Bioadsorption of Arsenic and Other Metalloids Using Plant Seeds: A Systematic and Bibliometric Review (2016-2026)

Yenny Anali Tenorio-Ortiz [1]; Walter Manuel Hoyos-Alayo[2]
[1,2]Universidad Tecnológica del Perú, Perú, *ytenorio@utp.edu.pe, c23712@utp.edu.pe*

Abstract- Plant-seed bioadsorption offers a route for valorizing agroindustrial residues while removing arsenic and other metalloids from aqueous matrices, although the evidence differs widely in material preparation, contaminant speciation and experimental conditions. This study analysed the composition, preparation, mechanisms, operating variables and performance of plant seeds and seed-derived materials, and characterized the bibliometric evolution of the field from 2016 to 2026. The Scopus search identified 205 records; 58 formed the broad bibliometric corpus and 10 met the systematic-synthesis criteria. Nine studies assessed arsenic and one assessed boron. Five studies used non-carbonized seeds or seed fractions, whereas five evaluated biochars, activated carbons or carbon electrodes as transformed comparators. Reported removal for non-carbonized materials ranged from 47.0 to 92.3%, and a derivatized seed coat reached 90.90 mg g^{-1}. Transformed materials achieved 89.38-94.0% removal under controlled conditions. Speciation, pH, dosage, contact time, initial concentration and water matrix explained the main variability. Evidence remains limited for real waters, regeneration, leaching, end-of-life management and scale-up.

Keywords-- arsenic; bioadsorption; biosorbents; plant seeds; waste valorization.

Bioadsorción de arsénico y otros metaloides mediante semillas vegetales: Revisión sistemática y bibliométrica (2016-2026)

Yenny Anali Tenorio-Ortiz[1]; Walter Manuel Hoyos-Alayo[2]
[1,2]Universidad Tecnológica del Perú, Perú, *ytenorio@utp.edu.pe, c23712@utp.edu.pe*

Resumen- ***La bioadsorción mediante semillas vegetales ofrece una vía de valorización de residuos para retirar arsénico y otros metaloides de matrices acuosas, aunque la evidencia presenta diferencias amplias en materiales, tratamientos y condiciones experimentales. El objetivo fue analizar la composición, preparación, mecanismos, variables operativas y desempeño de semillas y materiales derivados, así como caracterizar la evolución bibliométrica del campo entre 2016 y 2026. La búsqueda en Scopus identificó 205 registros. Tras el cribado, 58 registros conformaron el corpus bibliométrico amplio y 10 estudios cumplieron los criterios de la síntesis sistemática. Nueve investigaciones evaluaron arsénico y una examinó boro. Cinco estudios emplearon semillas o fracciones no carbonizadas y cinco analizaron biochars, carbones activados o electrodos derivados como comparadores transformados. En materiales no carbonizados se reportaron remociones entre 47,0 y 92,3 %, mientras una cubierta de semilla derivatizada alcanzó 90,90 mg*** g^{-1}***. Los materiales transformados registraron eficiencias entre 89,38 y 94,0 %, pero su desempeño dependió de activación, impregnación o funcionalización. La especiación, el pH, la dosis, el tiempo, la concentración inicial y la matriz explicaron gran parte de la variabilidad. Los mecanismos propuestos incluyeron complejación superficial, intercambio de ligandos, coagulación-floculación y electrosorción. La producción científica creció desde 2022, aunque la red temática mostró alta dispersión. La transferencia a aguas reales, la regeneración, la lixiviación, la disposición final y el escalamiento continúan insuficientemente documentados.***

Palabras clave-- adsorción; arsénico; bioadsorbentes; semillas vegetales; valorización de residuos.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua por metaloides representa un riesgo sanitario y ambiental debido a su persistencia, movilidad y toxicidad a concentraciones bajas. La Organización Mundial de la Salud establece valores guía de 10 µg L^{-1} para arsénico, 20 µg L^{-1} para antimonio, 40 µg L^{-1} para selenio y 2,4 mg L^{-1} para boro [1], y estima que 140 millones de personas en al menos 70 países consumen agua con arsénico por encima de 10 µg L^{-1} [2]. Un modelo global sustentado en más de 50 000 mediciones situó entre 94 y 220 millones la población expuesta a concentraciones elevadas de arsénico en aguas subterráneas [3].

La exposición prolongada al arsénico inorgánico se asocia con lesiones cutáneas, alteraciones cardiovasculares y metabólicas, efectos sobre el desarrollo y cáncer de piel, pulmón y vejiga [2]. En una cohorte de 13 998 binomios materno-infantiles, cada incremento de 5 µg L^{-1} de arsénico prenatal en agua pública se relacionó con un riesgo relativo de 1,16 para bajo peso al nacer [4], mientras un análisis realizado en Texas registró un aumento de 4 % en el riesgo de cáncer renal por cada duplicación de la concentración en el agua [5].

La separación de metaloides está condicionada por el pH, el potencial redox, la alcalinidad, la materia orgánica y los aniones competidores. En el caso del arsénico, la especiación añade una dificultad, debido a que el arsenato predomina en medios oxidantes y el arsenito adquiere relevancia en condiciones reductoras [6]. La adsorción se adapta a sistemas por lotes, columnas y unidades descentralizadas, aunque su desempeño depende de la química superficial, la dosis, el tiempo de contacto, la concentración inicial y la composición de la matriz acuosa.

Las semillas vegetales contienen proteínas, polisacáridos, lípidos y estructuras lignocelulósicas con grupos hidroxilo, carboxilo, carbonilo y amino capaces de participar en atracción electrostática, intercambio iónico, complejación y coagulación-floculación. La semilla de ciruela de Java removió entre 78 y 87 % de As(III) y 67 % de As(V), con desorción de hasta 97 % durante cuatro ciclos [7]. La cubierta de *Phyllanthus emblica* alcanzó capacidades máximas de 76,92 mg g^{-1} en estado prístino y 90,90 mg g^{-1} después de su derivatización [8], lo que muestra que la modificación superficial altera la disponibilidad de sitios de retención.

