

Bioadsorption of arsenic by fruit residues: A systematic review

Walter Manuel Hoyos Alayo¹ 

¹Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c23712@utp.edu.pe

Abstract– Arsenic contamination, from natural and anthropogenic sources, is a critical problem affecting water quality, with serious risks to human health, such as cancer and cardiovascular diseases. This study systematically reviews the use of fruit waste as a biosorbent for arsenic removal, highlighting its potential as an economical and sustainable alternative to other technologies. Through a literature search in SCOPUS, 15 relevant publications were analysed, complemented with bibliometric studies processed using VOSviewer. The results show removal efficiencies ranging from 6% to 92%, with lemon and passion fruit peels being the most effective due to their abundance of active functional groups and porous structure, while wastes such as apple and banana showed lower capacities; although chemical and physical modifications significantly improve performance, heterogeneity in waste composition and competition with other pollutants limit their applicability on a large scale. It is concluded that bioadsorption not only offers a sustainable solution to the arsenic problem, but also fosters the circular economy through the valorisation of organic wastes, requiring further efforts to standardise treatments and expand its industrial viability.

Keywords– Arsenic contamination; Biosorbents; Fruit waste; Contaminant removal; Circular economy.

Bioadsorción de arsénico mediante residuos de frutas: Una revisión sistemática

Walter Manuel Hoyos Alayo¹ 

¹Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c23712@utp.edu.pe

Resumen– La contaminación por arsénico, proveniente de fuentes naturales y antropogénicas, es un problema crítico que afecta la calidad del agua, con riesgos graves para la salud humana, como cáncer y enfermedades cardiovasculares. Este estudio revisa de manera sistemática el uso de residuos de frutas como biosorbentes en la remoción de arsénico, destacando su potencial como una alternativa económica y sostenible frente a otras tecnologías. A través de una búsqueda bibliográfica en SCOPUS, se analizaron 15 publicaciones relevantes, complementadas con estudios bibliométricos procesados mediante VOSviewer. Los resultados muestran eficiencias de remoción que van del 6% al 92%, siendo las cáscaras de limón y maracuyá las más eficaces gracias a su abundancia de grupos funcionales activos y su estructura porosa, mientras que residuos como los de manzana y plátano mostraron menores capacidades; aunque las modificaciones químicas y físicas mejoran significativamente el desempeño, la heterogeneidad en la composición de los residuos y la competencia con otros contaminantes limitan su aplicabilidad a gran escala. Se concluye que la bioadsorción no solo ofrece una solución sostenible al problema del arsénico, sino que también fomenta la economía circular mediante la valorización de residuos orgánicos, requiriendo esfuerzos adicionales para estandarizar tratamientos y ampliar su viabilidad industrial.

Palabras clave– Contaminación por arsénico; Biosorbentes; Residuos de frutas; Remoción de contaminantes; Economía circular.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación por arsénico representa uno de los problemas ambientales más graves a nivel global, particularmente en cuerpos de agua utilizados para consumo humano y actividades industriales [1]; asimismo, este metaloide, que puede estar presente en el agua tanto por fuentes naturales como antrópicas, es altamente tóxico incluso en concentraciones muy bajas [2], además, el consumo prolongado de agua contaminada con arsénico puede generar serios riesgos para la salud, incluyendo enfermedades como el cáncer, problemas cardiovasculares y trastornos neurológicos, lo que subraya la necesidad de desarrollar métodos de tratamiento efectivos y sostenibles para su remoción [3], [4].

Frente a estas preocupaciones, la bioadsorción ha surgido como una tecnología prometedora para la eliminación de arsénico en agua [5]; este proceso utiliza materiales biológicos, como residuos de frutas y otros subproductos agroindustriales, que poseen grupos funcionales capaces de interactuar y retener moléculas de arsénico presentes en el agua [6], [7]; asimismo, además de su alta eficiencia en la captura de contaminantes, la bioadsorción se destaca por su bajo costo, simplicidad operativa y enfoque sostenible, ya que promueve la reutilización de residuos orgánicos [8], [9]. En particular, los residuos de frutas, como las cáscaras de plátano, naranja, manzana y mango, han sido objeto de investigación

debido a su alta capacidad de adsorción de metales pesados, incluyendo arsénico [10], [11]; esto se debe a que estos materiales contienen componentes bioquímicos como celulosa, hemicelulosa y lignina, que están funcionalizados con grupos carboxílicos, hidroxilos y fenólicos, los cuales facilitan la captura eficiente de especies arsenicales como el arseniato (As(V)) y el arsenito (As(III)) [12], [13]; además, esta propiedad, combinada con su abundancia y bajo costo, convierte a los residuos de frutas en biosorbentes ideales para el tratamiento de agua contaminada [14], [15].

Sin embargo, a pesar de los avances en la utilización de biosorbentes derivados de residuos de frutas, existen desafíos significativos para su aplicación a gran escala [16], [17]; entre ellos se encuentran la variabilidad en la composición de los residuos, la necesidad de modificaciones químicas o físicas para mejorar su capacidad adsorbente, y la regeneración y disposición adecuada de los biosorbentes saturados [18], [19]; en ese sentido, estos aspectos requieren una investigación más profunda para optimizar tanto la eficiencia como la viabilidad económica y ambiental de este enfoque [20], [21].

Este manuscrito describe la metodología empleada en la revisión sistemática, incluyendo las estrategias de búsqueda. Luego, se presenta una revisión de la literatura sobre bioadsorción y su aplicación en la remoción de arsénico en cuerpos de agua. Se detallan los principios del proceso, los biosorbentes estudiados y los factores que influyen en su eficiencia. Posteriormente, se discuten los resultados obtenidos, destacando la eficacia de distintos biosorbentes y sus condiciones óptimas de uso. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones. En este contexto, se tiene por objetivo explorar y analizar críticamente la bioadsorción como tecnología predominante en la remoción de arsénico, buscando proporcionar una visión exhaustiva de los avances más recientes en este campo, evaluando la eficiencia, sostenibilidad y viabilidad de diversas metodologías innovadoras; asimismo, se pretende identificar las fortalezas y limitaciones, destacando su potencial para superar los desafíos actuales; por lo tanto, para alcanzar estos objetivos, también se investigará la evolución de las publicaciones científicas a lo largo de los años, se identificarán los países con mayor cantidad de publicaciones y las áreas de investigación asociadas al tema; además, se analizarán la co-ocurrencia y evolución de palabras clave relevantes en la literatura.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Estrategia de búsqueda y selección de artículos.

Se optó por agrupar palabras clave para cada elemento de la pregunta PICOC, aplicando el operador booleano (OR), ver

Tabla I; estos términos clave, estructurados en una fórmula de búsqueda, nos permitieron una exploración bibliográfica lógica en SCOPUS que posibilitó la recuperación de 15 publicaciones científicas; importante señalar que la obtención de solo 15 artículos al aplicar la fórmula de búsqueda se debe a la alta especificidad y novedad del tema, ya que la bioadsorción de arsénico utilizando cáscaras o residuos de frutas es un área de investigación emergente que combina varios conceptos técnicos poco explorados conjuntamente; asimismo, esta limitación también se atribuye al diseño de la fórmula, la cual utiliza operadores booleanos para filtrar estrictamente artículos que incluyan combinaciones exactas de palabras clave, excluyendo trabajos que empleen sinónimos o términos relacionados como "agricultural waste" o "pulp"; además, factores como restricciones de indexación en Scopus, especialmente para investigaciones provenientes de revistas regionales, y la especificidad terminológica refuerzan el bajo número de resultados obtenidos; sin embargo, esta cantidad limitada de artículos garantiza una mayor relevancia de la literatura encontrada, al tiempo que evidencia una oportunidad significativa para contribuir a un campo novedoso y en desarrollo.

