

Arsenic Bioadsorption in Groundwater Using Fruit and Vegetable Wastes: A Systematic Literature Review

Lucerito Katherine Ortiz-Garcia¹ 

¹Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c25072@utp.edu.pe

Abstract– Arsenic contamination in groundwater poses a significant public health risk, motivating the development of sustainable treatment alternatives. This study presents a systematic literature review on the use of fruit and vegetable wastes as bioadsorbents for arsenic removal in groundwater. The PRISMA methodology was applied, considering studies published between 2019 and 2025 under defined eligibility criteria. Findings indicate that agro-industrial waste-derived bioadsorbents can achieve removal efficiencies above 80%, while iron-modified materials often exceed 90% in reported cases. Key gaps remain regarding adsorbent regeneration and reuse, anion interference under real-water matrices, and scalability/field validation, which are critical for practical deployment.

Keywords-- Arsenic; bioadsorption; groundwater; agro-industrial wastes; fruit and vegetable residues.

Bioadsorción de arsénico en aguas subterráneas mediante residuos de frutas y hortalizas: revisión sistemática de la literatura

Lucerito Katherine Ortiz-García¹

¹Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c25072@utp.edu.pe

Resumen– El arsénico en aguas subterráneas constituye un riesgo relevante para la salud pública, lo que ha impulsado el desarrollo de alternativas de tratamiento sostenibles. Este estudio presenta una revisión sistemática de la literatura sobre el uso de residuos de frutas y hortalizas como bioadsorbentes para la remoción de arsénico en aguas subterráneas. Se aplicó la metodología PRISMA, considerando estudios publicados entre 2019 y 2025, con criterios de inclusión/exclusión definidos. Los resultados evidencian que los bioadsorbentes derivados de residuos agroindustriales pueden alcanzar eficiencias superiores al 80%, y que la modificación con hierro favorece remociones por encima del 90% en diversos casos reportados. Sin embargo, persisten vacíos relacionados con la regeneración y reutilización, la interferencia de aniones en matrices reales y la escalabilidad/validación en campo, aspectos críticos para la implementación. En conjunto, la revisión sintetiza tendencias, desempeño reportado y desafíos, orientando futuras investigaciones hacia soluciones técnicamente viables y sostenibles.

Palabras clave– Arsénico; bioadsorción; aguas subterráneas; residuos agroindustriales; frutas y hortalizas.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación por arsénico en aguas subterráneas representa un serio problema ambiental y de salud pública a escala mundial, particularmente en regiones con recursos económicos limitados, como ocurre en varias zonas de Latinoamérica y Asia [1]. Según la OMS [2], aproximadamente 140 millones de personas han consumido agua con concentraciones de arsénico que superan el límite provisional de 10 µg/L. El arsénico se clasifica como carcinógeno de clase I debido a su mayor afinidad por los lípidos y su tendencia a depositarse en los tejidos grasos [3]. Según el Estándar de Calidad Ambiental para Agua [4] el máximo de arsénico en agua para ser potabilizadas es de 0.15mg/L, lo que subraya la urgencia de encontrar nuevas estrategias de remoción efectivas y viables [5].

Se han aplicado técnicas convencionales para reducir la concentración de arsénico, tales como degradación microbiológica, la coagulación-floculación, la filtración con membranas, la adsorción con óxidos metálicos y la ósmosis inversa [6], [7], [8] o sinterización de nanomateriales [9], [10].

Sin embargo, varios estudios recientes subrayan limitaciones como el alto consumo energético, la necesidad de reactivos químicos, los elevados costos operativos y la generación de lodos o residuos

secundarios que requieren tratamiento adicional [11]. Estas dificultades resultan particularmente críticas en países con economías emergentes, donde la infraestructura y el presupuesto para el tratamiento de agua son limitados [12].

En este contexto, la bioadsorción aparece como una opción sostenible y de menor costo para el tratamiento de aguas contaminadas con arsénico [13]. Esta técnica aprovecha materiales de origen biológico capaces de retener y remover diversos contaminantes [14], gracias a la presencia de grupos funcionales y compuestos químicos naturales que facilitan la adsorción de iones metálicos y metaloides [15]. Dentro de los materiales bioadsorbentes, destaca el uso de frutas y hortalizas, cuyo volumen de producción y descarte, 45% según la FAO [16], es considerable en muchas regiones del mundo [13].

La posibilidad de utilizar residuos orgánicos, como cáscaras, pulpas o tallos, contribuye no solo a reducir el impacto ambiental asociado a su acumulación, sino también a promover el concepto de economía circular al revalorizar elementos que de otro modo se convertirían en desechos [17].

A pesar de los avances reportados, la literatura científica sobre bioadsorción de arsénico mediante frutas y vegetales sigue presentando lagunas en cuanto a la eficiencia de remoción, las condiciones óptimas de operación y las mejoras que podrían derivarse de pretratamientos físicos, químicos o enzimáticos [18]. Por ello, surge la necesidad de realizar una revisión sistemática para compilar, analizar y sintetizar los hallazgos disponibles, con el fin de determinar la viabilidad de estos materiales y los pasos futuros en su investigación.