Las transformaciones térmicas generan materiales con propiedades distintas a la biomasa original y requieren una comparación separada. El biochar de semillas de uva activado con aire o HNO_3 alcanzó capacidades máximas 7,7 y 6,8 veces superiores al material sin activar [9], mientras el biochar de semilla de *Persea americana* funcionalizado con lantano y activado con CO_2 mostró mejoras de hasta 179 % frente a la activación térmica convencional [10]. Estos resultados no deben atribuirse de forma directa a una semilla sin carbonización, pues la porosidad, el área superficial y las fases activas cambian durante la conversión.

La comparación entre estudios permanece limitada por diferencias en especie química, preparación, granulometría, pH, temperatura, concentración inicial, tiempo, configuración experimental y método analítico. La evidencia también se concentra en arsénico, mientras el boro, el antimonio, el selenio y el telurio muestran una representación menor o inexistente en ensayos acuosos con semillas. Persisten vacíos sobre matrices reales, regeneración, lixiviación, estabilidad, disposición del material saturado, costos y escalamiento. El tema se vincula con el ODS 6, metas 6.1 y 6.3, relacionadas con agua potable segura

y reducción de sustancias peligrosas [11], y con el ODS 12, meta 12.5, centrada en prevención, reciclaje y reúso de residuos [12].

En este contexto, el objetivo de esta investigación es analizar sistemáticamente la evidencia publicada entre 2016 y 2026 sobre la bioadsorción de arsénico y, cuando la información disponible lo permita, otros metaloides mediante semillas vegetales y materiales derivados. La revisión compara composición, preparación, mecanismos, condiciones operativas y desempeño, caracteriza la evolución bibliométrica del campo e identifica factores de variabilidad y vacíos sobre matrices reales, selectividad, regeneración, estabilidad, disposición final y escalamiento.

II. METODOLOGÍA

A. Diseño de la revisión y alcance

Se desarrolló una revisión sistemática con componente bibliométrico y síntesis cualitativa. El reporte del proceso siguió PRISMA 2020 [13] y la descripción de la búsqueda se organizó conforme a PRISMA-S [14] La pregunta de revisión fue: ¿qué composición, formas de preparación, mecanismos y condiciones operativas determinan el desempeño de semillas vegetales y materiales derivados en la bioadsorción de arsénico y otros metaloides en agua?

El alcance principal incluyó semillas completas y fracciones derivadas, como harinas, polvos, cubiertas, cáscaras, almendras, mucílagos y tortas, empleadas sin carbonización o después de acondicionamiento físico o modificación química. Los sistemas híbridos se aceptaron cuando el aporte de la semilla podía distinguirse del material complementario. Los biochars, hidrochars, carbones activados y electrodos carbonosos derivados de semillas se clasificaron como comparadores transformados, debido a que la conversión térmica modifica la estructura, la porosidad y los mecanismos de retención.

B. Estrategia de búsqueda y esquema PICOC

Se definieron términos para cada componente del esquema PICOC y se combinaron mediante operadores booleanos para construir una búsqueda sensible, siguiendo procedimientos aplicados en revisiones ambientales [15], [16], ver Tabla I. La búsqueda se ejecutó en Scopus y se cerró el 3 de agosto de 2026, sin restricciones geográficas.

TABLA I
COMPONENTES PICOC, PALABRAS CLAVE Y SINTAXIS DE BÚSQUEDA PARA SCOPUS

Componente	Delimitación conceptual	Palabras clave en español	Sintaxis en inglés para Scopus
P, problema	Agua contaminada con arsénico y otros metaloides, incluidas sus especies químicas.	Arsénico, arsenito, arseniato, antimonio, antimonito, antimonato, selenio, selenito, selenato, boro, borato, telurio, telurito, telurato, metaloides	arsenic OR arsenite OR arsenate OR antimony OR antimonite OR antimonate OR selenium OR selenite OR selenate OR boron OR borate OR tellurium OR tellurite OR tellurate OR metalloid OR metalloids
I, intervención	Semillas vegetales completas o fracciones empleadas como bioadsorbentes, sin carbonización o con modificación física o química.	Semillas vegetales, biomasa de semillas, harina, polvo, torta, cáscara, cubierta, mucílago, residuo, bioadsorbente de semillas	seed OR seeds OR "plant seed" OR "plant seeds" OR "seed biomass" OR "seed flour" OR "seed powder" OR "ground seed" OR "seed meal" OR "seed cake" OR "seed residue" OR "seed waste" OR "seed coat" OR "seed husk" OR "seed shell" OR "seed kernel" OR "seed mucilage" OR "seed-based biosorbent" OR "seed-derived biosorbent"
C, comparación	Especies y fracciones de semillas, materiales sin modificar y modificados, tratamientos convencionales y comparadores transformados.	Semillas sin modificar, semillas modificadas, carbón activado, biochar, adsorbente convencional, control	"untreated seed" OR "raw seed" OR "modified seed" OR "chemically modified seed" OR biochar OR "activated carbon" OR "conventional adsorbent" OR control OR blank
O, resultados	Desempeño y fundamentos del proceso, incluidos remoción, capacidad, concentración residual, cinética, equilibrio, mecanismo y regeneración.	Bioadsorción, biosorción, adsorción, remoción, eficiencia, capacidad, concentración residual, cinética, isotermas, mecanismos, regeneración	biosorption OR bioadsorption OR adsorption OR removal OR uptake OR "removal efficiency" OR "adsorption capacity" OR "biosorption capacity" OR "residual concentration" OR kinetics OR isotherm OR equilibrium OR mechanism OR regeneration OR desorption OR reusability
C, contexto	Matrices acuosas naturales o preparadas y sistemas por lotes, columnas o flujo continuo.	Agua potable, agua subterránea, agua superficial, agua residual, solución acuosa, efluente, lote, columna, lecho fijo	water OR "drinking water" OR groundwater OR "surface water" OR wastewater OR "aqueous solution" OR effluent OR "batch system" OR column OR "fixed bed" OR "continuous flow"

Nota. El componente de comparación se empleó para clasificar los estudios, pero no se incorporó como bloque obligatorio en la ecuación principal.