TABLA I
PALABRAS CLAVE SELECCIONADAS Y SINTAXIS DE BÚSQUEDA

Componente	Descripción	Palabras Clave	Sintaxis de búsqueda
Problema	Contaminación por Arsénico	Arsenic contamination	arsenic
Intervención	Bioadsorción del Arsénico	Bioadsorption of arsenic	bioadsorption OR biosorption
Comparación	Eficiencia de los bioadsorbentes	Efficiency of bioadsorbents	-
Resultado	Frutas con capacidad de bioadsorción	Fruits with bioadsorption capacity	fruit OR fruits
Contexto	Cáscara de la fruta	Fruit peel	shell OR husk OR peel OR waste

Realizadas las interacciones de búsqueda, se obtuvo la siguiente ecuación: (TITLE-ABS-KEY (bioadsorption OR biosorption) AND TITLE-ABS-KEY (arsenic) AND TITLE-ABS-KEY (shell OR husk OR peel OR waste) AND TITLE-ABS-KEY (fruit OR fruits)).

Adicionalmente, se generaron representaciones gráficas y redes bibliométricas para analizar la bioadsorción aplicada a la remoción de arsénico mediante el software VOSviewer versión 1.6.20. Para este análisis, se aplicó una fórmula de búsqueda más general (TITLE-ABS-KEY (bioadsorption OR biosorption) AND TITLE-ABS-KEY (arsenic)) que permitió recuperar 596 publicaciones; este incremento en la cantidad de artículos se debe a la mayor amplitud semántica de la fórmula de búsqueda, que abarca un rango más amplio de investigaciones sobre bioadsorción de arsénico sin limitarse a residuos de frutas o conceptos estrechamente relacionados; en ese sentido, esta estrategia generalizada tiene como objetivo identificar patrones y tendencias generales en la investigación bibliográfica, permitiendo explorar un panorama

más completo de las áreas de estudio relacionadas con la bioadsorción de arsénico; además, las redes resultantes ayudan a visualizar las interrelaciones entre conceptos y palabras clave, ofreciendo un contexto valioso para comprender cómo encajan los estudios específicos sobre residuos de frutas dentro del ámbito más amplio de la bioadsorción.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. *¿Cuál es el papel fundamental de la bioadsorción como tecnología predominante para la remoción de arsénico de aguas residuales?*

La bioadsorción es una tecnología emergente altamente eficiente, económica y sostenible para la remoción de arsénico, que destaca por su capacidad de capturar especies tóxicas como arsenito (As(III)) y arseniato (As(V)) mediante interacciones químicas y físicas facilitadas por los grupos funcionales presentes en materiales biológicos como residuos de frutas [11], [15]; en ese sentido, frente a otras tecnologías como la ósmosis inversa, ofrece un enfoque de bajo costo que aprovecha desechos agroindustriales abundantes, fomentando la economía circular y reduciendo costos [20], [22]; además, su flexibilidad para operar bajo diversas condiciones (pH, temperatura y coexistencia de contaminantes), sumada a su fácil implementación en comunidades con recursos limitados, la convierte en una herramienta clave para el tratamiento del agua en áreas rurales [23], [24], [25]; asimismo, aunque enfrenta desafíos como la regeneración de biosorbentes saturados y la variabilidad en la capacidad adsorbente, estos pueden superarse mediante investigaciones continuas que optimicen su aplicación a escala industrial [10], [15]; en síntesis, la bioadsorción no solo aborda un problema ambiental y de salud pública global, sino que también impulsa soluciones sostenibles en la gestión del agua, consolidándose como una alternativa prometedora para un futuro más ecológico y accesible [26], [27].

B. *¿Cuáles son las principales propiedades químicas y físicas que determinan la eficacia de los residuos de frutas como biosorbentes para arsénico?*

La eficacia de los residuos de frutas en la remoción de arsénico depende de una combinación de factores químicos y físicos que determinan su capacidad de adsorción, ver Tabla II; en primer lugar, la composición química de estos materiales es esencial debido a que los grupos funcionales activos presentes, como carboxilos, hidroxilos y fenoles, ofrecen sitios específicos para la interacción con arsénico, ya sea mediante enlaces covalentes o intercambio iónico [10], [22], [28]; estos grupos, distribuidos en componentes como la celulosa y la lignina, son particularmente eficaces para capturar tanto arseniato (As(V)) como arsenito (As(III)) [10], [20]; asimismo, compuestos secundarios como pectinas y taninos contribuyen mediante interacciones intermoleculares adicionales, lo que aumenta la afinidad hacia estos metaloides [20], [29].

Por otro lado, las propiedades físicas de los residuos juegan un papel crucial debido a que una estructura porosa con meso y microporos facilita la accesibilidad al arsénico, mientras que el tamaño reducido de partícula incrementa la superficie específica disponible para adsorción [10], [15], [30]; sin embargo, un tamaño excesivamente pequeño puede causar inconvenientes en sistemas de tratamiento continuo [31]; además, el contenido de humedad y cenizas influye en la funcionalidad del biosorbente [32]; niveles bajos de humedad concentran los sitios activos, mientras que la presencia de cenizas puede obstruir los poros y reducir la eficiencia [33], [34]. Otro aspecto relevante es el comportamiento del biosorbente frente a las condiciones del medio como la carga superficial de los residuos y el pH del medio que determinan su interacción con las especies arsenicales [35]; por debajo de su punto de carga cero, el material adquiere carga positiva, favoreciendo la atracción de especies aniónicas como As(V) [36]; sin embargo, la presencia de otros aniones en el agua,

como fosfatos y sulfatos, puede competir por los sitios activos y disminuir la adsorción [37], [38].

Además, las modificaciones físicas y químicas mejoran significativamente el desempeño de los residuos [39], [40]; por ejemplo, la activación química con ácidos o bases incrementa la densidad de grupos funcionales activos, mientras que la calcinación controla la estructura porosa y elimina material no funcional [41]; por lo tanto, estas técnicas optimizan tanto la capacidad como la selectividad del biosorbente hacia diferentes especies de arsénico [42].

Finalmente, los factores cinéticos y termodinámicos influyen en el proceso de adsorción [11], [28], [30]; la cual, generalmente es exotérmico, por lo tanto, se puede favorecer a temperaturas ambientales menores de 25°C [24]; asimismo, residuos ricos en lignina, aunque eficientes, presentan cinéticas más lentas debido a restricciones difusivas [10], [43], mientras que los que contienen pectina muestran una mayor velocidad de adsorción gracias a su alta hidrofiliidad [20].