En este contexto, la presente revisión sistemática se propone dar respuesta a la pregunta de investigación: “¿Cuál es el estado del arte sobre la bioadsorción de arsénico en aguas subterráneas utilizando residuos de frutas y hortalizas como bioadsorbentes naturales?”. Con este objetivo, se plantea como propósito principal analizar el estado del arte sobre la bioadsorción de arsénico en aguas subterráneas utilizando residuos de frutas y hortalizas como bioadsorbentes naturales, a fin de evaluar su eficacia y viabilidad en la remoción de este contaminante. Para alcanzar este fin, se han definido los siguientes objetivos específicos: (i) Identificar los residuos de frutas y hortalizas reportadas en la literatura

como bioadsorbentes naturales para la remoción de arsénico en aguas subterráneas, (ii) evaluar los mecanismos de bioadsorción empleados por los residuos de frutas y hortalizas en la captura y eliminación de arsénico, (iii) comparar la eficiencia de distintos residuos de frutas y hortalizas en la bioadsorción de arsénico según estudios previos y (iv) analizar los factores que influyen en la capacidad de adsorción, como el pH, la concentración de arsénico y el tiempo de contacto.

II. METODOLOGÍA

En esta revisión sistemática se adoptó la metodología PRISMA, efectuando la búsqueda en la base de datos científica Scopus. En la Tabla I se presenta la selección de palabras clave y las fórmulas de búsqueda diseñadas para cada una de ellas, combinadas con operadores lógicos (AND, OR) a fin de mejorar la precisión y pertinencia de los resultados. Dichas estrategias se aplicaron en la base de datos bajo la restricción de búsqueda exclusiva en el campo “Title/Abstract” de los artículos.

TABLA I
Fórmula de búsqueda para la revisión sistemática

Palabras clave	Fórmula de búsqueda
Arsenic	("arsenic")
Bioadsorption	("bioadsorption" OR "biosorption" OR "adsorption" OR "bioremediation" OR "phytoextraction")
Groundwater	("groundwater" OR "subsurface water" OR "aquifer" OR "drinking water" OR "water pollution")
Fruits and vegetables	("fruits" OR "vegetables")
Waste	("waste")

En la Fig. 1 se presenta el diagrama de flujo PRISMA utilizado para poder recabar la muestra en la base de datos Scopus.

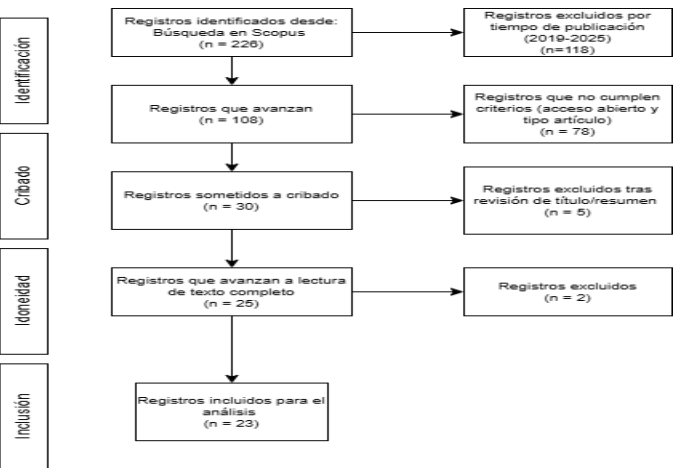


Fig. 1 Diagrama PRISMA

En la fase de identificación, se realizó una búsqueda en la base de datos Scopus utilizando una estrategia que combinó términos relacionados con arsénico, procesos de adsorción o biosorción y diversos frutas y verduras. Con esta ecuación de búsqueda, se recuperaron inicialmente 228 registros. A continuación, se procedió a excluir los que no cumplan con el rango temporal 2019-2025, con lo cual se obtuvieron 108 referencias únicas. Posteriormente se eliminó los registros que no cumplen con los criterios de artículo abierto y tipo artículo. Como consecuencia se obtuvo 30 registros que avanzaron a la fase de cribado.

En la fase de cribado, se revisaron los títulos y resúmenes para determinar si los trabajos cumplían con los criterios de inclusión establecidos. Dichos criterios contemplaban la mención explícita de arsénico, el uso de algún proceso de biosorción o adsorción y la implicación de materiales provenientes de frutas, hortalizas o residuos agroindustriales. Asimismo, durante esta etapa se excluyeron artículos que se enfocaban en matrices diferentes (por ejemplo, suelo o aire) o que no trataban específicamente la remoción de arsénico. Tras este primer tamiz, quedaron 25 estudios que parecían ajustarse adecuadamente a los requisitos definidos.

Con los artículos potencialmente relevantes seleccionados, se pasó a la fase de idoneidad, en la cual se revisaron los textos completos para confirmar que cada estudio cumpliera cabalmente los criterios de inclusión. Además, se consideraron aspectos metodológicos y de calidad, excluyendo aquellos trabajos en los que no existía una experimentación clara sobre la bioadsorción de arsénico con subproductos de frutas u hortalizas o que, tras una lectura detallada, no abordaban de manera concreta el objetivo de la revisión.

Finalmente en la fase de inclusión, se confirmaron 23 artículos que respondían plenamente a la pregunta de investigación. Dichos trabajos sirvieron como base para el análisis y la discusión de resultados, al ofrecer información precisa sobre la efectividad de diversos residuos agroindustriales como biosorbentes de arsénico, las condiciones experimentales de remoción y las eficiencias obtenidas en diversos contextos.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A. Resultados bibliométricos de la revisión sistemática

Los artículos que han sido seleccionados han sido organizados (Tabla II), con el propósito de realizar un examen detallado de las publicaciones científicas más relevantes sobre este tema.

