido a su bajo costo, simplicidad operativa y a la posibilidad de emplear residuos agroindustriales como materia prima [11], [12]. Diversos materiales de origen biológico biochar de distintas biomasas, cáscaras de cítricos, cascarilla de arroz y huesos carbonizados, entre otros han sido evaluados como bioadsorbentes de arsénico, reportando eficiencias de remoción que varían ampliamente según el tipo de material, el grado de activación superficial, el pH de la solución y las condiciones experimentales empleadas [9], [10].

La semilla de palta (*Persea americana*) constituye uno de los subproductos agroindustriales de mayor volumen en el Perú, siendo habitualmente descartada por la industria procesadora y exportadora pese a su reconocido potencial fitoquímico y nutricional [13]. Estudios sobre la composición de residuos agroalimentarios peruanos han evidenciado que la semilla de palta presenta un elevado contenido de carbohidratos estructurales además de compuestos bioactivos de interés biotecnológico [14], mientras que investigaciones sobre harinas y almidones extraídos de semillas de aguacate de distintos cultivares han caracterizado propiedades fisicoquímicas, estructurales y térmicas que sustentan su aprovechamiento en procesos de adsorción [15].

A nivel regional se ha explorado previamente el uso de semilla de palta combinada con otros residuos vegetales en filtros bioadsorbentes multicapa para el tratamiento de aguas superficiales contaminadas con arsénico en el valle del río Tambo, Arequipa, evidenciando el interés creciente por este tipo de soluciones en distintas cuencas del país [16]. Asimismo, estudios recientes han evaluado derivados de semilla de aguacate biochar magnético y biocoagulantes en polvo para la remoción de cromo hexavalente, identificando grupos funcionales hidroxilo, carbonilo y carboxilo como responsables de los mecanismos de adsorción electrostática y complejación superficial con metales pesados [17], [18].

En el ámbito local, investigaciones previas evaluaron bioadsorbentes similares para la remoción de arsénico en aguas subterráneas del sur peruano y en la propia región Lambayeque, empleando semilla de palta combinada con mazorca de maíz en Torata [19], afrecho de café en Mórrope [20], carbón activado de cascarilla de arroz en distintos distritos [21], y hueso carbonizado en Juliaca [22], con eficiencias de remoción que oscilaron entre el 36 % y más del 99 %, dependiendo del material, la dosis y el grado de procesamiento previo del bioadsorbente.

Pese a este creciente cuerpo de evidencia, no se identificaron estudios previos que evalúen específicamente la harina de semilla de palta de la variedad Mayar cultivada ampliamente en la región Lambayeque como bioadsorbente de arsénico en aguas subterráneas reales, ni que estimen su viabilidad económica bajo condiciones de producción artesanal a pequeña escala, vacío de conocimiento que la presente investigación buscó atender.

El objetivo general de esta investigación fue determinar en qué medida la harina de semilla de palta presenta un efecto significativo como bioadsorbente para reducir la presencia de arsénico en aguas subterráneas del caserío Eureka, Lambayeque, durante el año 2026. Los objetivos específicos comprendieron: (i) caracterizar fisicoquímicamente la harina de semilla de palta mediante análisis proximal y espectroscopía FTIR-ATR; (ii) evaluar la eficiencia de remoción de arsénico bajo diferentes dosis y tiempos de contacto en agua subterránea real; y (iii) estimar el costo de tratamiento por metro cúbico de agua tratada bajo la condición experimental óptima.

II. METODOLOGÍA

A. *Tipo, enfoque y diseño*

La investigación fue de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo y diseño experimental con grupo control (blanco), dado que se manipuló la variable independiente (dosis del bioadsorbente) para observar su efecto sobre la variable dependiente (concentración de arsénico) bajo condiciones controladas de laboratorio. El alcance fue explicativo, orientado a establecer la relación causal entre el bioadsorbente y la reducción del contaminante. El estudio se desarrolló en el caserío Eureka, Lambayeque, zona seleccionada por presentar concentraciones elevadas de arsénico y disponibilidad local de materia prima [23], [24], [25].

B. *Preparación del bioadsorbente*

Se emplearon semillas maduras de palta (variedad Mayar), seleccionadas manualmente, lavadas y cortadas en fragmentos uniformes. El secado se realizó en estufa de convección a 65 °C durante 24 horas hasta peso constante. El material seco se molió y tamizó con malla 50 ASTM (300 µm de apertura), obteniéndose la "harina de semilla de palta" empleada como bioadsorbente.