TABLA II
PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS Y SU IMPACTO EN LA BIOADSORCIÓN DE ARSÉNICO

Propiedades	Características Principales	Impacto en la Bioadsorción de Arsénico	Autor
Composición química	Presencia de carboxilos, hidroxilos y fenoles en celulosa, hemicelulosa y lignina.	Incrementa la interacción química con As(V) y As(III) mediante enlaces iónicos y covalentes.	[20]
Estructura porosa	Meso y microporos naturalmente presentes en los residuos.	Mejora la accesibilidad a los sitios activos y aumenta la capacidad de adsorción.	[30]
Tamaño de partícula	Menor tamaño implica mayor superficie específica.	Facilita la interacción rápida, aunque tamaños muy pequeños dificultan el uso en sistemas continuos.	[10], [20]
Contenido de humedad y cenizas	Baja humedad concentra los sitios activos; alto contenido de cenizas puede bloquear poros.	La eficiencia de adsorción mejora con humedad baja, mientras que las cenizas deben controlarse para evitar obstrucciones.	[32], [34]
Carga superficial	Depende del pH, modulado por el punto de carga cero (pHpzc).	Favorece la adsorción de especies arsenicales cargadas negativamente en medios ácidos.	[20], [35]
Activación química	Tratamientos con ácidos o bases aumentan la densidad de grupos funcionales activos.	Incrementa significativamente la capacidad y selectividad del biosorbente hacia el arsénico.	[10], [44]
Calcinación	Mejora la porosidad y elimina componentes no funcionales.	Aumenta la estabilidad estructural y la accesibilidad a sitios activos.	[23]
Competencia de contaminantes	Otros aniones como fosfatos y sulfatos compiten por los sitios activos.	Puede reducir la eficiencia en sistemas con contaminantes múltiples.	[45], [46]
Cinética y termodinámica	La adsorción es un proceso exotérmico, favorecido a temperatura ambiente, con velocidades moduladas por la hidrofiliidad o la densidad de lignina en el biosorbente.	Las condiciones ambientales optimizan el proceso, mientras que residuos con mayor hidrofiliidad presentan mejor eficiencia cinética.	[24], [25]

C. ¿Qué modificaciones tecnológicas pueden mejorar la eficiencia de bioadsorción de los residuos de frutas para arsénico?

Las modificaciones tecnológicas juegan un papel crucial en la optimización de la bioadsorción de arsénico utilizando residuos de frutas, permitiendo un incremento sustancial en la eficiencia y la selectividad del proceso, ver Tabla III y IV; en ese contexto, los tratamientos químicos han demostrado ser una estrategia efectiva para potenciar la funcionalidad de los biosorbentes [10], [47]; el uso de ácidos como sulfúrico o cítrico introduce una mayor cantidad de grupos carboxílicos, lo que incrementa significativamente la afinidad hacia especies arsenicales [44]; simultáneamente, los tratamientos básicos con hidróxido de sodio aumentan la alcalinidad superficial, favoreciendo la interacción con As(V) en medios ácidos [10]; de manera complementaria, las modificaciones

físicas, como la trituración o el tamizado, amplían la superficie específica y mejoran la difusión del arsénico en la estructura porosa del material [10], [48]. Por otro lado, la impregnación de los residuos con metales activos, como hierro o manganeso, ha mostrado una notable mejora en la remoción de arsénico [49]; esta tecnología permite la formación de complejos específicos con As(III) mediante mecanismos de coprecipitación, logrando eficiencias superiores al 95% [50], [51]; adicionalmente, los pretratamientos térmicos, como la calcinación controlada, eliminan la materia orgánica no funcional y estabilizan la estructura del biosorbente, asegurando una mayor durabilidad y rendimiento [32]; a su vez, la combinación de estas estrategias también puede adaptarse para mejorar el rendimiento en condiciones de flujo continuo, ampliando su aplicación a escala industrial [23], [52].

TABLA III
MODIFICACIONES TECNOLÓGICAS PARA LA BIOADSORCIÓN DE ARSÉNICO

Modificación	Descripción	Impacto en la eficiencia	Autor
Activación química	Tratamientos con ácidos (sulfúrico, cítrico) o bases (NaOH) que incrementan grupos funcionales como carboxilos e hidroxilos.	Mejora la afinidad hacia As(V) y As(III), aumentando la capacidad de adsorción y selectividad.	[53], [54]
Modificaciones físicas	Trituración, tamizado y generación de poros mediante métodos controlados.	Aumenta la superficie específica y optimiza la difusión del contaminante en la matriz adsorbente.	[1]
Impregnación metálica	Incorporación de nanopartículas o sales de hierro, manganeso o aluminio.	Promueve mecanismos de co-precipitación y adsorción específica, mejorando la captura de As(III).	[36]
Pretratamientos térmicos	Secado, calcinación controlada (<400 °C) para eliminar material no funcional y estabilizar la estructura.	Incrementa la estabilidad y la exposición de los sitios activos.	[4], [54]
Sistemas híbridos	Combinación de residuos con polímeros (quitosano) o materiales como arcillas o carbón activado.	Mejora la capacidad adsorbente y la estabilidad estructural en condiciones acuosas.	[55]
Regeneración	Lavados químicos con soluciones salinas, ácidas o básicas para restaurar la capacidad del biosorbente tras saturación.	Reduce costos operativos, permitiendo reutilización sin pérdida significativa de eficiencia.	[15], [56]
Adaptación a sistemas de flujo	Uso en lechos empacados y reactores de flujo continuo para mejorar el contacto entre adsorbente y solución contaminada.	Maximiza la remoción en aplicaciones industriales, manteniendo altos rendimientos operativos.	[52], [57]

TABLA IV
EFICIENCIAS DE REMOCIÓN DE ARSÉNICO PARA DISTINTOS BIOADSORBENTES

Tipo de Bioadsorbentes	Descripción	Eficiencia	Autor
Residuos de manzana, cáscara de plátano.	Contiene celulosa, hemicelulosa, pectina y lignina; muestra estructura porosa y fracturas fibrosas.	6%	[20]
Perlas de cáscara de pepino.	La cáscara de pepino se inmovilizó en una perla de alginato de sodio. Contiene componentes orgánicos y presenta una superficie porosa. Los estudios cinéticos indican diferentes mecanismos de biosorción para cada metal en soluciones multiónicas.	21%	[30]
Biomasa de plantas y residuos agrícolas.	Incluye cáscaras de frutas, paja, y fibra de coco. Contienen celulosa, hemicelulosa y lignina con grupos funcionales como hidroxilos, carboxilos, fenoles, aminas y sulfhidrilos que facilitan la adsorción de metales.	12%	[10]
Semilla de ciruela de Java	Contiene grupos funcionales similares (-OH, -COOH, -NH ₂ y azufre). También tiene una superficie irregular que mejora la capacidad de adsorción.	78% para As(III) a pH 7; 67% para As(V) a pH 5.3.	[15]
Cáscara de granada	Material vegetal con funcionalidad orgánica que facilita la eliminación de As.	65% para As(III) a pH 7.	
Cáscara de <i>Cucumis pubescens</i>	Biosorbente derivado de la cáscara de una fruta autóctona, caracterizado mediante FTIR y SEM. Muestra afinidad para la adsorción de As(III) y As(V) a través de quimisorción, según el modelo de Dubinin-Radushkevich. La biosorción es espontánea y exérgica.	Alta eficiencia, > 90%, optimizada según pH (3-11), dosis (2-6 g/L), y temperatura (303-323 K).	[11]
Cáscara del fruto de <i>Strychnos nux vomica</i>	Biosorbente lignocelulósico caracterizado por su capacidad de adsorber contaminantes metálicos a través de modelos como Thomas y BDST. Su eficiencia se optimiza con un mayor tamaño del lecho y flujo moderado en sistemas columna.	92%	[52]
Residuos de naranja	Biomasa derivada de residuos de naranja. Los principales grupos funcionales responsables de la adsorción son hidroxilo (-OH) y carboxilo (-COOH). La biosorción se estudió en sistemas por lotes y en columnas fluidizadas.	90%	[23]
Cáscara de naranja	La cáscara de naranja es un biosorbente de bajo costo utilizado en la remoción de As(III) en agua contaminada. Se investigaron varios parámetros como tamaño de malla, pH, temperatura, dosis del adsorbente y tiempo de contacto en un sistema por lotes. Análisis fisicoquímicos mediante SEM y FTIR.	82.45% de remoción a condiciones óptimas (pH 7, 30°C, 90 minutos, 4 g/L).	[24]
Polvo de hojas de mango (MLP) y cascarilla de arroz (RH)	El estudio aborda la biosorción de As(III) usando MLP y RH en un sistema por lotes. Se analizó la textura superficial de los biosorbentes y los grupos funcionales responsables de la adsorción mediante SEM y FTIR. El proceso de adsorción se ve favorecido por un aumento de temperatura.	Eficiencia de hasta 86.3% a pH 7.	[44]
Cáscaras de limón	Las cáscaras de limón fueron caracterizadas químicamente y utilizadas para la remoción de As(V) en agua contaminada. Los experimentos de contacto de arsénico demostraron que el modelo empírico de Lagergren se ajustó a los datos experimentales, con un coeficiente de correlación de R=0.8841.	474.8 µg de As(V) / g de biosorbente (90%)	[58]
Cáscaras de naranja	Se investigó la capacidad de adsorción de As(V) utilizando cáscaras de naranja en muestras de agua subterránea real. Se optimizaron parámetros como pH, velocidad de agitación, tiempo de contacto, dosis, concentración, volumen y temperatura.	85% a pH 7	[59]
Cáscara de maracuyá y fibra de cáscara de maracuyá	Los residuos sólidos de la industria alimentaria nacional, como la cáscara de maracuyá y la fibra de la cáscara, fueron evaluados como biosorbentes para la remoción de arsénico (As(III) y As(V)) en muestras de agua de la región Lagunera, Coahuila, México.	Remoción del 92%, sin tratamientos adicionales.	[25]