TABLA II
ARTÍCULOS SELECCIONADOS PARA LA REVISIÓN SISTEMÁTICA

Autor	Título
Shehzad K.; Waheed B.; Shehzad A.; Ahmad M.; Meng S.; Jing J.; Chen M.; Xie M.; Xu Y. [19]	“Modified waste orange peels biomass residues for sustainable and promising As(V) removal: Insights into batch and column adsorption experiments and Box-behnken Design (BBD) análisis”
Mirza N.H.; Fujino T. [20]	“Gypsum-based Porous Media Filter with Solid Waste: A Novel Composite for Removing Arsenic (III) from Aqueous Solution”
Ghosh M.; Giri S.; Dey P.; Mandal A. [21]	“Utilization of agrowaste for arsenic biosorption: enhancing efficacy and assessing the suitability of plant and animal growth in post-adsorbed solution”
Xu Liao; Raúl Miranda Avilés; Alma Hortensia Serafin Muñoz; Diana Olivia Rocha Amador; Rebeca Yasmin Perez Rodriguez; Jesús Horacio Hernández Anguiano; Carmen Julia Navarro; Xiaoxiao Zha; Daniela Moncada; María de Jesús Puy Alquiza; Pooja Vinod Kshirsagar; Yanmei Li [22]	“Efficient arsenic removal from water using iron-impregnated low-temperature biochar derived from henequen fibers: performance, mechanism, and LCA análisis”
Nand S.; Kumar S.; Pratap B.; Dubey D.; Naseem M.; Patel A.; Shukla S.; Srivastava P.K.[23]	“Arsenic removal using de-oiled mentha biomass biochar: Adsorption kinetics and the role of iron modification”
Bayuo J.; Rwiza M.J.; Mtei K.M. [13]	“Modeling and optimization of trivalent arsenic removal from wastewater using activated carbon produced from maize plant biomass: a multivariate experimental design approach”
Abou-Hadid A.F.; El-Behairy U.A.; Elmalih M.M.; Amdeha E.; Naggar A.M.A.E.; Taha M.H.; Hussein A.E.M. [24]	“Conversion of corn shell as biomass solid waste into carbon species for efficient decontamination of wastewater via heavy metals adsorption”
Pap S.; Turk Sekulic M.; Tran H.N.; Chao H.-P.; Gilbert P.J.; Gibb S.W.; Taggart M.A.[25]	“Comparison of two carbonaceous supported Fe-rich adsorbents for arsenate removal: A functionalisation and mechanistic study with applicability to groundwater treatment”
Shaibur M.R.; Khatun Y.; Howlader M.; Islam M.M.; Rahman M.W.; Khan A.S.; Ambade B.[15]	“Determination of water quality and efficient removal of arsenic and iron from groundwater using mahogany fruit husk and banana peduncle charcoals”

Di Caprio F.; Altamari P.; Astolfi M.L.; Pagnanelli F.[26]	“Optimization of two-phase synthesis of Fe-hydrochar for arsenic removal from drinking water: Effect of temperature and Fe concentration”
González García A.P.; Carlos Hernández S.; Díaz Jiménez L. [27]	“Agave lechuguilla waste can be applied as biochar-adsorbent to remove arsenic from water”
Xu L.; Shu Z.; Sun S.; Wen Y.; Zhou J. [18]	“Amorphous Fe–Mn binary oxides nanoparticles decorating waste bamboo biomass-based monolith for efficient arsenic removal with column adsorption”
Sakhiya A.K.; Kaushal P.; Vijay V.K. [28]	“Process optimization of rice straw-derived activated biochar and biosorption of heavy metals from drinking water in rural áreas”
Appiah A.N.S.; Damoah L.N.W.; Bensah Y.D.; Amoatey P.K.; Nukpezah D.; Aholouvi A.; Annan E. [14]	“Evaluation of adsorption properties of organic wastes in aqueous media for arsenic removal”
Giri D.D.; Jha J.M.; Srivastava N.; Shah M.; H. Almalki A.; F Alkhanani M.; Pal D.B. [11]	“Waste seeds of Mangifera indica, Artocarpus heterophyllus, and Schizizium commune as biochar for heavy metal removal from simulated wastewater”
Bibi F.; Hussain R.; Iqbal N.; Saeed S.; Waseem M.; Elkaeed E.B.; Al-Anazy M.M.; Haq S. [29]	“Chemical activation and magnetization of onion waste derived carbon for arsenic removal”
Verma L.; Singh J. [1]	“Arsenic adsorption from aqueous solution and groundwater using monometallic (Fe) and bimetallic (Fe/Mn) Tectona biochar synthesized from plant refuse: mechanism, isotherm, and kinetic study”
Kushwaha R.; Singh R.S.; Mohan D. [30]	“Comparative study for sorption of arsenic on peanut shell biochar and modified peanut shell biochar”
Javed K.; Mahmood S.; Ammar M.; Abbas N.; Shah M.Y.; Ahmed T.; Mustafa G. [31]	“Rice husk ash adsorbent modified by iron oxide with excellent adsorption capacity for arsenic removal from water”
Sakhiya A.K.; Vijay V.K.; Kaushal P. [32]	“Development of rice straw biochar through pyrolysis to improve drinking water quality in arsenic and manganese contaminated áreas”
Nguyen T.H.; Loganathan P.; Nguyen T.V.; Vigneswaran S.; Ha Nguyen T.H.; Tran H.N.; Nguyen Q.B. [33]	“Arsenic removal by pomelo peel biochar coated with iron”
Giri D.D.; Jha J.M.; Srivastava N.; Hashem A.; Abd_Allah E.F.; Shah M.; Pal D.B. [34]	“Sustainable removal of arsenic from simulated wastewater using solid waste seed pods biosorbents of Cassia fistula L.”
Liu H.; Li P.; Qiu F.; Zhang T.; Xu J. [35]	“The Application of Eco-Friendly Fe–Al Bimetallic Oxide/Biochar Adsorbent Composites with Waste Rice Husk for Removal of Arsenic at Low Concentration”