La ecuación principal aplicada en Scopus fue:

(TITLE-ABS-KEY (arsenic OR arsenite OR arsenate OR antimony OR antimonite OR antimonate OR selenium OR selenite OR selenate OR boron OR borate OR tellurium OR tellurite OR tellurate OR metalloid OR metalloids) AND TITLE-ABS-KEY (seed OR seeds OR "plant seed" OR "plant seeds" OR "seed biomass" OR "seed flour" OR "seed powder" OR "ground seed" OR "seed meal" OR "seed cake" OR "seed residue" OR "seed waste" OR "seed coat" OR "seed husk" OR "seed shell" OR "seed kernel" OR "seed mucilage" OR "seed-based biosorbent" OR "seed-derived biosorbent") AND TITLE-ABS-KEY (biosorption OR bioadsorption OR adsorption OR removal OR uptake OR "removal efficiency" OR "adsorption capacity" OR "biosorption capacity" OR "residual concentration" OR kinetics OR isotherm OR equilibrium OR mechanism OR regeneration OR desorption OR reusability) AND TITLE-ABS-KEY (water OR "drinking water" OR groundwater OR "surface water" OR wastewater OR "aqueous solution" OR effluent OR "batch system" OR column OR "fixed bed" OR "continuous flow")).

La consulta amplia recuperó 205 registros antes de aplicar los límites temporales y documentales. Los metadatos se exportaron en CSV, con autores, afiliaciones, título, resumen, palabras clave, año, fuente, DOI y recuento de citas. Se normalizaron DOI, nombres de autores y términos equivalentes antes del cribado.

C. Criterios de elegibilidad

Los criterios se establecieron antes del cribado, ver Tabla II. Los estudios debían evaluar una semilla o fracción derivada en una matriz acuosa con arsénico u otro metaloide, describir el material y reportar un indicador cuantitativo. Los comparadores carbonizados se conservaron en un subgrupo separado y los estudios centrados exclusivamente en metales se excluyeron de la síntesis principal.

TABLA II
CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTUDIOS

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
C.I.1. Evalúan semillas vegetales o fracciones derivadas como bioadsorbentes de arsénico u otros metaloides en agua. C.I.2. Describen especie, fracción y estado o tratamiento aplicado al bioadsorbente. C.I.3. Reportan al menos un indicador cuantitativo del desempeño de bioadsorción. C.I.4. Analizan mecanismos, condiciones operativas, ventajas o limitaciones del material.	C.E.1. Publicados antes de 2016 o después del cierre de 2026. C.E.2. El tipo documental no corresponde a un artículo científico original. C.E.3. El registro no corresponde a una versión final publicada. C.E.4. El informe no pudo recuperarse por los medios disponibles. C.E.5. No existe correspondencia simultánea entre semilla, metaloide, matriz acuosa y proceso de remoción.

D. Selección de estudios y conformación de los corpus

Dos revisores examinaron los registros de forma independiente y resolvieron discrepancias por consenso. De los 205 registros identificados, 107 se retiraron por encontrarse fuera del periodo 2016-2026 y 5 porque el tipo documental no correspondía a un artículo original. Los 93 registros restantes se examinaron por título y resumen, y se solicitaron los informes completos. No se recuperaron 35 informes, por lo que 58 registros con metadatos y resumen completos pasaron a la evaluación temática.

La evaluación de elegibilidad excluyó 48 registros por falta de correspondencia con la pregunta de revisión: 22 sobre biofortificación o nutrición vegetal, 16 sobre fitotoxicidad, captación vegetal o contaminación de suelos, 6 sobre tratamiento acuoso sin semillas bioadsorbentes y 4 sobre temas no pertinentes. Diez estudios cumplieron los criterios y constituyeron el corpus de síntesis sistemática. Los 58 registros recuperados se conservaron como corpus bibliométrico amplio. La Fig. 1 presenta la secuencia de selección y diferencia ambas rutas analíticas.

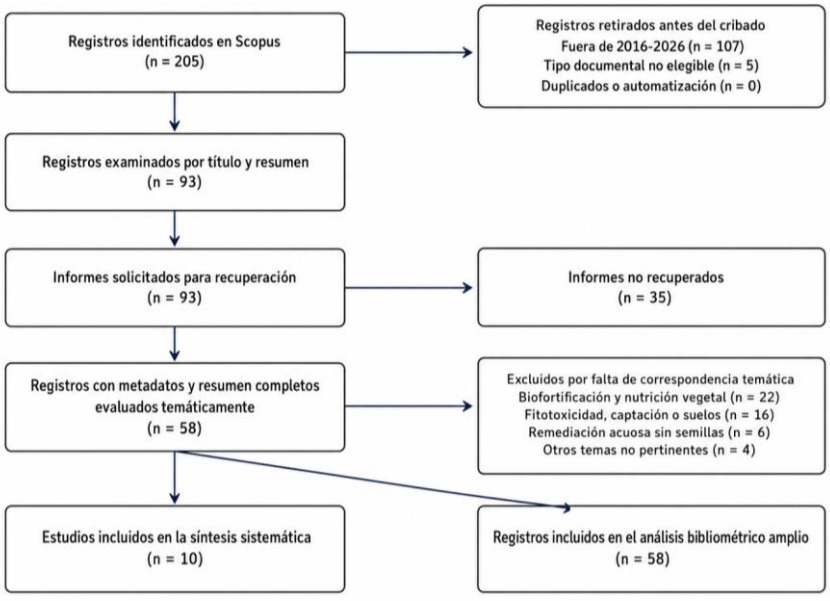


Fig. 1. Flujo de selección de estudios y conformación de los corpus sistemático y bibliométrico.
Nota. El corpus sistemático incluyó 10 estudios con correspondencia directa. El corpus bibliométrico amplio incluyó 58 registros recuperados con metadatos y resumen completos.

E. Extracción y síntesis de datos

Para los 58 registros se extrajeron año, autores, afiliaciones, fuente, DOI, citas, resumen y palabras clave. Para los diez estudios elegibles se registraron especie vegetal, fracción de semilla, preparación, metaloide, especie química, matriz, concentración inicial, dosis, pH, tiempo, porcentaje de

remoción, capacidad de adsorción, modelos cinéticos e isotérmicos, técnicas de caracterización, mecanismo y regeneración. La síntesis cuantitativa se limitó a valores explícitos en los títulos, resúmenes y metadatos del archivo de Scopus. Los campos ausentes se codificaron como no reportados y no se completaron mediante inferencia.