La Tabla IV pone de manifiesto una notable variabilidad en las eficiencias de remoción de arsénico entre distintos bioadsorbentes; las cáscaras de limón y maracuyá demostraron una alta eficiencia de adsorción, alcanzando el 90% y 92%,

respectivamente, lo que las posiciona como biosorbentes muy prometedores [29], [57]; estas eficiencias destacan por su probable relación con la alta densidad de grupos funcionales carboxílicos y fenólicos presentes en su matriz lignocelulósica, que facilitan una interacción efectiva con las especies arsenicales [13], [58]; en contraste, las cáscaras de manzana y plátano presentaron una eficiencia de remoción del 6%, evidenciando limitaciones en su composición química o estructural para la adsorción de arsénico [25]; esto podría deberse a una menor proporción de grupos funcionales activos o una estructura menos porosa, aspectos críticos para un contacto efectivo entre el adsorbente y el contaminante [27], [59]; en ese sentido, estos resultados destacan la importancia de caracterizar y, potencialmente, modificar químicamente los bioadsorbentes menos eficientes para mejorar su desempeño, apuntando hacia su mayor viabilidad en aplicaciones ambientales [28], [29]. Finalmente, el desarrollo de sistemas regenerativos para biosorbentes saturados permite maximizar su reutilización, reduciendo los costos operativos [13], [19]; los lavados químicos con soluciones salinas o ácidas restauran la funcionalidad del material sin afectar su integridad estructural [60]; por lo tanto, estas modificaciones tecnológicas potencian la aplicación de residuos de frutas como biosorbentes sostenibles y accesibles en la remoción de arsénico [14], [56].

D. ¿Qué ventajas y desventajas tiene la aplicación de la bioadsorción a partir de cáscaras de frutas?

La aplicación de la bioadsorción mediante cáscaras de frutas se perfila como una estrategia innovadora y sostenible para el tratamiento de aguas contaminadas con arsénico [60]; por lo tanto, esta tecnología, que aprovecha residuos agroindustriales ampliamente disponibles y de bajo costo, representa una solución económica ideal para comunidades con recursos limitados donde los métodos convencionales de tratamiento son inaccesibles [22], [38]; además, el enfoque contribuye a la sostenibilidad al fomentar la valorización de residuos orgánicos, reduciendo la generación de desechos y promoviendo modelos de economía circular basados en la reutilización [20].

Desde el punto de vista técnico, las cáscaras de frutas poseen una capacidad de adsorción significativa gracias a su composición química, rica en polisacáridos y compuestos bioactivos como lignina, celulosa y pectina [10], [20]; estos componentes ofrecen una abundancia de grupos funcionales, como carboxilos, hidroxilos y fenoles, que facilitan la captura de especies arsenicales como As(V) y As(III) [10]; asimismo, su biodegradabilidad y la ausencia de subproductos tóxicos al final de su ciclo de vida convierten a estas biomoléculas en una alternativa ambientalmente compatible frente a los adsorbentes sintéticos [61]; por otro lado, su flexibilidad para recibir modificaciones tecnológicas, como impregnaciones metálicas o activaciones químicas, permite optimizar su rendimiento sin necesidad de recurrir a procesos excesivamente complejos [62].

Sin embargo, como toda tecnología emergente, la bioadsorción con cáscaras de frutas presenta limitaciones que deben ser consideradas para evaluar su viabilidad integral [22]; en ese sentido, la heterogeneidad en la composición química y estructural de las cáscaras, ya sea entre tipos de frutas o entre cosechas, puede afectar la reproducibilidad y eficiencia del proceso [28], [53]; asimismo, su capacidad de tratamiento se ve comprometida en sistemas con concentraciones elevadas de arsénico o la presencia de contaminantes competidores, como fosfatos o sulfatos, que disminuyen la eficiencia de adsorción [63].

Adicionalmente, aunque las cáscaras son materiales fácilmente disponibles, a menudo requieren pretratamientos, como secado, trituración o activación química, para incrementar su capacidad de adsorción [33]; estas etapas adicionales incrementan la complejidad del proceso y pueden dificultar su implementación en comunidades con recursos limitados [32]; a esto se suman los desafíos relacionados con la regeneración y disposición de las cáscaras saturadas, ya que, aunque son biodegradables, deben manejarse de forma adecuada para evitar la liberación del arsénico en el medio ambiente [25], [64]; por último, su durabilidad y estabilidad bajo condiciones extremas, como temperaturas elevadas o valores extremos de pH, representan limitaciones adicionales que pueden comprometer su rendimiento en escenarios específicos [65].

E. ¿Cuáles son las limitaciones y desafíos asociados a la bioadsorción a partir de residuos de fruta?

La bioadsorción de arsénico mediante residuos de frutas presenta grandes oportunidades como solución sostenible para la remediación de aguas contaminadas [66]; sin embargo, enfrenta diversas limitaciones y desafíos, ver Tabla V; en ese sentido, los residuos de frutas presentan una composición química heterogénea que varía según el tipo de fruta, las condiciones de cultivo y los procesos de obtención [15]; esto genera inconsistencias en la capacidad de adsorción entre diferentes lotes y afecta su efectividad [67]; aunado a ello, aunque los residuos crudos poseen cierto potencial adsorbente, su eficiencia generalmente requiere pretratamientos físicos o químicos, como la activación química o la impregnación con agentes metálicos, lo que incrementa los costos y puede generar residuos secundarios [68].