Seguidamente, se procedió a clasificar los documentos a partir de ciertos criterios definidos, y los resultados obtenidos se representaron gráficamente. Con ello, se busca ofrecer una

visión amplia de las tendencias y los patrones emergentes en la investigación asociada a este campo de estudio.

En la Fig. 2 se exponen los artículos ordenados por el año de publicación, expresados en porcentajes. A partir de los datos analizados, se advierte que los años 2023 y 2024 concentran la mayor cantidad de estudios, reuniendo aproximadamente un 70% del total. No obstante, se prevé que la cifra correspondiente al año 2025 continúe en ascenso.

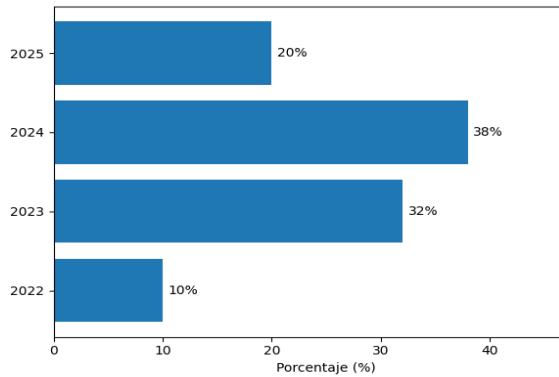


Fig. 2 Distribución porcentual del año de publicación

En la Fig. 3 se presenta la distribución de la literatura seleccionada de acuerdo con el país de origen. De los datos analizados, se aprecia que alrededor del 60% de los estudios provienen del continente asiático, concentrándose principalmente en países como India y China. Este hallazgo pone de manifiesto el creciente interés que existe en esa zona geográfica por el tema investigado.

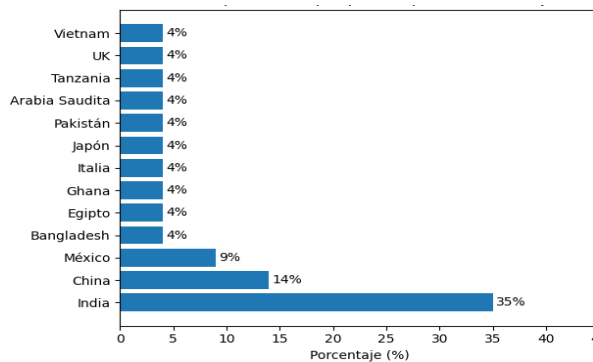


Fig. 3 Distribución porcentual del país de publicación de la literatura seleccionada

En la Tabla II se listan las principales revistas consideradas en la investigación, junto con su respectivo cuartil en Scopus. Del total de artículos examinados, se identificaron 14 clasificados como Q1 y 7 como Q2. Este resultado refleja la rigurosidad del proceso de selección, dado que la mayoría de las publicaciones proviene de revistas con un alto nivel de impacto científico.

TABLA II
REVISTAS DE ALTO IMPACTO IDENTIFICADAS DE LA LITERATURA SELECCIONADA

Magazine name	Quartil
Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects	Q1, Q2
International Journal of Engineering, Transactions A: Basics	Q2
Environmental Monitoring and Assessment	Q2
Scientific Reports	Q1
Journal of Cleaner Production	Q1
Biomass Conversion and Biorefinery	Q2
Chemosphere	Q1
Results in Engineering	Q1
Journal of Environmental Management	Q1
International Journal of Environmental Science and Technology	Q1, Q2
Separation and Purification Technology	Q1
Applied Surface Science Advances	Q1
International Journal of Energy and Environmental Engineering	Q2
Arabian Journal of Chemistry	Q1
Environmental Engineering Research	Q1
Bioresource Technology	Q1
Surfaces and Interfaces	Q1
Chemical Engineering Research and Design	Q2
Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials	Q1

B. Resultados de contenido de la revisión sistemática

Se compilaron 23 estudios que emplean residuos y subproductos de frutas y hortalizas como bioadsorbentes para la remoción de arsénico de aguas subterráneas. Se observa un tratamiento que permite aprovechar la estructura porosa y los grupos funcionales naturales. A continuación, se describe de forma sintética el material utilizado y la eficiencia de adsorción reportada en cada trabajo, junto con las condiciones experimentales más destacadas.