La heterogeneidad de materiales, concentraciones, unidades y configuraciones impidió un metaanálisis combinado. Los estudios se organizaron por tipo de material, especie de arsénico o metaloide, matriz, preparación y mecanismo. Las unidades se expresaron como mg L^{-1} para concentraciones y mg g^{-1} para capacidad cuando el registro permitía una conversión directa.

F. Análisis bibliométrico

El análisis bibliométrico se realizó sobre los 58 registros recuperados, con conteo completo de publicaciones y afiliaciones. Se calcularon producción anual, citas acumuladas, mediana de citas y participación por país. Para la coocurrencia se combinaron palabras clave de autor e índice, se unificaron singular y plural, abreviaturas y términos equivalentes, y se aplicó un umbral mínimo de dos apariciones. La red se construyó con normalización por fuerza de asociación y detección de comunidades, mientras las figuras se generaron a partir de las matrices normalizadas mediante Python, pandas, NetworkX y Matplotlib.

III. RESULTADOS

A. Selección y pertinencia temática de la evidencia

La búsqueda produjo un espacio documental amplio, pero la aplicación de C.E.5 redujo la síntesis sistemática a diez estudios. Nueve evaluaron arsénico en forma de As(III), As(V), arsenato orgánico o arsénico total, y uno examinó boro en un lixiviado real. No se identificaron ensayos directamente elegibles para antimonio, selenio o telurio. La Tabla III presenta la clasificación temática de los 58 registros recuperados y documenta la decisión de elegibilidad para cada grupo.

TABLA III
DISTRIBUCIÓN TEMÁTICA DE LOS 58 REGISTROS RECUPERADOS Y DECISIÓN DE ELEGIBILIDAD

Categoría temática	n (%)	Relación con la pregunta de revisión	Citas y DOI incluidos en la categoría
Evidencia directa o comparadores derivados de semillas para remover metaloides del agua	10 (17,2 %)	Cumple la intervención principal o aporta un comparador transformado derivado de semillas.	Diez estudios incluidos en la síntesis sistemática.
Tratamiento acuoso y remediación adyacente sin bioadsorbente basado en semillas	6 (10,3 %)	Aporta contexto sobre tratamiento de agua o remediación, pero no evalúa semillas como bioadsorbentes.	Seis registros conservados en el corpus bibliométrico amplio.
Fitotoxicidad, captación vegetal, fitoextracción y contaminación de suelos	16 (27,6 %)	Analiza exposición o remediación en plantas y suelos, sin remoción acuosa mediante semillas.	Dieciséis registros conservados en el corpus bibliométrico amplio.
Biofortificación, nutrición, priming y productividad vegetal con Se, B u otros elementos	22 (37,9 %)	Se orienta a nutrición o respuesta vegetal y no a un proceso de bioadsorción en agua.	Veintidós registros conservados en el corpus bibliométrico amplio.
Registros sin correspondencia suficiente con la pregunta de revisión	4 (6,9 %)	Aborda materiales, ingeniería o aplicaciones biomédicas sin coincidencia simultánea con metaloides, agua y semillas bioadsorbentes.	Cuatro registros conservados en el corpus bibliométrico amplio.

Nota. La clasificación se efectuó con títulos, resúmenes, palabras clave y metadatos de Scopus. Los diez registros de la primera categoría integraron la síntesis sistemática; los 48 restantes se conservaron únicamente para caracterizar el corpus bibliométrico amplio.

B. Desempeño de semillas y materiales derivados

Los diez estudios elegibles se distribuyeron en cinco intervenciones basadas en semillas o fracciones no carbonizadas y cinco comparadores transformados, como biochar, carbón activado o electrodos carbonosos. La Tabla IV integra preparación, matriz, condiciones, desempeño y mecanismo, con separación explícita entre intervención principal y material transformado.

TABLA IV
EVIDENCIA EXPERIMENTAL SOBRE REMOCIÓN DE METALOIDES MEDIANTE SEMILLAS O MATERIALES DERIVADOS

Cita	Material y preparación	Metaloide y matriz	Condiciones y desempeño principal	Mecanismo, modelo o caracterización	Clasificación
Ani et al. (2019), [17]	*Dialium guineense*, cáscara carbonizada, impregnada con $ZnCl_2$ y activada térmicamente.	As(III) en solución acuosa.	Área BET de 533,94 $m^2\ g^{-1}$ y volumen de microporo de 0,475 $cm^3\ g^{-1}$. La adsorción aumentó con dosis, pH, tiempo y temperatura, y disminuyó al aumentar la concentración inicial.	Freundlich, $R^2 = 0,998$. $\Delta H° = 51,68$ kJ mol^{-1}. FTIR, SEM y BET.	Comparador transformado
Mwangesi et al. (2025), [18]	*Moringa oleifera*, carbón activado incorporado en electrodos de desionización capacitiva.	Arsenito en agua, 100 mg L^{-1}.	89,38 % de remoción a 1,2 V y pH 9. Capacitancias de 201,3 y 122,62 F g^{-1} según formulación.	Electrosorción, microscopía electrónica, voltametría cíclica e impedancia.	Comparador transformado
Shakoor et al. (2019), [7]	Semilla de ciruela de Java comparada con otros residuos vegetales.	As(III) y As(V) en agua contaminada y prueba piloto en agua de consumo.	As(III): 78 a 87 % a pH 7. As(V): 67 % a pH 5,3. Máximo desempeño a 2 h. Desorción de hasta 97 % en cuatro ciclos.	Langmuir y pseudo-segundo orden. Grupos -OH, -COOH, $-NH_2$ y azufrados.	Intervención principal
Merodio-Morales et al. (2022), [10]	*Persea americana*, biochar funcionalizado con lantano y activado con CO_2 a temperatura ambiente.	Arsénico en agua.	Capacidad estimada de 15 a 20 mg g^{-1} entre 25 y 40 °C. Mejora de hasta 179 % frente a activación con N_2 a 800 °C.	Intercambio de ligandos y complejación sobre funcionalidades de lantano.	Comparador transformado