C. *Población, muestra y muestreo*

La población estuvo constituida por el agua subterránea del caserío Eureka, Lambayeque, y la muestra correspondió a 20 litros de agua recolectados de un pozo representativo de la zona, ubicado en las coordenadas UTM WGS84 Norte 9258390 y Este 626515. El muestreo fue no probabilístico por conveniencia, considerando la accesibilidad del punto de captación y su relevancia como fuente de abastecimiento para la población local. La recolección se realizó siguiendo los lineamientos del Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales de la Autoridad Nacional del Agua [27], adaptado para la toma de muestras en fuentes subterráneas, preservándose las muestras mediante cadena de frío hasta su análisis en laboratorio acreditado.

D. *Diseño experimental (método batch)*

Los ensayos se realizaron colocando 250 mL de agua contaminada en matraces Erlenmeyer, con dosis de bioadsorbente de 1, 3, 6 y 10 g/L y tiempos de contacto de 30, 60 y 90 minutos, bajo agitación constante (400 rpm, 25 ± 2 °C) [27], [28], [29]. Se analizaron 26 muestras, incluyendo dos blancos de control (Blanco 1 y Blanco 2), recolectadas el 26 de mayo de 2026 a las 11:45 horas. Los análisis fueron realizados por el laboratorio acreditado Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. (SLab), empleando el método EPA 200.7 Rev. 4.4 (2024) mediante espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-AES), técnica ampliamente validada para la determinación de elementos traza en matrices acuosas y vegetales [28]. El porcentaje de remoción (%R) se calculó mediante la ecuación (1):

$$\%R = ((C_i - C_e) / C_i) \times 100 \quad (1)$$

donde C_i es la concentración inicial y C_e la concentración de arsénico en equilibrio, ambas en mg/L. Adicionalmente, se determinó la caracterización fisicoquímica de la harina mediante análisis proximal (metodología FAO Food and Nutrition Paper Vol. 14/7) y espectroscopía FTIR-ATR (rango 450–4000 cm^{-1}, espectrofotómetro Perkin Elmer).

E. *Análisis estadístico*

Se aplicó estadística descriptiva y un ANOVA de diseño factorial (dosis × tiempo) para evaluar diferencias significativas, complementado con la prueba post-hoc de Tukey (HSD, 95 % de confianza) cuando se identificaron diferencias significativas ($p < 0,05$). Adicionalmente, se ajustó un modelo de regresión factorial general para predecir la concentración final de arsénico en función de la dosis, el

tiempo de contacto y su interacción, consistente con el enfoque cuantitativo del estudio, orientado a la medición objetiva de variables y a la contrastación estadística de hipótesis [29]. El procesamiento se realizó con el software MINITAB v22.3.1.

F. Aspectos éticos

La investigación se enmarcó dentro de los principios de la investigación aplicada, orientada a generar conocimiento útil para la solución de un problema ambiental concreto mediante el desarrollo experimental controlado [32], [33], [34]. Se respetó la autenticidad de los datos obtenidos en laboratorio, la originalidad de la información reportada y el consentimiento de los pobladores del caserío Eureka para el acceso a la fuente de agua subterránea evaluada, sin generar riesgo alguno para la salud de la población durante el desarrollo del estudio.

III. Resultados

A. Caracterización fisicoquímica de la harina de semilla de palta

El análisis proximal mostró que la harina de semilla de palta presentó un elevado contenido de carbohidratos (80,53 g/100 g), seguido de grasa total (4,79 g/100 g), proteína (4,52 g/100 g), cenizas (2,69 g/100 g) y una humedad reducida (7,47 g/100 g), Tabla I, condiciones favorables para su desempeño como bioadsorbente.

TABLA I
ANÁLISIS PROXIMAL DE LA HARINA DE SEMILLA DE PALTA

Componente	Contenido (g/100 g)
Carbohidratos	80.53
Humedad	7.47
Grasa total	4.79
Proteína	4.52
Cenizas	2.69

El análisis FTIR-ATR reveló seis grupos funcionales característicos de una matriz lignocelulósica (Tabla II), destacando bandas O–H, C=O y –COOH asociadas a procesos de adsorción electrostática y complejación superficial con el arsénico.

TABLA II
GRUPOS FUNCIONALES IDENTIFICADOS MEDIANTE FTIR-ATR

Número de onda (cm^{-1})	Grupo funcional
3333.77	O–H
2895.00	C–H
1736.00	C=O
1607.80	–COOH
1020.71	C–O

B. Caracterización inicial del agua subterránea

Las muestras de agua cruda (Blanco 1 y Blanco 2), recolectadas en el pozo del caserío Eureka y analizadas por el método EPA 200.7 Rev. 4.4 mediante ICP-AES, registraron concentraciones de arsénico de 0,133 y 0,139 mg/L (promedio 0,136 mg/L), superando entre 13 y 14 veces el límite máximo permisible de 0,01 mg/L establecido para agua de consumo humano. Este resultado confirmó la contaminación significativa de la fuente evaluada y fue consistente con reportes previos de exposición de la población local, incluida la población infantil, a agua subterránea con concentraciones de arsénico por encima de la norma nacional [6].