TABLA III
TIPOS DE BIOADSORBENTES, METODOLOGÍA, EFICIENCIA Y OBSERVACIONES

Residuo / Subproducto	Metodología	Eficiencia / Capacidad	Observaciones Principales
Cáscaras de naranja (OP) [19]	Molido, agregación de hierro, calcinación	>92% As(V)	pH ≈ 7 como condición ideal; sobresale su gran área y porosidad.
Bloque	Molido y amasado	100%	pH

poroso con yeso + residuos hortalizas [20]	con yeso	As (III) en columna, >80% en batch	prácticamente irrelevante.
Cáscaras de naranja [21]	Lavado, secado y pulverizado (variado)	Máx 94 – 95%	Contacto mínimo (15 min). pH no descrito con detalle.
Fibras de agave [22]	Impregnación con hierro en fibras	7.30–8.98 mg/g As(V)	pH > 7 y elevado HCO ₃ ⁻ o ácidos húmicos reducen adsorción
Residuos de Mentha [23]	Desgrasado, carbonización	Alta remoción As(V) al pH 7.5	pH 7.5 y 24 h contacto; área de 378 m ² /g.
Cáscara de maíz [13]	Ajustes estadísticos (diseño multivariante)	93.14–94.33% As(III); hasta 7.15 mg/g	pH cercano a neutro favorece adsorción.
Cáscara de trigo (CS-C) [24]	Carbonización simple	>92% As(V)	pH óptimo ≈ 7,
Cáscara de durazno [25]	Pirolización y enriquecimiento de hierro	>99% As(V), 4.34–8.66 mg/g	Se evaluó a pH ambiental
Cáscara de fruta de caoba y pedúnculo de plátano [15]	Pirolizados en carbón	Hasta 91.05% As(V)	pH 5–9, se logra 100% remoción de As en 5 min
Alperujo de oliva [26]	Síntesis hidrotermal (fase I) + precipitación	As(V) 45 mg/g	pH no mencionado
Guishe de agave [27]	Carbonización y dopaje de hierro	2.67–21.70 mg/g (As(V))	pH no detallado
Biomasa fresca de	Pre-oxidación, co-precipitación en la	33.41 mg/g (As(III)) y	pH no descrito, retiene >87% tras
bambú [18]	superficie	36.88 mg/g (As(V))	5 ciclos
Paja de arroz activada [28]	Activación térmica física de una sola etapa	>95% As	pH no especificado, pero alta eficiencia en agua natural.
Cáscaras de arroz y naranja [14]	Sieve analysis (425 µm vs. 841 µm)	96.38% (RH) y 82.2% (OPP)	pH no detallado.
Semillas de mango, yaca, hongo ostra [11]	Carbonización	92–94% As(V) a pH 8.4	Se optimizó pH = 8.4
Residuo de cebolla [29]	Activación química (HNO ₃ , H ₃ PO ₄ , NaOH) + magnetita	99% As(III)	pH variable
Tectona [1]	Impregnación metálica, pirolizado	90.35–84.85% As(III); 0.91–1.89 mg/g	pH 7
Cáscara de maní [30]	Modificación con KMnO ₄ y KOH	86% (As(III)), 91.26% (As(V))	pH 6 para mejores resultados. posibilidad de reutilizar 3 ciclos.
Cáscara de arroz [31]	Carbonización (600 °C) y depósito químico Fe	98% As, 25.06 mg/g	pH no detallado.
Paja de arroz [32]	Pirólisis simple	>85% As, Mn; 4.51 mg/g As a 600 °C	pH ~7-8 (no detalla exacto). Costo 0.913 USD/kg;
Cáscara de pomelo [33]	Pirolización + recubrimiento Fe	11.77 mg/g As(III), 15.28 mg/g	pH 2–10 con escasos cambios de eficacia, pero

		As(V)	fosfatos reducen remoción.
Semillas de residuos de Cassia fistula [34]	Carbonización, caracterización	~91% As(III); 1.13 mg/g	pH 6 en 80 min y 30 °C.
Cáscara de arroz [35]	Síntesis magnética simple	~75% As	pH no detallado

C. Resultados de contenido de la revisión sistemática

Los 23 artículos incluidos en esta revisión muestran un amplio rango de residuos y subproductos de frutas y hortalizas empleados para la bioadsorción de arsénico en aguas subterráneas. En la mayoría de los estudios se reportan eficiencias de remoción superiores al 80%, alcanzando en algunos casos valores por encima del 90% para As(III) o As(V) [19], [20], [21], [23], [31]. Entre los materiales que han evidenciado mayor eficacia se encuentran las cáscaras de naranja, con remociones superiores al 92% de As(V) [19], y los bloques porosos a base de yeso y residuos de hortalizas, capaces de eliminar el 100% de As(III) en ensayos en columna [20]. Otros ejemplos relevantes incluyen el uso de cáscaras de arroz y naranja, que mostraron un 96.38% y 82.2% de remoción respectivamente [14], así como semillas de mango, yaca y hongo que lograron entre un 92–94% de adsorción de As(V) a pH 8.4 [11]. En varios trabajos, la modificación química con hierro, manganeso o grupos funcionales específicos potenció la capacidad de adsorción, alcanzando eficiencias cercanas o superiores al 99% [25], [29].

D. Resultados de contenido de la revisión sistemática

Asimismo, se ha constatado la influencia de factores operativos como el pH y la dosis de adsorbente en la eficacia del proceso. Por ejemplo, el pH óptimo para la remoción de As(V) en cáscaras de maní modificadas se situó en 6, con eficiencias de 91.26% [30], mientras que las cáscaras de maíz optimizaron sus parámetros (tiempo de contacto y concentración inicial) para lograr hasta un 94.33% de remoción de As(III) [13]. En conjunto, los resultados indican que la bioadsorción basada en subproductos vegetales puede alcanzar altos porcentajes de remoción de arsénico, incluso con tratamientos sencillos (lavado, secado, carbonización), lo que respalda su aplicabilidad como una tecnología de bajo costo.