Pramanik et al. (2016), [19]	*Moringa oleifera*, semilla usada como coagulante y comparada con alumbre, BAC y BAF.	Arsénico e hierro en agua de consumo.	A 5 mg L^{-1}, la semilla removió 47 % de arsénico y 41 % de hierro. El desempeño aumentó con dosis y menor pH.	Coagulación y adsorción. La materia orgánica disuelta generó competencia.	Intervención principal
Giri et al. (2023), [20]	*Mangifera indica*, *Artocarpus heterophyllus* y una tercera biomasa registrada como *Schizizium commune*, convertidas en biochar.	Arsénico en agua residual simulada, 2,5 mg L^{-1}.	A pH 8,4 se reportaron 94 %, 93 % y 92 % de remoción.	Freundlich y pseudo-segundo orden. FTIR y XRD.	Comparador transformado
de Almeida et al. (2017), [21]	*Moringa oleifera*, semilla y extracto comparados con hidrotalcita y carbón activado.	Boro y otros contaminantes en lixiviado real.	La semilla y el extracto mostraron resultados insatisfactorios. Ningún tratamiento eliminó sodio, cloruro o toxicidad global.	La alta conductividad, materia orgánica, amonio, boro y sales limitaron la selectividad.	Intervención principal, resultado negativo
Frišták et al. (2018), [9]	*Vitis vinifera*, biochar de semilla producido a 600 °C, activado con aire o HNO_3 e impregnado con hierro.	Arsénico en solución acuosa modelo.	Equilibrio en 1440 min. La activación con aire y HNO_3 elevó Qmax 7,7 y 6,8 veces. Regeneración alcalina en varios ciclos.	Mayor superficie y afinidad por especies aniónicas.	Comparador transformado
Venegas-García y Wilson (2022), [22]	Mucílagos de linaza y fenogreco como bioflloculantes naturales.	Roxarsona y arsenato inorgánico, 50 mg L^{-1}.	Roxarsona: 92,0 % y 92,3 %. Arsenato: 77,0 % y 69,6 %. pH 7 a 7,5.	Coagulación-floculación, Box-Behnken y pseudo-primer orden.	Intervención principal
Nayyar et al. (2022), [8]	*Phyllanthus emblica*, cubierta de semilla prístina y derivatizada con 2-sulfanylacetamide.	As(III) en solución acuosa.	Dosis de 0,06 g L^{-1}, pH 7 y 120 min. Qmax de 76,92 y 90,90 mg g^{-1} para material prístino y derivatizado.	La derivatización elevó el área BET de 0,3152 a 0,5812 m^2 g^{-1}. FTIR y EDX.	Intervención principal modificada

Nota. Los datos cuantitativos corresponden a información explícita en títulos, resúmenes y metadatos del archivo de Scopus. Los biochars, carbones activados y electrodos se analizaron como comparadores transformados.

Entre los materiales no carbonizados, la semilla de ciruela de Java mostró una remoción superior para As(III) que para As(V), mientras la cubierta derivatizada de *Phyllanthus emblica* aumentó su capacidad máxima respecto al material prístino. Los mucílagos de linaza y fenogreco superaron 92 % para roxarsona, pero disminuyeron a 77,0 % y 69,6 % para arsenato inorgánico. Estas diferencias confirman que la especie química y el mecanismo de separación modifican el desempeño [7], [22], [8].

Los materiales transformados alcanzaron eficiencias entre 89,38 % y 94 % en condiciones controladas, aunque esos resultados no son atribuibles a la biomasa original. Los electrodos derivados de *Moringa oleifera* operaron con 100 mg L^{-1} de arsenito, pH 9 y 1,2 V [18], mientras los biochars de tres biomasas de semillas reportaron entre 92 % y 94 % a 2,5 mg L^{-1} y pH 8,4 [20]. La diferencia de concentración inicial, configuración y tratamiento impide ordenar los materiales mediante el porcentaje de remoción como indicador aislado.

C. Factores determinantes, mecanismos y vacíos

La integración de los diez estudios identificó siete dimensiones que condicionaron la comparación. La Tabla V resume cobertura del contaminante, preparación, pH, especiación, condiciones operativas, matriz, mecanismos y madurez de la evidencia.

En respuesta al objetivo, la composición y la preparación modificaron el desempeño, aunque su efecto no pudo separarse de pH, especiación, concentración inicial, dosis, tiempo y matriz. Los mejores porcentajes se observaron con frecuencia en condiciones controladas y en materiales activados o funcionalizados. Las semillas no carbonizadas también mostraron capacidad de remoción y regeneración, con respuestas dependientes de la especie química y del proceso. Los grupos -OH, -COOH, $-NH_2$ y funcionalidades azufradas fueron los sitios propuestos con mayor frecuencia, mientras la complejación superficial, el intercambio de ligandos, la coagulación-floculación y la electrosorción explicaron sistemas específicos.

El vacío principal fue la transferencia hacia aguas reales y sistemas continuos. La evidencia no sostuvo comparaciones para antimonio, selenio o telurio y presentó información limitada sobre concentración residual frente a valores normativos, incertidumbre analítica, lixiviación, estabilidad, costos, disposición final y escalamiento. Estos resultados respaldan protocolos que separen semillas sin carbonización de materiales térmicamente transformados y que reporten interferentes, regeneración y seguridad del residuo cargado.

TABLA V
FACTORES QUE EXPLICAN LA VARIABILIDAD DEL DESEMPEÑO Y VACÍOS DE INVESTIGACIÓN

Dimensión	Hallazgo integrado	Señal cuantitativa	Implicación	Citas principales
Cobertura y matriz	La evidencia se concentró en arsénico y predominó en soluciones modelo; las matrices reales redujeron selectividad.	9 de 10 estudios evaluaron arsénico; 1 examinó boro.	El alcance hacia otros metaloides constituye un vacío. La matriz debe tratarse como moderador principal.	Shakoor et al. (2019), [7]; de Almeida et al. (2017), [21]; Pramanik et al. (2016), [19]
Preparación del material	Carbonización, activación, impregnación y derivatización aumentaron superficie o afinidad, pero cambiaron la naturaleza del material.	Qmax aumentó 6,8 a 7,7 veces; la derivatización elevó 76,92 a 90,90 mg g-1; la activación con CO2 mejoró hasta 179 %.	Semillas sin carbonización y comparadores transformados requieren subgrupos separados.	Merodio-Morales et al. (2022), [10]; Frišták et al. (2018), [9]; Nayyar et al. (2022), [8]
Especiación y operación	El desempeño varió con especie química, pH, dosis, tiempo y concentración inicial.	As(III): 78-87 %; As(V): 67 %; roxarsona: >92 %; equilibrio: 120-1440 min.	La comparación debe integrar concentración residual, capacidad, dosis y tiempo.	Shakoor et al. (2019), [7]; Venegas-García y Wilson