C. Efecto del tiempo de contacto y de la dosis

La eficiencia de remoción se incrementó progresivamente con el tiempo de contacto, de 15,63 % a los 30 min a 38,60 % a los 90 min (Fig. 1); sin embargo, el ANOVA de un factor no mostró diferencias estadísticamente significativas entre tiempos ($F = 1,61$; $p = 0,223$).

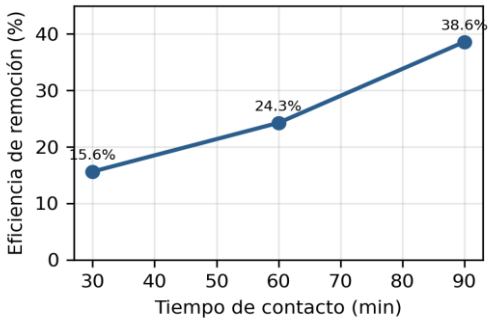


Fig. 1 Eficiencia de remoción de arsénico según el tiempo de contacto.

En cambio, la dosis del bioadsorbente resultó el factor determinante: la eficiencia aumentó de 6,62 % (1 g/L) a 56,84 % (10 g/L) (Fig. 2), diferencia estadísticamente significativa ($F = 8,03$; $p = 0,001$; $R^2 = 54,64$ %), con la prueba de Tukey agrupando la dosis de 10 g/L en una categoría significativamente distinta a las dosis menores.

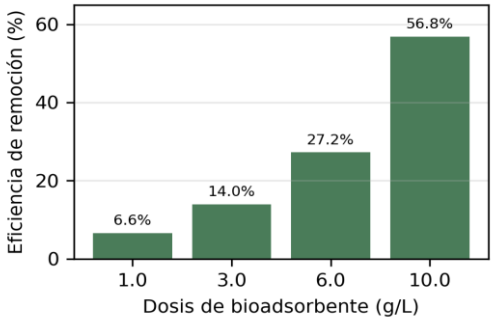


Fig. 2 Eficiencia de remoción de arsénico según la dosis de bioadsorbente.

D. Modelo de regresión factorial y condición óptima

El modelo de regresión factorial general (dosis × tiempo) resultó estadísticamente significativo ($F = 8,86$; $p = 0,000$), explicando el 89,04 % de la variabilidad de la concentración final de arsénico (R^2 ajustado = 78,99 %). La dosis presentó el mayor efecto ($F = 19,94$; $p = 0,000$), seguida del tiempo ($F = 7,29$; $p = 0,008$), con una interacción significativa entre ambos factores ($F = 3,85$; $p = 0,023$). La condición óptima predicha correspondió a 10 g/L y 90 minutos, Tabla III.

TABLA III
CONDICIÓN ÓPTIMA PREDICHA POR EL MODELO

Dosis (g/L)	Tiempo (min)	C. final (mg/L)	Eficiencia (%)
10.0	90	0.0090	93.38

E. Costo de tratamiento

Bajo la condición óptima (10 g/L, 90 min), se requieren 10 kg de bioadsorbente para tratar un metro cúbico de agua. Considerando un costo de producción de S/. 28,34 por kilogramo, el costo total de tratamiento se estimó en S/. 283,40/m³, Tabla IV, confirmando la viabilidad económica de la harina de semilla de palta como alternativa de bajo costo frente a métodos convencionales.

TABLA IV
COSTO DE TRATAMIENTO BAJO LA CONDICIÓN ÓPTIMA

Parámetro	Valor
Bioadsorbente requerido	10 kg/m³
Costo de producción	S/. 28.34/kg
Costo total de tratamiento	S/. 283.40/m³

F. Comparación con bioadsorbentes reportados en la literatura

Con la finalidad de contextualizar el desempeño de la harina de semilla de palta frente a otros bioadsorbentes empleados para la remoción de arsénico, la Tabla V resume las eficiencias máximas reportadas por estudios previos desarrollados en el sur peruano y en la región Lambayeque.

TABLA V
COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DE REMOCIÓN DE ARSÉNICO REPORTADAS EN ESTUDIOS PREVIOS

Estudio	Bioadsorbente	Dosis / Tiempo	Eficiencia (%)
Cabana Cari [19]	Semilla de palta + mazorca de maíz	13 g/L	92.86
Goicochea y Ruiz [20]	Afrecho de café	12 g/L	36.00
Barrera y Tullume [21]	Carbón activado cascarilla de arroz	-	99.85
Paricoto León [22]	Hueso carbonizado	120 min	94.07

La comparación evidencia que la harina de semilla de palta, utilizada sin procesos de activación química o térmica, alcanzó una eficiencia de remoción competitiva frente a materiales sometidos a mayor procesamiento.