Por otra parte, la especificidad de los residuos hacia el arsénico, ya sea en forma de As-III o As-V, puede limitar su rendimiento, especialmente en aguas con múltiples contaminantes [10]; la competencia por los sitios activos entre iones, como fosfatos o sulfatos, reduce la eficiencia del proceso, complicando su aplicación en sistemas reales [59]; además, la degradación biológica de los residuos orgánicos y la disminución de su capacidad tras ciclos repetidos de uso representan un obstáculo para la durabilidad y la reutilización de estos materiales [15].

Desde el punto de vista práctico, la escalabilidad de esta tecnología también supone un desafío; a pesar de los resultados alentadores en laboratorio, la implementación a

gran escala requiere garantizar un suministro constante de residuos de frutas, lo que puede ser complicado por cuestiones logísticas y económicas [69]; asimismo, los costos asociados con el pretratamiento y la regeneración del material pueden superar los beneficios obtenidos, afectando la viabilidad económica del sistema [70]; finalmente, las barreras regulatorias y la aceptación pública constituyen factores críticos que deben considerarse, ya que el uso de desechos para tratar agua potable puede generar dudas entre los consumidores y organismos de control [71]. Para superar estos desafíos, es esencial estandarizar la caracterización de los

residuos y optimizar los métodos de pretratamiento, explorando alternativas de bajo costo y sostenibles [72]; también es crucial fomentar la integración de esta tecnología en sistemas de tratamiento reales mediante proyectos piloto, aprovechando enfoques de economía circular que reduzcan los costos logísticos al emplear residuos locales [20]; por lo tanto, la investigación interdisciplinaria y la colaboración entre sectores podrían acelerar la innovación, haciendo de la bioadsorción una solución técnica y económicamente viable [73].

TABLA V
DESAFÍOS Y PROPUESTAS PARA LA BIOADSORCIÓN DE ARSÉNICO MEDIANTE RESIDUOS DE FRUTAS

Desafíos	Descripción	Propuestas	Autor
Heterogeneidad de residuos	Composición química variable afecta la capacidad de adsorción.	Estandarizar caracterización de residuos y protocolos de tratamiento.	[15]
Necesidad de pretratamiento	Pretratamientos químicos o físicos aumentan costos y generan residuos secundarios.	Desarrollar métodos de activación de bajo costo y sostenibles.	[74]
Competencia por sitios activos	Presencia de otros contaminantes (como fosfatos y sulfatos) reduce eficiencia.	Optimizar diseño de adsorbentes para mejorar especificidad hacia el arsénico.	[58]
Degradación y reutilización	Material orgánico se degrada y pierde capacidad tras ciclos repetidos.	Investigar materiales híbridos o recubrimientos protectores.	[25]
Escalabilidad y logística	Requiere disponibilidad constante de residuos y aumenta costos de transporte y almacenamiento.	Integrar esta tecnología en cadenas de valor agrícola para reducir costos logísticos.	[23]
Costos económicos	Procesos como regeneración pueden superar los beneficios obtenidos.	Realizar análisis costo-beneficio en contextos locales y fomentar la economía circular.	[20]
Barreras regulatorias y sociales	Percepción pública negativa y falta de normativas específicas.	Promover campañas de sensibilización y desarrollo de estándares regulatorios.	[55]

F. Estudios Bibliométricos.

En la Fig. 1 se evidencia que la bioadsorción de arsénico en distintos tipos de agua ha generado un mayor interés académico, especialmente desde el 2016 a la actualidad, periodo que concentra el 72% de las publicaciones. Este patrón refleja una creciente preocupación científica y social por desarrollar tecnologías más sostenibles para el tratamiento de aguas contaminadas, especialmente en regiones afectadas por arsénico [20], [35]. El aumento en la producción académica coincide con el enfoque global hacia estrategias de economía circular y sostenibilidad ambiental, donde la reutilización de desechos, como las cáscaras de frutas, adquiere relevancia [10].

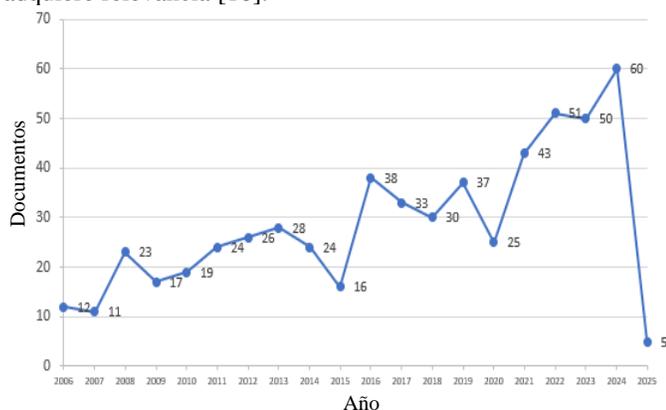


Fig. 1 Publicaciones por año.

En la Fig. 2 se evidencia un cambio significativo en las tendencias de palabras clave, destacándose "bioadsorción" y "arsénico" como dos de las más relevantes a partir del 2016; este auge puede ser atribuido a varios factores; primero, la creciente preocupación ambiental y las regulaciones más estrictas para la calidad del agua han impulsado la búsqueda de soluciones basadas en la economía circular [4], [54].

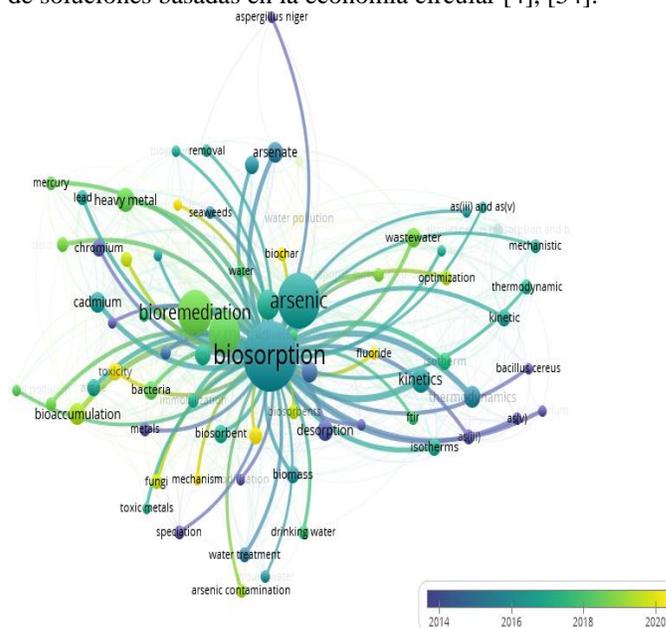


Fig. 2 Evolución de las palabras clave.

cáscaras y la presencia de contaminantes competidores; en ese sentido, estos aspectos resaltan la necesidad de estandarizar tratamientos y desarrollar estrategias para regenerar los biosorbentes.

La implementación enfrenta retos como la heterogeneidad de los materiales y la competencia por sitios activos en sistemas reales; además, la escalabilidad y la percepción social siguen siendo barreras importantes; así también, un enfoque integral que combine tecnologías adaptadas a las condiciones locales puede superar estas limitaciones.

Finalmente, el análisis bibliométrico destaca un interés creciente en la bioadsorción como método de tratamiento para la remoción de arsénico en distintos tipos de agua, con Asia liderando las investigaciones debido a su alta disponibilidad de residuos y necesidades locales.