				(2022), [22]; Ani et al. (2019), [17]
Mecanismos y modelos	Se propusieron complejación, intercambio de ligandos, electrosorción y coagulación-floculación.	Freundlich, Langmuir y pseudo-segundo orden fueron frecuentes.	Los ajustes matemáticos requieren verificación posadsorción y especiación superficial.	Ani et al. (2019), [17]; Shakoor et al. (2019), [7]; Merodio-Morales et al. (2022), [10]
Regeneración y escalamiento	La información sobre ciclos, lixiviación, costos, disposición y operación continua fue limitada.	Desorción de hasta 97 % en cuatro ciclos; regeneración alcalina en varios ciclos.	La aplicación sanitaria exige estabilidad, balance de masa y control del residuo cargado.	Shakoor et al. (2019), [7]; Frišták et al. (2018), [9]

Nota. Las comparaciones corresponden a síntesis cualitativa y no constituyen un metaanálisis.

D. Perfil bibliométrico del corpus amplio

El corpus bibliométrico reunió 58 registros publicados entre 2016 y 2026, con 1 126 citas acumuladas y una mediana de 9,5 citas por artículo al 3 de agosto de 2026.

La producción se concentró en el periodo reciente. Cuarenta y un documentos, equivalentes al 70,7 %, se publicaron entre 2022 y 2026, con máximos de 11 artículos en 2022 y 2025. La Fig. 2 muestra la evolución anual y permite observar el aumento del volumen documental, aunque parte de ese crecimiento corresponde a líneas periféricas identificadas durante el cribado temático.

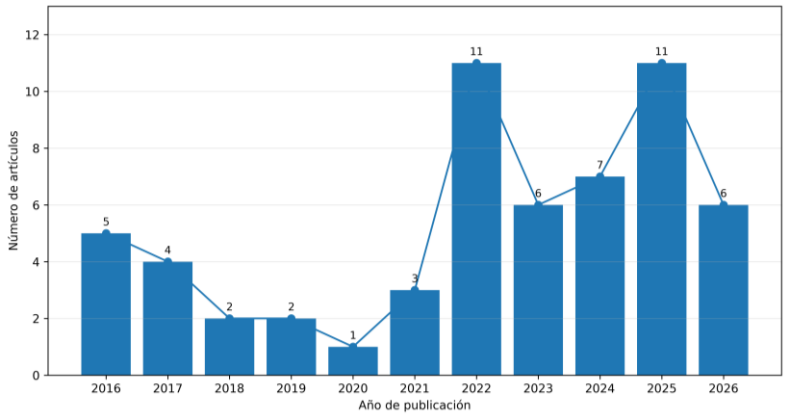


Fig. 2. Producción científica anual del corpus bibliométrico amplio.

Nota. El año 2026 comprende publicaciones disponibles hasta el 3 de agosto. Fuente: elaboración propia a partir de 58 registros de Scopus.

La participación por país se concentró en Asia y Oriente Medio. China intervino en 15 artículos, India en 9, Egipto y Arabia Saudita en 8 cada uno, y Estados Unidos en 5. La Fig. 3 emplea conteo completo, por lo que un artículo con autores de varios países se asignó a cada país participante.

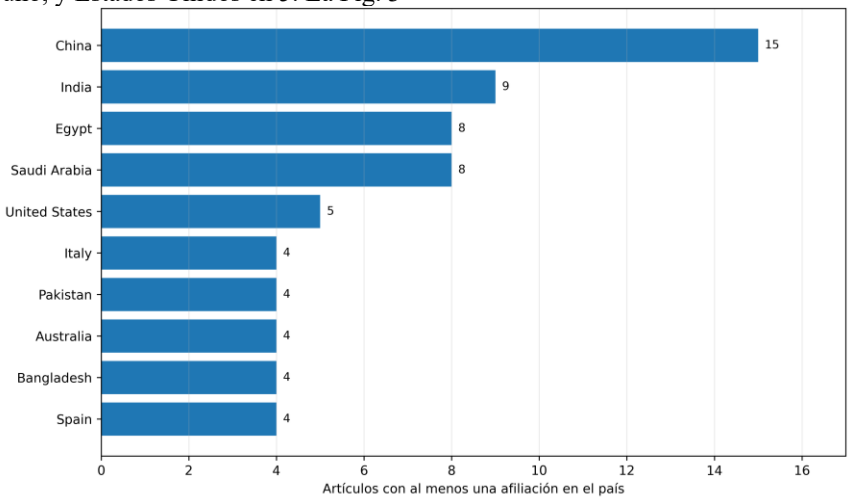


Fig. 3. Países con mayor participación en el corpus bibliométrico amplio.

Nota. Conteo completo por afiliación. La suma por países supera 58 debido a la coautoría internacional. Fuente: elaboración propia a partir de metadatos de Scopus.

La red de coocurrencia confirmó la amplitud temática de la búsqueda. La Fig. 4 separó conjuntos relacionados con arsénico, adsorción y tratamiento de agua, semillas y remediación de suelos, metales y propiedades edáficas, y selenio, antioxidantes y estrés vegetal. La coexistencia de estos conjuntos explica la alta proporción de registros excluidos por

C.E.5 y respalda la separación entre el corpus bibliométrico amplio y los diez estudios incluidos en la síntesis sistemática.