IV. Discusión

El elevado contenido de carbohidratos (80,53 g/100 g) obtenido en la muestra S-2894 fue coherente con lo reportado por Inga et al. [14] en semilla de aguacate variedad Hass, quienes determinaron un contenido de carbohidratos de 85,85 g/100 g en base seca, proteína de 4,89 g/100 g y cenizas de 2,73 g/100 g, corroborando que la fracción glucídica constituye el componente predominante de este subproducto independientemente de la variedad estudiada. De manera similar, De Dios-Ávila et al. [15] reportaron en harinas de semilla de aguacate de cultivares Hass y landrace contenidos de cenizas de 2,40–2,52 % y proteínas de aproximadamente 5,2 %, valores muy cercanos a los obtenidos en el presente estudio. Las diferencias menores observadas respecto a la literatura podrían atribuirse al estado de madurez del fruto, a las condiciones agroecológicas de la variedad Mayar en Lambayeque y al método de secado empleado.

El elevado contenido de carbohidratos resultó particularmente relevante para el proceso de bioadsorción, dado que la naturaleza predominantemente polisacarídica del material implicó la presencia de celulosa, hemicelulosa y pectinas con grupos funcionales capaces de interactuar con iones metálicos, lo cual fue respaldado por el análisis FTIR-ATR. Las bandas identificadas en el presente estudio (O–H a 3333,77 cm^{-1}, C–H a 2895 cm^{-1}, C=O a 1736 cm^{-1}, –COOH a 1607,80 cm^{-1} y C–O a 1020,71 cm^{-1}) guardaron estrecha relación con las reportadas por Sanipatín et al. [17], quienes identificaron en el biochar magnético de semilla de aguacate bandas de O–H (3395 cm^{-1}), C–H (2890 cm^{-1}) y C=C aromático (1575 cm^{-1}), atribuyendo a estos grupos funcionales la capacidad de interacción con metales pesados mediante adsorción electrostática y complejación superficial. En la misma línea, Zourif et al. [18] reportaron en polvo de semilla de aguacate bandas de O–H (3448 cm^{-1}), CH_2 (2927 y 2850 cm^{-1}) y carbonilo (1637 cm^{-1}), señalando que la aparición de nuevos picos en la región fingerprint (800–400 cm^{-1}) tras el tratamiento evidenció la formación de enlaces metal –O, siendo la quimisorción el mecanismo dominante de remoción.

Respecto al tiempo de contacto, la eficiencia de remoción mostró un incremento progresivo, de 15,63 % a los 30 minutos a 24,26 % a los 60 minutos y 38,60 % a los 90 minutos, sin alcanzar el equilibrio de adsorción dentro del rango evaluado, lo que fue coherente con Sanipatín et al. [17], quienes señalaron que la adsorción mediante biochar de semilla de aguacate continuó incrementándose hasta alcanzar el equilibrio a los 120 minutos, con una capacidad máxima de adsorción predicha por el modelo cinético de 42,49 mg/g para una concentración inicial de 100 mg/L. De manera similar, Paricoto León [22] obtuvo las mayores eficiencias de remoción de arsénico con un tiempo de contacto de 120 minutos utilizando hueso carbonizado, logrando una remoción máxima de 94,07 %.

En relación con la dosis del bioadsorbente factor de mayor influencia sobre la remoción de arsénico en el presente estudio, la eficiencia aumentó de 6,62 % con 1 g/L a 56,84 % con 10 g/L, evidenciando que una mayor cantidad de material proporcionó más sitios activos disponibles para la captura del contaminante. Estos resultados fueron consistentes con los obtenidos por Cabana Cari [19], quien empleó semilla de palta como bioadsorbente en aguas subterráneas de Torata y alcanzó una remoción de 92,86 % utilizando una dosis de 13 g/L, ligeramente superior a la empleada en el presente estudio.

A nivel local, la eficiencia máxima alcanzada (93,38 %) superó ampliamente el 36 % reportado por Goicochea Núñez y Ruiz Cachay [20], quienes utilizaron afrecho de café como bioadsorbente con una dosis de 12 g/L para tratar aguas subterráneas de Mórrope. Esta diferencia evidenció una mayor

afinidad de la harina de semilla de palta por el arsénico, probablemente asociada a los grupos funcionales hidroxilo, carboxilo y carbonilo identificados en la caracterización fisicoquímica. Asimismo, la eficiencia obtenida resultó ligeramente inferior al 99,85 % alcanzado por Barrera Leyva y Tullume Niquen [21] mediante carbón activado de cascarilla de arroz; sin embargo, dicho material fue sometido a procesos de activación que incrementan considerablemente su área superficial y capacidad adsorbente, mientras que la harina de semilla de palta se empleó sin modificaciones químicas ni térmicas adicionales.