III. DISCUSIÓN

En el primer objetivo de esta revisión se planteó la

necesidad de identificar los residuos de frutas y hortalizas que han sido reportados como bioadsorbentes naturales para la remoción de arsénico en aguas subterráneas. Los estudios recopilados evidencian diversos tipos de materia prima, entre los que destacan las cáscaras de naranja [19], los residuos de plátano y fruta de caoba [15], así como el bagazo de caña [12] y diversos subproductos de arroz [14], [31], [32]. Estas investigaciones concuerdan en señalar que la disponibilidad y bajo costo de dichos residuos constituyen una de sus principales ventajas, al tiempo que contribuyen a reducir el impacto ambiental asociado a su acumulación.

Respecto al segundo objetivo, enfocado en evaluar los mecanismos de bioadsorción, se observa que la presencia de grupos funcionales naturales y la posible modificación con metales o grupos amonio cuaternario potencian la retención de arsénico [1], [25], [29]. Por ejemplo, Shehzad et al. [19] reportan la adición de hierro sobre cáscaras de naranja, logrando una remoción superior al 92% de As(V) a pH neutro, atribuida a la formación de sitios activos capaces de formar complejos superficiales con el contaminante. De manera similar, Ghosh et al. [21] señalan la efectividad de residuos cítricos que, gracias a su rápida saturación de sitios de adsorción, alcanzan hasta 94–95% de remoción en apenas 15 minutos. Estos hallazgos confirman la importancia de los procesos de quimisorción y complejación superficial, como han sugerido Liao et al. [22] en el caso de fibras de henequén impregnadas con hierro.

En cuanto al tercer objetivo, que proponía comparar la eficiencia de distintos residuos en la bioadsorción de arsénico, los resultados muestran un rango de eficiencias generalmente superior al 80% e incluso cercano al 100% en algunos casos [20]. De acuerdo con Mirza y Fujino [20], un bloque poroso elaborado con yeso y residuos agrícolas logra eliminar por completo As(III) en ensayos de columna, mientras que Bayuo et al. [13] alcanzan remociones de 93–94% con cáscara de maíz optimizada mediante un diseño estadístico. A su vez, Shaibur et al. [15] resaltan la rápida remoción al utilizar carbón de fruta de caoba y plátano, alcanzando valores de As cercanos al 90% en tiempos muy reducidos. En conjunto, los datos sugieren que la cáscara de naranja, la cáscara de arroz, las semillas de mango o maní son los más sobresalientes por su alta eficiencia y facilidad de aplicación.

Por último, el cuarto objetivo apuntaba a analizar los factores que influyen en la capacidad de adsorción, como el pH, la concentración inicial de arsénico y la presencia de aniones competitivos. Varios estudios confirman la relevancia de un pH cercano a la neutralidad (entre 6 y 7.5) para maximizar la adsorción, tal como señalan Nand et al. [23] con residuos de *Mentha* modificados con hierro, y Kushwaha et al. [30] en el caso de la cáscara de maní tratada. Además, la concentración inicial de arsénico incide directamente en la saturación de los sitios activos, mientras que fosfatos y carbonatos pueden reducir la eficacia de la bioadsorción, tal como lo describen Liu et al. [35], [36], al

evaluar la cáscara de arroz. En consecuencia, resulta imprescindible considerar la composición real del agua y, de ser necesario, adaptar las condiciones para asegurar una remoción efectiva y sostenida del arsénico.

Además de profundizar en los ciclos de regeneración y la caracterización de residuos finales, futuros estudios podrían explorar la combinación de bioadsorción con otras tecnologías (filtración, coagulación, membranas) para potenciar la eficiencia en diferentes escenarios. Igualmente, se podrían optimizar los tratamientos de modificación para mejorar la capacidad de adsorción sin aumentar excesivamente los costos operativos.

IV. CONCLUSIONES

La presente revisión sistemática analizó el estado del arte sobre la bioadsorción de arsénico en aguas subterráneas utilizando residuos de frutas y hortalizas como bioadsorbentes naturales, con el fin de evaluar su eficacia y viabilidad en la remoción de este contaminante. Se identificaron múltiples residuos de frutas y hortalizas (cáscaras de naranja, arroz, plátano, pomelo, bagazo de caña de azúcar, semillas de mango y maní, entre otros) que han mostrado eficiencias de remoción superiores al 80% en la mayoría de los casos, satisfaciendo así el primer objetivo de reconocer cuáles subproductos han sido más estudiados.

En relación con el segundo objetivo, la evaluación de los mecanismos de bioadsorción revela la importancia de los grupos funcionales presentes de manera natural en la biomasa y la relevancia de la modificación química (con metales como hierro o manganeso), que potencia la quimisorción y la formación de complejos superficiales. Asimismo, se cumple el tercer objetivo al comparar la eficiencia de los distintos residuos, concluyendo que las cáscaras de naranja y arroz, así como la biomasa, enriquecidos con hierro, destacan por su alta capacidad de adsorción, superando en muchos casos el 90% de remoción.