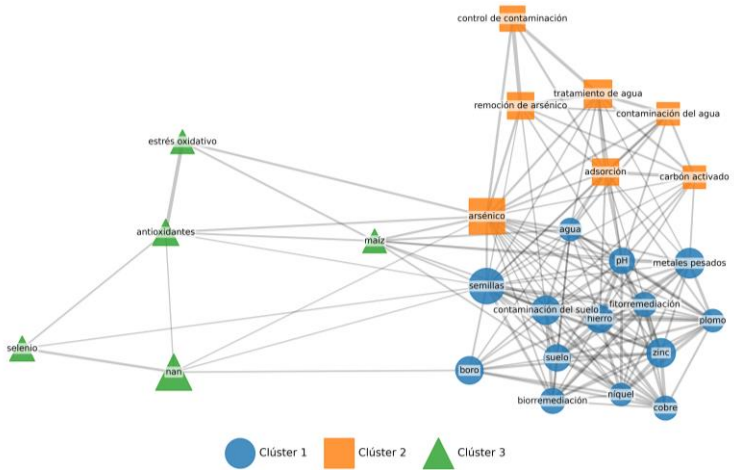


Fig. 4. Red de coocurrencia de palabras clave normalizadas en el corpus bibliométrico amplio.
Nota. Conteo completo, normalización por fuerza de asociación y umbral mínimo de dos apariciones. El tamaño del nodo representa frecuencia y las conexiones representan coocurrencia documental. Fuente: elaboración propia a partir de palabras clave de autor e índice de Scopus.

IV. DISCUSIÓN

A. Delimitación del campo y solidez de la evidencia

La concentración de nueve estudios en arsénico confirma que la investigación con biomasa de semillas se ha desarrollado alrededor de este contaminante. Giri et al. documentaron remociones cercanas a 93 % y 91 % con biomasas de semillas de ciruela de Java y amaltás en agua residual sintética [23]. Un trabajo posterior con vainas de *Cassia fistula* alcanzó alrededor de 91 % de As(III) bajo condiciones optimizadas, lo que reforzó el interés por residuos vegetales con grupos oxigenados y nitrogenados [24]. En una investigación más reciente, la biomasa de semillas de *Prosopis juliflora* alcanzó 91,11 % de remoción de As(III) bajo una relación biomasa-arsénico de 8:1, pH 7,5 y 90 min [25]. Maity et al. también registraron afinidad del polvo de semillas de *Artocarpus heterophyllus* por As(V), junto con Cd(II) y Cr(VI), aunque estos dos últimos contaminantes funcionan como referencias de selectividad y no como metaloides [26]. La ausencia de ensayos elegibles para antimonio, selenio y telurio impide extender a esos elementos los mecanismos observados para el arsénico. El único estudio sobre boro mostró una respuesta desfavorable en una matriz multicomponente, por lo que el alcance hacia "otros metaloides" debe interpretarse como un vacío documentado. Esta precisión aumenta la validez externa de la revisión, porque evita equiparar especies con comportamiento ácido-base, carga y afinidad superficial diferentes.

B. Efecto de la preparación del material

Los resultados distinguen dos rutas tecnológicas. La primera conserva la estructura original de la semilla mediante lavado, secado, molienda, extracción o derivatización. La segunda transforma la biomasa mediante carbonización, activación o incorporación de fases metálicas. Las semillas sin carbonización reducen etapas de producción y conservan grupos hidroxilo, carboxilo, carbonilo, amino y azufrados, aunque su composición varía con la especie, la madurez, el procesamiento previo y el almacenamiento. En los estudios de semillas de ciruela de Java y amaltás, el desempeño alto se obtuvo en soluciones sintéticas y bajo combinaciones específicas de pH, dosis y concentración [23], de modo que la eficiencia no constituye una propiedad fija del residuo. La misma dependencia se observó en biochar de paja de arroz, cuyo desempeño frente a As(V) estuvo condicionado por pH, dosis y propiedades desarrolladas durante la pirólisis [27].

La modificación química aumentó la afinidad de materiales con baja superficie inicial. La derivatización de la cubierta de *Phyllanthus emblica* elevó la capacidad máxima de 76,92 a 90,90 mg g^{-1} [8]. Este aumento respalda la incorporación de grupos con azufre como estrategia para incrementar sitios reactivos; una tendencia comparable se registró al tiolar biochars de bagazo de caña y cascarilla de arroz para mejorar la retención de As(III) frente a sus materiales prístinos [28]. No obstante, la funcionalización introduce reactivos, lavados y corrientes residuales que deben incorporarse en cualquier comparación de sostenibilidad. En forma paralela, el biochar de semilla de *Persea americana* funcionalizado con lantano mostró una mejora de hasta 179 % frente a una ruta térmica de referencia [10]. En este caso, la fase de lantano y el desarrollo de poros explican una parte central de la retención, por lo que el resultado no debe atribuirse a la semilla sin transformar.

Los materiales híbridos confirman esa diferencia. Un biochar dopado con nitrógeno e impregnado con Fe_3O_4 alcanzó capacidades de 18,15 mg g^{-1} para As(III) y 9,87 mg g^{-1} para As(V), superiores a las del biochar prístino y las nanopartículas de magnetita evaluadas por separado [29]. Nand et al. emplearon biochar de biomasa de menta desaceitada modificado con hierro y atribuyeron la remoción a complejación superficial, interacción electrostática y difusión en poros [30]. La mejora de afinidad debe contrastarse con la carga ambiental de la transformación; un análisis de biochar activado por microondas y modificado con hierro mostró que consumo energético, reactivos y costo de preparación alteran la ventaja aparente del adsorbente [31]. Estos antecedentes sostienen la decisión metodológica de analizar semillas nativas,

semillas modificadas y comparadores carbonizados en subgrupos distintos. Una clasificación conjunta elevaría artificialmente el desempeño asignado a la biomasa original y ocultaría el costo material y energético de la transformación.

C. Especiación, pH y condiciones operativas

La especie química del arsénico modificó de forma consistente la respuesta. Los mucílagos de linaza y fenogreco retiraron más de 92 % de roxarsona, mientras la remoción de arsenato inorgánico disminuyó a 69,6-77,0 % [22]. Esta diferencia muestra que la carga, el tamaño molecular y la presencia de grupos orgánicos cambian la interacción con polisacáridos y proteínas. También explica por qué una eficiencia obtenida con arsenato orgánico no debe trasladarse a As(III) o As(V) sin una validación específica.