En cuanto al costo de tratamiento, bajo las condiciones óptimas de 10 g/L y 90 minutos se obtuvo un valor de S/. 283,40 por metro cúbico de agua tratada, equivalente al uso de 10 kg de material con un costo de producción de S/. 28,34 por kilogramo. Zourif et al. [18] reportaron que el polvo de semilla de aguacate presentó el menor costo de tratamiento entre los biocoagulantes evaluados para la remoción de Cr(VI), alcanzando apenas 0,0015 USD/m³, valor considerablemente inferior al obtenido en la presente investigación; no obstante, dicho estudio operó a escala de laboratorio con soluciones sintéticas de concentración controlada, mientras que el presente trabajo trató agua subterránea real con una matriz fisicoquímica más compleja, lo que demandó mayor cantidad de material adsorbente.

En la misma línea, GadelHak et al. [35] identificaron que los costos de tratamiento reportados a escala industrial con biosorbentes de origen agrícola oscilaron entre 0,038 y 8,95 USD/m³, rango dentro del cual el valor obtenido en esta investigación (equivalente aproximadamente a 74–76 USD/m³ al tipo de cambio vigente) superó el límite superior, lo que sugiere que el escalamiento a condiciones de planta piloto o industrial podría reducir sustancialmente los costos unitarios mediante la optimización del proceso y la reducción de mermas en la preparación del bioadsorbente. Por su parte, Ighalo et al. [36] revisaron el desempeño económico de distintos adsorbentes para tratamiento de agua y concluyeron que los materiales de origen vegetal y agroindustrial constituyeron las alternativas de menor costo frente a adsorbentes comerciales y nanoadsorbentes avanzados, cuyo costo de producción puede superar ampliamente el de residuos agrícolas de bajo procesamiento.

Asimismo, Duany-Timosthe et al. [37] señalaron que los bioadsorbentes naturales representan opciones de bajo costo y alta disponibilidad para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados, destacando que su viabilidad económica depende en gran medida de la disponibilidad local de la materia prima y de la sencillez del proceso de preparación, condiciones que se cumplieron en el caso de la harina de semilla de palta como residuo agroindustrial abundante en la región Lambayeque. Finalmente, Dionisio Humberto et al. [38] analizaron la viabilidad económica de la pirólisis de semilla de palta Hass para producir biocarbón, reportando márgenes económicos variables entre 2 % y 60 % según la escala de producción, lo que evidenció que la valorización térmica del residuo incrementa su valor comercial pero también eleva los costos de producción; en contraste, la presente investigación empleó harina de semilla de palta sin pirólisis ni activación química, reduciendo los requerimientos energéticos y el costo de preparación del bioadsorbente.

V. Conclusiones

La caracterización fisicoquímica de la harina de semilla de palta variedad Mayar reveló una composición predominantemente polisacarídica, con un contenido de carbohidratos de 80,53 g/100 g y una humedad reducida de 7,47 g/100 g, condiciones favorables para su desempeño como material bioadsorbente. El análisis FTIR-ATR confirmó la naturaleza lignocelulósica del material mediante la identificación de grupos funcionales activos (O–H, C–H, C=O, –COOH y C–O), los cuales posibilitaron la interacción con el arsénico presente en el agua subterránea a través de mecanismos de adsorción electrostática y complejación superficial.

La harina de semilla de palta demostró una eficiencia máxima de remoción de arsénico de 93,38 % con una dosis de 10 g/L y 90 minutos de contacto, reduciendo la concentración de 0,136 mg/L a 0,009 mg/L, valor inferior al límite máximo permisible de 0,01 mg/L para agua de consumo humano. El análisis de regresión factorial evidenció que la dosis del bioadsorbente fue el factor de mayor influencia sobre la eficiencia de remoción, mientras que el tiempo de contacto favoreció el aprovechamiento de los sitios activos del material, confirmando su potencial como alternativa sostenible para el tratamiento de aguas subterráneas contaminadas con arsénico en el caserío Eureka.

El costo de tratamiento estimado fue de S/. 283,40 por metro cúbico de agua tratada bajo la condición óptima, considerando un costo de producción de S/. 28,34 por kilogramo de bioadsorbente elaborado a partir de semilla de palta disponible localmente en Lambayeque. Aunque este valor correspondió a una escala de laboratorio sin modificación química, se mostró competitivo frente a otros adsorbentes reportados en la literatura, respaldando la viabilidad económica de esta alternativa para comunidades rurales.