REFERENCIAS

- [1] S. Umare, A. K. Thawait, y 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, n.º 26, pp. 37877-37906, 2024, doi: 10.1007/s11356-024-33679-y.
- [2] D. Corrales *et al.*, «Phosphate Uptake and Its Relation to Arsenic Toxicity in *Lactobacilli*», *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 25, n.º 9, 2024, doi: 10.3390/ijms25095017.
- [3] S. Bhowmik, S. C. Prajapati, S. Kumar, K. Priyanka, y R. Saxena, «Bioremediation of Arsenic metal from water and soil by *Bacillus* species-A review», *J. Integr. Sci. Technol.*, vol. 13, n.º 2, 2025, doi: 10.62110/sciencein.jist.2025.v13.1038.
- [4] A. Kabiraj, S. Datta, y R. Bandopadhyay, «Arsenic Removal from Water by Using Bacterial Dry Biomasses», *Natl. Acad. Sci. Lett.*, 2024, doi: 10.1007/s40009-024-01467-4.
- [5] R. Sharma, P. R. Agrawal, R. Kumar, y G. Gupta, «Biosorption for Eliminating Inorganic Contaminants (IOCs) from Wastewater», en *Biosorption for Wastewater Contaminants*, Wiley, 2021, pp. 42-62. doi: 10.1002/9781119737629.ch3.
- [6] K. Shahzad *et al.*, «Periphyton biofilms formulation and application for the removal of trace pollutants from water», *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 198, 2025, doi: 10.1016/j.ibiod.2025.106003.
- [7] Z. Zhao, Y. Cheng, J. Li, y Z. Chen, «Enhanced removal of As (III) and As (V) from groundwater with rGO@*Burkholderia cepacia*», *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 12, n.º 5, 2024, doi: 10.1016/j.jece.2024.113599.
- [8] D. Gyawali *et al.*, «Synthesis and characterization of metal oxide based ion exchanger from chicken egg shell biomass for the removal of arsenic from water», *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 30, 2022, doi: 10.1016/j.scp.2022.100870.
- [9] M. Zubair, M. S. Roopesh, y A. Ullah, «Nano-modified feather keratin derived green and sustainable biosorbents for the remediation of heavy metals from synthetic wastewater», *Chemosphere*, vol. 308, 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.136339.
- [10] H. M. Anawar y V. Strezov, «Synthesis of biosorbents from natural/agricultural biomass wastes and sustainable green technology for treatment of nanoparticle metals in municipal and industrial wastewater», en *Emerging and Nanomaterial Contaminants in Wastewater: Advanced Treatment Technologies*, 2019, pp. 83-104. doi: 10.1016/B978-0-12-814673-6.00004-8.
- [11] T. G. Kazi, K. D. Brahman, J. A. Baig, y H. I. Afridi, «A new efficient indigenous material for simultaneous removal of fluoride and inorganic arsenic species from groundwater», *J. Hazard. Mater.*, vol. 357, pp. 159-167, 2018, doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.05.069.
- [12] N. A. Singh, «Biomolecules for removal of heavy metal», *Recent Pat. Biotechnol.*, vol. 11, n.º 3, pp. 197-203, 2017, doi: 10.2174/1872208311666170223155019.
- [13] K. Singh, T. J. M. Sinha, y S. Srivastava, «Functionalized nanocrystalline cellulose: Smart biosorbent for decontamination of arsenic», *Int. J. Miner. Process.*, vol. 139, pp. 51-63, 2015, doi: 10.1016/j.minpro.2015.04.014.
- [14] Y. Rehman, M. Ahmed, y A. N. Sabri, «Potential role of bacterial extracellular polymeric substances as biosorbent material for arsenic bioremediation», *Bioremediation J.*, vol. 23, n.º 2, pp. 72-81, 2019, doi: 10.1080/10889868.2019.1602107.
- [15] M. B. Shakoore *et al.*, «Exploring the arsenic removal potential of various biosorbents from water», *Environ. Int.*, vol. 123, pp. 567-579, 2019, doi: 10.1016/j.envint.2018.12.049.
- [16] S. Banerjee, A. Banerjee, y P. Sarkar, «Statistical optimization of arsenic biosorption by microbial enzyme via Ca-alginate beads», *J. Environ. Sci. Health - Part Toxic Hazardous Subst. Environ. Eng.*, vol. 53, n.º 5, pp. 436-442, 2018, doi: 10.1080/10934529.2017.1409009.
- [17] Z. Rahman y V. P. Singh, «Bioremediation of toxic heavy metals (THMs) contaminated sites: concepts, applications and challenges», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 27, n.º 22, pp. 27563-27581, 2020, doi: 10.1007/s11356-020-08903-0.
- [18] H. Peng, X. Ji, W. Wei, E. Bochamnikova, y V. Matichenkov, «As and Cd Sorption on Selected Si-Rich Substances», *Water. Air. Soil Pollut.*, vol. 228, n.º 8, 2017, doi: 10.1007/s11270-017-3473-7.
- [19] A. Bhardwaj, M. Bansal, K. Wilson, S. Gupta, y M. Dhanawat, «Lignocellulose biosorbents: Unlocking the potential for sustainable environmental cleanup», *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 294, 2025, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2025.139497.
- [20] P. Figueira *et al.*, «Potentialities of Agro-Based Wastes to Remove Cd, Hg, Pb, and As from Contaminated Waters», *Water. Air. Soil Pollut.*, vol. 233, n.º 3, 2022, doi: 10.1007/s11270-022-05543-7.
- [21] W. A. Munzeiwa, D. T. Ruziwa, y N. Chaukura, «Environmental Pollutants: Metal(loid)s and Radionuclides», en *Biotechnology for Environmental Protection*, Springer Nature, 2022, pp. 1-23. doi: 10.1007/978-981-19-4937-1_1.
- [22] M. B. Shakoore *et al.*, «Remediation of arsenic-contaminated water using agricultural wastes as biosorbents», *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, vol. 46, n.º 5, pp. 467-499, 2016, doi: 10.1080/10643389.2015.1109910.
- [23] S. Irem, E. Islam, Q. Mahmood Khan, M. A. Ul Haq, y A. Jamal Hashmat, «Adsorption of arsenic from drinking water using natural orange waste: Kinetics and fluidized bed column studies», *Water Sci. Technol. Water Supply*, vol. 17, n.º 4, pp. 1149-1159, 2017, doi: 10.2166/ws.2017.009.
- [24] S. Kamsonlain, C. Balomajumder, y S. Chand, «Studies on surface characterisation and isotherm modelling: Biosorption of arsenic(III) onto low cost biosorbent derived from orange peel», *J. Sci. Ind. Res.*, vol. 71, n.º 12, pp. 810-816, 2012.
- [25] A. Iliná, J. L. Martínez-Hernández, E. P. Segura-Ceniceros, J. A. Villarreal-Sánchez, y K. M. Gregorio-Jauregui, «Biosorción of arsenic in material derived from maracuya», *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 25, n.º 4, pp. 201-216, 2009.
- [26] S. K. Magsi, I. A. Kandhar, R.-O.-Z. Brohi, y A. Channa, «Removal of metals from water using fish scales as a bio adsorbent», en *AIP Conf. Proc.*, Soomro S.A., Memon S.A., Harijan K., Mirjat N.H., Mahar R.B., y Shaikh S.A., Eds., American Institute of Physics Inc., 2019. doi: 10.1063/1.5115382.
- [27] S. Sharma, S. Singh, S. J. Sarma, K. Misra, y S. K. Brar, «Arsenic removal technologies: Field applications and sustainability», en *Handb. of Water Purity and Quality*, Elsevier, 2021, pp. 271-292. doi: 10.1016/B978-0-12-821057-4.00002-1.
- [28] A. Dadwal y V. Mishra, «Review on Biosorption of Arsenic From Contaminated Water», *Clean - Soil Air Water*, vol. 45, n.º 7, 2017, doi: 10.1002/clen.201600364.
- [29] S. C. R. Santos, H. A. M. Bacele, R. A. R. Boaventura, y C. M. S. Botelho, «Tannin-Adsorbents for Water Decontamination and for the Recovery of Critical Metals: Current State and Future Perspectives», *Biotechnol. J.*, vol. 14, n.º 12, 2019, doi: 10.1002/biot.201900060.
- [30] R. J. Singh, C. E. Martin, D. Barr, y R. J. Rosengren, «Cucumber peel bead biosorbent for multi-ion decontamination of drinking water collected from a mine region in New Zealand», *Environ. Technol. U. K.*, vol. 42, n.º 16, pp. 2461-2477, 2021, doi: 10.1080/09593330.2019.1703824.
- [31] D. De, V. Aniya, y B. Satyavathi, «Application of an agro-industrial waste for the removal of As (III) in a counter-current multiphase fluidized