Finalmente, el análisis de los factores que influyen en la capacidad de adsorción demuestra que el pH cercano a la neutralidad y la ausencia de químicos competitivos resultan esenciales para maximizar la eficacia del proceso. De igual modo, la regeneración de los adsorbentes emerge como un aspecto clave para la sostenibilidad de la bioadsorción, lo que abre oportunidades de investigación futura en la búsqueda de protocolos que permitan reutilizar el material sin mermar significativamente su desempeño. En conjunto, se concluye que la bioadsorción basada en residuos de frutas y hortalizas representa una alternativa sostenible y de bajo costo para el tratamiento de aguas subterráneas contaminadas con arsénico, siempre que se adapten las condiciones operativas y se profundice en estudios a mayor escala que validen su aplicación industrial.

REFERENCIAS

- [1] L. Verma y J. Singh, «Arsenic adsorption from aqueous solution and groundwater using monometallic (Fe) and bimetallic (Fe/Mn) Tectona

- biochar synthesized from plant refuse: mechanism, isotherm, and kinetic study», *Environ. Eng. Res.*, vol. 28, n.o 3, 2023, doi: 10.4491/eer.2022.110.
- [2] OMS, «Arsénico». Accedido: 22 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/factsheets/detail/arsenic>
- [3] P. Ta, M. Y. Ali, M. M. Yesmin, B. Ms, M. B. Khan, y M. H. Rashid, «Identification and Evaluation of Arsenic Tolerant Bacteria for Arsenic Mitigation in Contaminated Soil», Accedido: 20 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://austinpublishinggroup.com/bacteriology/fulltext/bacteriology-v7-id1156.php>
- [4] Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua, 7 de junio de 2017. Accedido: 22 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-agua-establecen-disposiciones>
- [5] S. Waqar et al., «Arsenic efflux and bioremediation potential of Klebsiella oxytoca via the arsB gene», *PLOS ONE*, vol. 20, n.o 1, p. e0307918, ene. 2025, doi: 10.1371/journal.pone.0307918.
- [6] C. Yi-Gong et al., «Medical Plant Extract Purification from Cadmium(II) Using Modified Thermoplastic Starch and Ion Exchangers», *Mater. Web*, vol. 14, n.o 16, p. 4734, 2021.
- [7] Z. R. Lopičić et al., «Efficient Removal of Water Soluble Fraction of Diesel Oil by Biochar Sorption Supported by Microbiological Degradation», *Processes*, vol. 12, n.o 5, 2024, doi: 10.3390/pr12050964.
- [8] N. J. Harris, J. J. Dynes, J. M. McBeth, M. Patel, y W. Chang, «Waste biomass from hypersaline potash mining byproducts: Detection and visualization of Cu(II) and Cr(VI) on *Croceicoccus* sp. FT114 biosorbent», *Waste Manag. Bull.*, vol. 1, n.o 3, pp. 45-57, 2023, doi: 10.1016/j.wmb.2023.07.001.
- [9] T. Iqbal, F. Batool, y S. Iqbal, «Modeling of an adsorption study of a synthesized hematite composite for the removal of lead and cadmium from contaminated water», *J. Dispers. Sci. Technol.*, 2024, doi: 10.1080/01932691.2024.2434107.
- [10] H. A. Al-Karablieh, N. Zouari, B. Shomar, y M. A. Al- Ghouti, «Functionalized cellulose nanocrystals extracted from date pits as agricultural waste for the efficient remediation of molybdenum from groundwater: Performance and mechanistic studies», *Groundw. Sustain. Dev.*, vol. 25, p. 101134, may 2024, doi: 10.1016/j.gsd.2024.101134.
- [11] D. D. Giri et al., «Waste seeds of *Mangifera indica*, *Artocarpus heterophyllus*, and *Schizium commune* as biochar for heavy metal removal from simulated wastewater», *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 13, n.o 15, pp. 13393-13402, 2023, doi: 10.1007/s13399-021-02078-5.
- [12] I. Masood ul Hasan et al., «Enhanced capacity of thiol-functionalized sugarcane bagasse and rice husk biochars for arsenite sorption in aqueous solutions», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 31, n.o 39, pp. 52293-52305, ago. 2024, doi: 10.1007/s11356-024-34661-4.
- [13] J. Bayuo, M. J. Rwiza, y K. M. Mtei, «Modeling and optimization of trivalent arsenic removal from wastewater using activated carbon produced from maize plant biomass: a multivariate experimental design approach», *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 14, n.o 19, pp. 24809-24832, oct. 2024, doi: 10.1007/s13399-023-04494-1.
- [14] A. N. S. Appiah et al., «Evaluation of adsorption properties of organic wastes in aqueous media for arsenic removal», *Int. J. Energy Environ. Eng.*, vol. 14, n.o 4, pp. 829-839, 2023, doi: 10.1007/s40095-022-00551-z.
- [15] M. R. Shaibur et al., «Determination of water quality and efficient removal of arsenic and iron from groundwater using mahogany fruit husk and banana peduncle charcoals», *Results Eng.*, vol. 22, p. 102220, jun. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102220.
- [16] «Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: Centroamérica y la República Dominicana promueven la fruticultura para contribuir al desarrollo rural sostenible e inclusivo | FAO en República Dominicana | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura». Accedido: 22 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/republica-dominicana/noticias/detail-events/es/c/1127627/>