VI. Recomendaciones

Se recomienda evaluar tiempos de contacto superiores a 90 minutos, incluyendo 120 y 180 minutos, dado que la eficiencia de remoción aumentó progresivamente sin evidenciar un equilibrio de adsorción dentro del rango estudiado. Asimismo, se sugiere investigar la influencia del pH sobre la capacidad adsorbente de la harina de semilla de palta, ya que este parámetro afecta la carga superficial de los grupos funcionales del material y la especiación química del arsénico.

De igual manera, se recomienda desarrollar investigaciones orientadas a la aplicación de la harina de semilla de palta en sistemas de tratamiento de flujo continuo mediante columnas de lecho fijo, dado que la presente

investigación se realizó bajo condiciones batch de laboratorio. Este tipo de sistemas permitiría simular escenarios más cercanos a una aplicación real en comunidades rurales, además de posibilitar la determinación de parámetros operacionales como el tiempo de ruptura, la capacidad dinámica de adsorción y la vida útil del material. Asimismo, se considera necesario estudiar la regeneración y reutilización del bioadsorbente después de varios ciclos de adsorción, con el fin de reducir los costos operativos y fortalecer la sostenibilidad del proceso.

Finalmente, se recomienda realizar estudios comparativos entre la harina de semilla de palta y otros bioadsorbentes obtenidos a partir de residuos agroindustriales disponibles en la región Lambayeque, como la cascarilla de arroz y el afrecho de café, con el fin de establecer criterios técnicos, económicos y ambientales para seleccionar la alternativa más eficiente y accesible. Del mismo modo, sería conveniente evaluar la viabilidad de escalar el proceso a nivel piloto o comunitario, dado que la materia prima presenta amplia disponibilidad local, bajo costo y no requiere procesos complejos de activación.

AGRADECIMIENTO

Los autores, Ángel Alexis Aponte López y Edinson Issac Arroyo Cervera, expresan su agradecimiento a la Universidad César Vallejo, por el respaldo académico brindado durante el desarrollo de la investigación; al laboratorio acreditado Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. (SLab), por la ejecución de los análisis fisicoquímicos y la determinación de arsénico mediante ICP-AES; y a los pobladores del caserío Eureka, Lambayeque, por facilitar el acceso a la fuente de agua subterránea utilizada en el estudio. Asimismo, agradecen al Mgtr. Walter Manuel Hoyos Alayo por su orientación y acompañamiento durante el desarrollo de la presente investigación.

REFERENCIAS

[1] A. Saha, S. C. Pal, A. R. Md. T. Islam, A. Islam, E. Alam, and Md. K. Islam, 'Hydro-chemical based assessment of groundwater vulnerability in the Holocene multi-aquifers of Ganges delta', *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-51917-8.

[2] I. Nishita, 'Arsenic contamination in GBM plains with a focus on Bihar, India: risks and remediation', *Discov. Environ.*, vol. 3, no. 1, 2025, doi: 10.1007/s44274-024-00179-2.

[3] F. C. R. Costa, V. R. Moreira, R. N. Guimarães, P. B. Moser, and M. C. S. Amaral, 'Arsenic in natural waters of Latin-American countries: Occurrence, risk assessment, low-cost methods, and technologies for remediation', *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 184, pp. 116–128, 2024, doi: 10.1016/j.psep.2023.11.075.

[4] C. M. C. de Meyer *et al.*, 'Hotspots of geogenic arsenic and manganese contamination in groundwater of the floodplains in lowland Amazonia (South America)', *Sci. Total Environ.*, vol. 860, 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160407.

[5] M. E. Calcina-Benique, L. E. Calcina-Rondán, F. R. Huaraya-Chambi, A. R. Salas-Camargo, and K. Tejada-Meza, 'Arsénico en águas subterráneas de la cuenca del río Callacame y su impacto en suelos agricolas en Desaguadero, Puno - Perú', *DYNA*, vol. 89, no. 221, pp. 178–184, Jun. 2022, doi: 10.15446/dyna.v89n221.98319.

[6] M. Cabrera Vásquez, 'Lambayeque: Confirman que niños de caserío Eureka consumen agua con arsénico', Correo. Accessed: Sep. 25, 2025. [Online]. Available: https://diariocorreo.pe/edicion/lambayeque/confirman-que-ninos-de-caserio-eureka-consumen-agua-con-arsenico-noticia/

[7] D. Mandal, S. Biswas, S. Seal, R. Mandal, S. Das, and A. Basu, 'Arsenic toxicity and its clinical manifestations in Murshidabad district with some potential remedial measures', in *Microbes and Microbial Biotechnology for Green Remediation*, J. A. Malik, Ed., Elsevier, 2022, pp. 701–715. doi: 10.1016/B978-0-323-90452-0.00011-6.

[8] N. T. Hasan, D. Han, X. Xu, G. Sansom, and T. Roh, 'Relationship between low-level arsenic exposure in drinking water and kidney cancer risk in Texas', *Environ. Pollut.*, vol. 363, 2024, doi: 10.1016/j.envpol.2024.125097.