- beds», *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 16, n.º 1, pp. 279-294, 2019, doi: 10.1007/s13762-018-1651-9.
- [32] «3rd International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development, EESD 2013», *Adv. Mater. Res.*, vol. 864-867, 2014.
- [33] de Lurdes Lopes M., Vilarinho C., y Castro F., Eds., «4th International Conference Wastes: Solutions, Treatments and Opportunities, WASTES 2017», en *WASTES – Sol., Treat. Opp. II - Sel. papers edition Int. Conf. Wastes: Solut., Treat. Opp.*, CRC Press/Balkema, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85058187669&partnerID=40&md5=f25db5fc5c623d08d93b35b2fdbd4057>
- [34] A. Quintáns-Fondo *et al.*, «As(V) sorption/desorption on different waste materials and soil samples», *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 14, n.º 7, 2017, doi: 10.3390/ijerph14070803.
- [35] G. Jaishree *et al.*, «Synergistic approach: Microwave assisted carbonisation and high energy ball milling for bionanomaterial fabrication- Analyzing Thermodynamic and kinetic models for arsenite ion adsorption», *Results Chem.*, vol. 10, 2024, doi: 10.1016/j.rechem.2024.101714.
- [36] S. Aktar, S. Mia, T. Makino, M. M. Rahman, y A. U. Rajapaksha, «Arsenic removal from aqueous solution: A comprehensive synthesis with meta-data», *Sci. Total Environ.*, vol. 862, 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160821.
- [37] K. M. Sarim, R. Shukla, M. S. Bhoyar, B. Kaur, y D. P. Singh, «Arsenic Stress Mitigation Using a Novel Plant Growth-Promoting Bacterial Strain *Bacillus mycoides* NR5 in Spinach Plant (*Spinacia oleracea* L.)», *J. Basic Microbiol.*, vol. 64, n.º 12, 2024, doi: 10.1002/jobm.202400401.
- [38] D. Gyawali *et al.*, «Synthesis, characterization and As(III) scavenging behaviours of mango peel waste loaded with Zr(IV) ion from contaminated water», *Heliyon*, vol. 10, n.º 16, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e36496.
- [39] S. Ghosh, J. Nayak, M. A. Islam, y S. Thongmee, «Arsenic bioremoval using algae: A sustainable process», en *Next-Gener. Algae Vol. I: Appl. in Agric., Food and Environ.*, Wiley, 2023, pp. 91-108. doi: 10.1002/9781119857839.ch3.
- [40] S. Muzammal *et al.*, «Modified Biosorbents as Potential Biomaterials for Arsenic Removal from Contaminated Water», en *Environ. Sci. Eng.*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2023, pp. 335-354. doi: 10.1007/978-3-031-16360-9_16.
- [41] K. Zoroufchi Benis, A. Motalebi Damuchali, K. N. McPhedran, y J. Soltan, «Treatment of aqueous arsenic – A review of biosorbent preparation methods», *J. Environ. Manage.*, vol. 273, 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111126.
- [42] C. K. Jain, D. S. Malik, y A. K. Yadav, «Applicability of plant based biosorbents in the removal of heavy metals: a review», *Environ. Process.*, vol. 3, n.º 2, pp. 495-523, 2016, doi: 10.1007/s40710-016-0143-5.
- [43] A. Chand, P. Chand, G. G. Khatri, y D. R. Paudel, «Enhanced removal efficiency of arsenic and copper from aqueous solution using activated acorus calamus based adsorbent», *Chem. Biochem. Eng. Q.*, vol. 35, n.º 3, pp. 279-293, 2021, doi: 10.15255/CABEQ.2021.1943.
- [44] S. Kamsonlian, S. Suresh, V. Ramanaiah, C. B. Majumder, S. Chand, y A. Kumar, «Biosorptive behaviour of mango leaf powder and rice husk for arsenic(III) from aqueous solutions», *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 9, n.º 3, pp. 565-578, 2012, doi: 10.1007/s13762-012-0054-6.
- [45] P. K. Ghosh *et al.*, «Plant growth-promoting *Bacillus cereus* MCC3402 facilitates rice seedling growth under arsenic-spiked soil», *Biocatal. Agric. Biotechnol.*, vol. 61, 2024, doi: 10.1016/j.bcab.2024.103405.
- [46] D. Gyawali, S. Rijal, P. Basnet, K. N. Ghimire, M. R. Pokhrel, y H. Paudyal, «Effective biosorption of As(V) from polluted water using Fe(III)-modified Pomelo (*Citrus maxima*) peel: A batch, column, and thermodynamic study», *Heliyon*, vol. 9, n.º 2, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13465.
- [47] A. Saravanan *et al.*, «A comprehensive review on sources, analysis and toxicity of environmental pollutants and its removal methods from water environment», *Sci. Total Environ.*, vol. 812, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152456.
- [48] S. K. Das, «Agro-waste based biomass residues valorization for effective adsorption of heavy metal», *Environ. Monit. Assess.*, vol. 196, n.º 11, 2024, doi: 10.1007/s10661-024-13258-x.
- [49] S. Amirmia, T. Asaeda, y C. Takeuchi, «Biominalization of charophytes and their application in arsenic removal from aquatic environment», en *Environ. Arsen. Chang. World - Int. Congr. Exhibit. Arsen. Environ.*, Zhu Y.-G., Zhu Y.-G., Guo H., Guo H., Bhattacharya P., Bhattacharya P., Bundschuh J., Ahmad A., Ahmad A., Ahmad A., Naidu R., y Naidu R., Eds., CRC Press/Balkema, 2018, pp. 504-505. doi: 10.1201/9781351046633-199.
- [50] W. Huang, Z. Huang, Z. Chen, Z. Wu, y Z. Wei, «Biostabilization of cadmium-containing flue gas by sulfate reducing membrane biofilm reactor», *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 167, pp. 469-479, 2022, doi: 10.1016/j.psep.2022.09.014.
- [51] N. Roychowdhury *et al.*, «A potential phytoremediation strategy for arsenic from contaminated drinking water using *Hydrophyllum spinosa* (starthorn leaves)», en *Arsenic in Plants: Uptake, Conseq. and Remediat. Tech.*, Wiley, 2022, pp. 395-410. doi: 10.1002/9781119791461.ch20.
- [52] E. Nakkeeran, C. Patra, T. Shahnaz, S. Rangabhashiyam, y N. Selvaraju, «Continuous biosorption assessment for the removal of hexavalent chromium from aqueous solutions using *Strychnos nux vomica* fruit shell», *Bioresour. Technol. Rep.*, vol. 3, pp. 256-260, 2018, doi: 10.1016/j.biteb.2018.09.001.
- [53] B. M. Anandh, S. Hemavathi, G. Kousalyadevi, y S. P. Shanmuga Priya, «Biosorption potential of neem leave powder for the sequestration of arsenic and chromium metal ions», *Glob. Nest J.*, vol. 25, n.º 10, pp. 1-14, 2023, doi: 10.30955/gnj.005287.
- [54] C. A. Ligarda-Samanez *et al.*, «Modified Polymeric Biosorbents from *Rumex acetosella* for the Removal of Heavy Metals in Wastewater», *Polymers*, vol. 14, n.º 11, 2022, doi: 10.3390/polym14112191.
- [55] M. Zubair, I. Zahara, M. S. Roopesh, y A. Ullah, «Chemically cross-linked keratin and nanochitosan based sorbents for heavy metals remediation», *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 241, 2023, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.124446.
- [56] N. Sahu, J. Singh, y J. R. Koduru, «Removal of arsenic from aqueous solution by novel iron and iron-zirconium modified activated carbon derived from chemical carbonization of *Tectona grandis* sawdust: Isotherm, kinetic, thermodynamic and breakthrough curve modelling», *Environ. Res.*, vol. 200, 2021, doi: 10.1016/j.envres.2021.111431.
- [57] L. C. Maia, L. C. Soares, y L. V. Alves Gurgel, «A review on the use of lignocellulosic materials for arsenic adsorption», *J. Environ. Manage.*, vol. 288, 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112397.
- [58] V. M. Marín-Rangel, R. Cortés-Martínez, R. A. Cuevas Villanueva, M. G. Garnica-Romo, y H. E. Martínez-Flores, «As (V) biosorption in an aqueous solution using chemically treated lemon (*Citrus aurantifolia* Swingle) residues», *J. Food Sci.*, vol. 77, n.º 1, pp. T10-T14, 2012, doi: 10.1111/j.1750-3841.2011.02466.x.
- [59] M. I. Khaskheli, S. Q. Memon, A. N. Siyal, y M. Y. Khuhawar, «Use of orange peel waste for Arsenic remediation of drinking water», *Waste Biomass Valorization*, vol. 2, n.º 4, pp. 423-433, 2011, doi: 10.1007/s12649-011-9081-7.
- [60] K. Iqbal, S. Yahya, M. Jadoon, E. Yaseen, y Z. Nadeem, «Strategies for cadmium remediation in nature and their manipulation by molecular techniques: a comprehensive review», *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 21, n.º 16, pp. 10259-10276, 2024, doi: 10.1007/s13762-024-05690-w.
- [61] R. Lochan Aryal *et al.*, «Effective biosorption of arsenic from water using La(III) loaded carboxyl functionalized watermelon rind», *Arab. J. Chem.*, vol. 15, n.º 3, 2022, doi: 10.1016/j.arabjc.2021.103674.
- [62] J. Bayuo, M. J. Rwiza, y K. M. Mtei, «Non-competitive and competitive detoxification of As(III) ions from single and binary biosorption systems and biosorbent regeneration», *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 14, n.º 14, pp. 15909-15936, 2024, doi: 10.1007/s13399-022-03734-0.
- [63] B. György *et al.*, «Comparative Study of Water and Milk Kefir Grains as Biopolymeric Adsorbents for Copper(II) and Arsenic(V) Removal from Aqueous Solutions», *Polymers*, vol. 16, n.º 23, 2024, doi: 10.3390/polym16233340.
- [64] Y. Thakur, M. Kumar, y S. Singh, «Microbial biosorption as a green technology for bioremediation of heavy metals», *Res. J. Pharm. Biol. Chem. Sci.*, vol. 6, n.º 3, pp. 1717-1724, 2015.
- [65] D. C. Carvalho, L. M. Coelho, L. M. Coelho, H. C. De Rezende, N. M. M. Coelho, y T. S. Neri, «Bioremediation for the removal of arsenic», en *Arsenic Toxic.: Prevention and Treatment*, CRC Press, 2015, pp. 167-186. doi: 10.1201/b18734.