- [17] C. Xu, R. Liu, y L. Chen, «Removal of Phosphorus from Domestic Sewage in Rural Areas Using Oyster Shell-Modified Agricultural Waste-Rice Husk Biochar», *Processes*, vol. 11, n.o 9, 2023, doi: 10.3390/pr11092577.
- [18] L. Xu, Z. Shu, S. Sun, Y. Wen, y J. Zhou, «Amorphous Fe-Mn binary oxides nanoparticles decorating waste bamboo biomass-based monolith for efficient arsenic removal with column adsorption», *Sep. Purif. Technol.*, vol. 330, 2024, doi: 10.1016/j.seppur.2023.125426.
- [19] K. Shehzad et al., «Modified waste orange peels biomass residues for sustainable and promising As(V) removal: Insights into batch and column adsorption experiments and Box-behnken Design (BBD) analysis», *Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 711, p. 136352, abr. 2025, doi: 10.1016/j.colsurfa.2025.136352.
- [20] N. H. Mirza y T. Fujino, «Gypsum-based Porous Media Filter with Solid Waste: A Novel Composite for Removing Arsenic (III) from Aqueous Solution», *Int. J. Eng.*, vol. 38, n.o 4, pp. 735-743, 2025, doi: 10.5829/ije.2025.38.04a.06.
- [21] M. Ghosh, S. Giri, P. Dey, y A. Mandal, «Utilization of agrowaste for arsenic biosorption: enhancing efficacy and assessing the suitability of plant and animal growth in post-adsorbed solution», *Environ. Monit. Assess.*, vol. 197, n.o 1, p. 43, dic. 2024, doi: 10.1007/s10661-024-13520-2.
- [22] X. Liao et al., «Efficient arsenic removal from water using iron-impregnated low-temperature biochar derived from henequen fibers: performance, mechanism, and LCA analysis», *Sci. Rep.*, vol. 14, n.o 1, p. 20769, sep. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-69769-7.
- [23] S. Nand et al., «Arsenic removal using de-oiled mentha biomass biochar: Adsorption kinetics and the role of iron modification», *J. Clean. Prod.*, vol. 482, p. 144247, dic. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.144247.
- [24] A. F. Abou-Hadid et al., «Conversion of corn shell as biomass solid waste into carbon species for efficient decontamination of wastewater via heavy metals adsorption», *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 14, n.o 14, pp. 16435-16449, jul. 2024, doi: 10.1007/s13399-023-04057-4.
- [25] S. Pap et al., «Comparison of two carbonaceous supported Fe-rich adsorbents for arsenate removal: A functionalisation and mechanistic study with applicability to groundwater treatment», *Chemosphere*, vol. 359, p. 142205, jul. 2024, doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.142205.
- [26] F. Di Caprio, P. Altamari, M. L. Astolfi, y F. Pagnanelli, «Optimization of two-phase synthesis of Fe-hydrochar for arsenic removal from drinking water: Effect of temperature and Fe concentration», *J. Environ. Manage.*, vol. 351, p. 119834, feb. 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.119834.
- [27] A. P. González García, S. Carlos Hernández, y L. Díaz Jiménez, «Agave lechuguilla waste can be applied as biochar-adsorbent to remove arsenic from water», *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, dic. 2024, doi: 10.1007/s13762-024-06226-y.
- [28] A. K. Sakhiya, P. Kaushal, y V. K. Vijay, «Process optimization of rice straw-derived activated biochar and biosorption of heavy metals from drinking water in rural areas», *Appl. Surf. Sci. Adv.*, vol. 18, p. 100481, dic. 2023, doi: 10.1016/j.apsadv.2023.100481.
- [29] F. Bibi et al., «Chemical activation and magnetization of onion waste derived carbon for arsenic removal», *Arab. J. Chem.*, vol. 16, n.o 10, 2023, doi: 10.1016/j.arabjc.2023.105118.
- [30] R. Kushwaha, R. S. Singh, y D. Mohan, «Comparative study for sorption of arsenic on peanut shell biochar and modified peanut shell biochar», *Bioresour. Technol.*, vol. 375, 2023, doi: 10.1016/j.biortech.2023.128831.
- [31] K. Javed et al., «Rice husk ash adsorbent modified by iron oxide with excellent adsorption capacity for arsenic removal from water», *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 20, n.o 3, pp. 2819-2828, 2023, doi: 10.1007/s13762-022-04390-7.
- [32] A. K. Sakhiya, V. K. Vijay, y P. Kaushal, «Development of rice straw biochar through pyrolysis to improve drinking water quality in arsenic and manganese contaminated areas», *Surf. Interfaces*, vol. 36, 2023, doi: 10.1016/j.surf.2022.102582.
- [33] T. H. Nguyen et al., «Arsenic removal by pomelo peel biochar coated with iron», *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 186, pp. 252-265, 2022, doi: 10.1016/j.cherd.2022.07.022.
- [34] D. D. Giri et al., «Sustainable removal of arsenic from simulated wastewater using solid waste seed pods biosorbents of *Cassia fistula* L.», *Chemosphere*, vol. 287, 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132308.
- [35] H. Liu, P. Li, F. Qiu, T. Zhang, y J. Xu, «The Application of Eco-Friendly Fe-Al Bimetallic Oxide/Biochar Adsorbent Composites with Waste Rice Husk for Removal of Arsenic at Low Concentration», *J. Inorg. Organomet. Polym. Mater.*, vol. 32, n.o 1, pp. 122-133, 2022, doi: 10.1007/s10904-021-02085-z.
- [36] L. Katherine Ortiz García, «The Impact of the Circular Economy on waste management in the food industry: A Systematic Review», en *Proc. LACCEI int. multi-conf. eng. educ. technol.*, Petrie M.M.L., Texier J., y Matta R.A.R., Eds., Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2025. doi: 10.18687/LACCEI2025.1.1.1463