[9] B. A. Sadee, S. M. S. Zebari, Y. Galali, and M. F. Saleem, 'A review on arsenic contamination in drinking water: sources, health impacts, and remediation approaches', *RSC Adv.*, vol. 15, no. 4, pp. 2684–2703, 2025, doi: 10.1039/d4ra08867k.

[10] M. W. Sultan *et al.*, 'A comprehensive review on arsenic contamination in groundwater: Sources, detection, mitigation strategies and cost analysis', *Environ. Res.*, vol. 265, 2025, doi: 10.1016/j.envres.2024.120457.

[11] D. Berlín, A. Reshmi, B. Sivaprakash, N. Rajamohan, and P. S. Kumar, 'Remediation of emerging metal pollutants using environment friendly biochar- Review on applications and mechanism', *Chemosphere*, vol. 290, 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.133384.

[12] S. Umare, A. K. Thawait, and S. H. Dhawane, 'Remediation of arsenic and fluoride from groundwater: a critical review on bioadsorption, mechanism, future application, and challenges for water purification', *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 31, no. 26, pp. 37877–37906, 2024, doi: 10.1007/s11356-024-33679-y.

[13] S. P. Bangar *et al.*, 'Avocado seed discoveries: Chemical composition, biological properties, and industrial food applications', *Food Chem. X*, vol. 16, 2022, doi: 10.1016/j.fochx.2022.100507.

[14] M. Inga *et al.*, 'Chemical analysis and bioactive compounds from agrifood by-products of peruvian crops', *Front. Sustain. food Syst.*, vol. 8, 2024, doi: 10.3389/fsufs.2024.1341895.

[15] N. De Dios-Avila *et al.*, 'Physicochemical, Structural, Thermal and Rheological Properties of Flour and Starch Isolated from Avocado Seeds of Landrace and Hass Cultivars', *Molecules*, vol. 27, no. 3, 2022, doi: 10.3390/molecules27030910.

[16] D. M. Pachari Chambilla and E. M. Mamani Turpo, 'Elaboración y aplicación de filtros bioadsorbentes multicapa basados en semilla de palta, cáscara de naranja y mandarina para la remoción de arsénico en aguas superficiales en el valle del río Tambo, departamento de Arequipa'. [Online]. Available: https://repositorio.unsa.edu.pe/items/cdcb5baa-6e9f-4293-b0b8-d93ea25c676d

[17] S. Sanipatín, D. Barzallo, P. Palmay, and C. Medina, 'Avocado Seed-Derived Magnetic Biochar for Efficient Cr(VI) Removal: Influence of Magnetite Synthesis Route, Characterization and Kinetic Mechanism', *Water*, vol. 18, no. 9, 2026, doi: 10.3390/w18091074.

[18] A. Zourif, S. Kouniba, K. Hamidallah, N. Nouj, M. Elsenety, and M. El Guendouzi, 'Sustainable hexavalent chromium removal from aqueous solutions using novel plant-based biocoagulants: Comparative performance, mechanism elucidation, and economic evaluation', *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 47, 2025, doi: 10.1016/j.scp.2025.102168.

[19] R. A. Cabana Cari, 'Comparación de la eficiencia de los bioadsorbentes semilla de palta (*Persea americana*) y mazorca de maíz (Zea mays) en la remoción del arsénico (As) de las aguas naturales del subsuelo de la zona del distrito de Torata.', Jul. 2022, Accessed: Sep. 24, 2025. [Online]. Available: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNAM_8808ad96deae8e0bc34566bf3f3d5b39

[20] A. S. Goicochea Nuñez and J. J. Ruiz Cachay, 'Adsorción de arsénico disuelto en agua subterránea en el distrito de Mórrope (Lambayeque) utilizando residuos sólidos de café (afrecho)', 2019, Accessed: Oct. 03, 2025. [Online]. Available: http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/3264

[21] J. V. Barrera Leyva and R. N. Tullume Niquen, 'Carbón activado de cascarilla de Oryza Sativa para la Adsorción de Arsénico y Plomo en aguas para consumo humano.', Mar. 2024, Accessed: Oct. 13, 2025.