- [66]N. Verma y R. Sharma, «Bioremediation of toxic heavy metals: A patent review», *Recent Pat. Biotechnol.*, vol. 11, n.º 3, pp. 171-187, 2017, doi: 10.2174/1872208311666170111111631.
- [67]A. S. Painuly, R. Gupta, y S. Vats, «Bio-accumulation of arsenic (III) using *Nelumbo nucifera Gaertn*», *J. Health Pollut.*, vol. 9, n.º 23, 2019, doi: 10.5696/2156-9614-9.23.190902.
- [68]B. A. Marinho, R. O. Cristóvão, R. A. R. Boaventura, y V. J. P. Vilar, «As(III) and Cr(VI) oxyanion removal from water by advanced oxidation/reduction processes—a review», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 26, n.º 3, pp. 2203-2227, 2019, doi: 10.1007/s11356-018-3595-5.
- [69]V. Nagarajan, R. Ganesan, S. Govindan, y P. Govind, «Statistical Optimization of As(V) Adsorption Parameters onto Epichlorohydrin/Fe₃O₄ Crosslinked Chitosan Derivative Nanocomposite using Box-Behnken Design», *Acta Chim. Slov.*, vol. 68, n.º 4, pp. 997-1007, 2021, doi: 10.17344/acsi.2021.6998.
- [70]B. Mohebbad, Z. Bonyadi, A. A. Dehghan, y M. H. Rahmat, «Arsenic removal from aqueous solutions using *Saccharomyces cerevisiae*: Kinetic and equilibrium study», *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 38, n.º s1, pp. S398-S402, 2019, doi: 10.1002/ep.13074.
- [71]M. J. H. Libatique, M.-C. Lee, H.-Y. Yeh, y F.-J. Jhang, «Total and inorganic arsenic biosorption by *Sarcodia suiae* (Rhodophyta), as affected by controlled environmental conditions», *Chemosphere*, vol. 248, 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126084.
- [72]R. Ankulkar y M. Chavan, «Characterisation and Application Studies of Sophorolipid Biosurfactant by *Candida tropicalis* RA1», *J. Pure Appl. Microbiol.*, vol. 13, n.º 3, pp. 1653-1665, 2019, doi: 10.22207/JPAM.13.3.39.
- [73]Y. K. Leong y J.-S. Chang, «Bioremediation of heavy metals using microalgae: Recent advances and mechanisms», *Bioresour. Technol.*, vol. 303, 2020, doi: 10.1016/j.biortech.2020.122886.
- [74]J. Chen, W. Tao, y C. Sun, «Biosorption of As(V) onto dried alligator weed root: role of metal (hydro) oxides», *Int. J. Phytoremediation*, vol. 18, n.º 4, pp. 315-320, 2016, doi: 10.1080/15226514.2015.1094447.