[Online]. Available: http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/13018
[22]K. J. Paricoto Leon, 'Efecto del hueso carbonizado con parámetros operativos en la adsorción de arsénico en soluciones acuosas y aplicación en aguas subterráneas de la ciudad de Juliaca', 2024, Accessed: Oct. 05, 2025. [Online]. Available: https://repositorio.unaj.edu.pe//handle/unaj/155
[23]W. M. Hoyos-Alayo, 'Frugal Innovation in Industrial Water Treatment Processes in Emerging Economies (2015–2025): A Systematic Review.', in *Proc. LACCEI int. multi-conf. eng. educ. technol.*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2025. doi: 10.18687/LEIRD2025.1.1.140.
[24]W. M. Hoyos-Alayo, 'Global knowledge structure of eco-anxiety and climate action: a multidimensional bibliometric analysis', *Aibi. Rev. Investig. Adm. Ing.*, vol. 13, no. 3, 2025, doi: 10.15649/2346030X.5606.
[25]W. Manuel Hoyos Alayo, 'Bioadsorption of arsenic by fruit residues: A systematic review', in *Proc. LACCEI int. multi-conf. eng. educ. technol.*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2025. doi: 10.18687/LACCEI2025.1.1.589.
[26]ANA, 'Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales', *Autoridad Nacional del Agua*, p. 92, Mar. 2016, Accessed: Oct. 16, 2025. [Online]. Available: https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/209
[27]W. M. Hoyos-Alayo, J. E. Vélez-Verona, A. C. Pérez-Sandoval, and A. L. Yenque-Aguilar, 'Comparative Effectiveness of Emerging and Conventional Technologies for Arsenic Removal in Drinking Water: A Systematic Review (2015–2025)', in *Proc. LACCEI int. multi-conf. eng. educ. technol.*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2025. doi: 10.18687/LEIRD2025.1.1.216.
[28]W. M. Hoyos-Alayo, J. L. Leiva-Piedra, J. L. Amaro-Mellado, and 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, no. 1, pp. 58–83, 2026, doi: 10.66205/rvbma.v14i1.1980.
[29]W. M. Hoyos-Alayo and 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, no. 15, 2026, doi: 10.18226/25253824.v10.n15.04.
[30]M. Senila, 'Recent Advances in the Determination of Major and Trace Elements in Plants Using Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry', *Molecules*, vol. 29, no. 13, 2024, doi: 10.3390/molecules29133169.
[31]W. M. Lim, 'What Is Quantitative Research? An Overview and Guidelines', *Australas. Mark. J.*, vol. 33, no. 3, pp. 325–348, 2025, doi: 10.1177/14413582241264622.
[32]W. Manuel Hoyos Alayo, 'Bioadsorption of arsenic by fruit residues: A systematic review', in *Proc. LACCEI int. multi-conf. eng. educ. technol.*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2025. doi: 10.18687/LACCEI2025.1.1.589.
[33]A. Y. C. Barrios, M. B. Seclen, W. M. H. Alayo, and J. L. L. Piedra, 'Application of a waxy coating to improve the quality and marketing of Tahiti lemons.', in *Proc. LACCEI int. multi-conf. eng. educ. technol.*, Larrondo Petrie M.M., Texier J., and Matta R.A.R., Eds, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2024. doi: 10.18687/LEIRD2024.1.1.246.
[34]J. L. L. Piedra, W. M. H. Alayo, Z. B. C. Romero, and M. F. Miranda, 'Environmental research from a European and Latin American perspective. A literature review', in *Proc. LACCEI int. multi-conf. eng. educ. technol.*, Larrondo Petrie M.M., Texier J., and Matta R.A.R., Eds, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2024. doi: 10.18687/LEIRD2024.1.1.253.
[35]Y. GadelHak, M. El-Azazy, M. F. Shibl, and R. K. Mahmoud, 'Cost estimation of synthesis and utilization of nano-adsorbents on the laboratory and industrial scales: A detailed review', *Sci. Total Environ.*, vol. 875, 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162629.
[36]J. O. Ighalo, F. O. Omoarukhe, V. E. Ojukwu, K. O. Iwuozor, and C. A. Igwegbe, 'Cost of adsorbent preparation and usage in wastewater treatment: A review', *Cleaner Chemical Engineering*, vol. 3, p. 100042, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.clce.2022.100042.
[37]S. Duany-Timosthe, T. Arias-Lafargue, T. Bessy-Horruitiner, and D. Rodríguez-Heredia, 'Bioadsorbentes no convencionales empleados en la remoción de metales pesados. Revisión', *Tecnología Química*, vol. 42, no. 1, pp. 94–113, Apr. 2022, Accessed: Sep. 27, 2025. [Online]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2224-61852022000100094&lng=es&nrm=iso&tlng=es
[38]M. R. Dionisio Humberto, N. D. León-Caballero, J. P. Arrubla-Vélez, M. A. Quintero-Naucil, and V. Aristizábal-Marulanda, 'Pyrolysis of Hass Avocado (*Persea americana*) Seeds: Kinetic and Economic Analysis of Bio-oil, Gas, and Biochar Production', *Bioenerg. Res.*, vol. 18, no. 1, p. 33, Mar. 2025, doi: 10.1007/s12155-025-10834-y.