El pH actúa sobre la especiación del soluto y la ionización del bioadsorbente. En medios cercanos a la neutralidad, As(V) se encuentra principalmente como oxianiones, mientras una fracción importante de As(III) permanece como H_3AsO_3 sin carga. Singh y Maiti registraron capacidades de 21 g kg^{-1} para As(V) y 14 g kg^{-1} para As(III) con un compuesto de laterita y biochar, y relacionaron la mayor retención de As(V) con atracción electrostática y complejación en óxidos de hierro y aluminio [32]. En agua subterránea rica en fosfato, la combinación de coagulación en línea y adsorción también mostró que la competencia aniónica modifica la dosis requerida y la estabilidad del tratamiento [33]. La ventaja de una especie sobre otra cambia cuando el material presenta sitios metálicos, grupos protonables o capacidad oxidante, por lo que el pH óptimo debe interpretarse junto con el punto de carga cero, el potencial redox y los aniones competidores.

La dosis, el tiempo y la concentración inicial explicaron otra parte de la dispersión. El corpus incluyó concentraciones entre 2,5 y 100 mg L^{-1}, tiempos de equilibrio entre 120 y 1440 min y configuraciones por lotes, floculación y electrosorción. El porcentaje de remoción aumenta con la masa de adsorbente cuando existen sitios disponibles, pero la capacidad expresada en mg g^{-1} suele disminuir por subutilización del material. A su vez, una eficiencia alta desde una concentración inicial elevada no garantiza una concentración final compatible con agua de consumo. Esta diferencia se hizo evidente al escalar un nanocompuesto Fe-Mn desde lote hacia columna y piloto: la capacidad disminuyó desde 6,25 mg g^{-1} en solución sintética y 4,71 mg g^{-1} en agua subterránea hasta 0,551 mg g^{-1} en operación piloto [34]. Por esta razón, la comparación debe priorizar la concentración residual, la capacidad, la dosis específica, el tiempo de contacto y la incertidumbre analítica, junto con el porcentaje de remoción.

D. Efecto de la matriz acuosa y relevancia sanitaria

La mayor parte de la evidencia se generó con soluciones preparadas, donde el arsénico fue el soluto dominante. Esta configuración favorece la identificación de efectos de pH, dosis y tiempo, pero sobreestima el acceso a sitios activos frente a aguas con fosfato, bicarbonato, silicato, sulfato, materia orgánica y cationes multivalentes. En agua subterránea de una zona semiárida, un biosorbente de cáscara de sandía y su variante tratada con ácido cítrico mostraron respuestas dependientes de la concentración y del acondicionamiento, con una capacidad máxima reportada de 2,42 μg g^{-1} para el material sin tratar bajo una condición de 65 μg L^{-1} y 4 h [35]. En otra evaluación de escala piloto, el fosfato y las restricciones hidráulicas redujeron la capacidad respecto a los ensayos por lotes, aun cuando se mantuvo el mismo principio adsorptivo [34]. El orden de magnitud difiere del observado en soluciones sintéticas con mg L^{-1}, lo que impide comparar capacidades sin considerar el gradiente de concentración y la composición iónica. El compuesto de laterita y biochar evaluado por Singh y Maiti mantuvo actividad en agua subterránea, aunque el fosfato redujo la adsorción por competencia con las especies de arsénico [32]. Una planta piloto basada en coagulación en línea y adsorción confirmó que el fosfato obliga a ajustar la operación y puede limitar la duración efectiva del medio adsorbente [33]. Un resultado más restrictivo se observó con fibra de coco verde sin tratamiento en lixiviado de relleno sanitario. La concentración de arsénico disminuyó de 0,73 a 0,58 mg L^{-1}, equivalente a 20,1 %, bajo el pH original y temperatura ambiente [36]. La reducción fue menor que las eficiencias superiores a 80 % descritas en soluciones modelo, pero representa una evaluación más exigente por la presencia simultánea de sales, materia orgánica y otros contaminantes.

Estos contrastes apoyan el resultado negativo registrado con semilla de *Moringa oleifera* en lixiviado con boro. La matriz no constituye una variable secundaria, porque controla competencia, fuerza iónica, colmatación, desorción y selectividad. Para aplicaciones sanitarias, el indicador decisivo no es alcanzar una eficiencia elevada, sino reducir la concentración residual de cada especie por debajo del criterio aplicable sin liberar compuestos orgánicos, nutrientes o metales desde el propio material.

E. Interpretación de mecanismos

Los estudios del corpus propusieron complejación superficial, intercambio de ligandos, atracción electrostática, coagulación-floculación y electrosorción. La identificación de bandas -OH, -COOH, $-NH_2$ y grupos con azufre mediante FTIR ofrece evidencia de funciones disponibles, pero la presencia de una banda no demuestra por sí misma que ese grupo retuvo arsénico. De manera similar, un ajuste a Langmuir, Freundlich, pseudo-primer orden o pseudo-segundo orden describe el comportamiento matemático dentro del intervalo ensayado, pero no confirma una ruta molecular. La funcionalización con tioles incrementó la capacidad de biochars para As(III), aunque la atribución mecanística requirió contrastar cambios superficiales y composición elemental antes y después de la adsorción [28].

Los trabajos con caracterización posadsorción ofrecen un estándar mecanístico más sólido. Singh y Maiti combinaron FTIR, XPS y EPR para identificar enlaces Fe-O-As, diferenciar As(III) y As(V) retenidos y demostrar la participación de radicales hidroxilo en la oxidación de As(III) antes de su adsorción [32]. Xu et al. decoraron una estructura de bambú con nanocristales de α-FeOOH y atribuyeron la retención de As(V) y As(III) a complejación superficial en sitios de hierro, con una arquitectura monolítica que facilitó la separación del material [37] Ali et al. también observaron que PO_4^{3-} redujo la adsorción en un biochar con Fe_3O_4 y asociaron el proceso con grupos

superficiales, intercambio iónico y oxidación parcial de As(III) [29].

La evidencia futura debe combinar cambios espectroscópicos antes y después del tratamiento, especiación del arsénico en fase líquida y sólida, balances de masa, controles sin biomasa y ensayos con iones competidores. Esta combinación permitirá separar adsorción, precipitación, coagulación, oxidación y retención física. También reducirá la tendencia a asignar "quimisorción" a partir de un coeficiente de determinación alto en un modelo cinético.

F. Regeneración, seguridad del residuo y escalamiento

La regeneración apareció en pocos estudios y mostró resultados heterogéneos. El biochar magnético dopado con nitrógeno mantuvo capacidad de desorción durante siete ciclos, aunque la recuperación varió entre ciclos y especies [29]. El compuesto de laterita y biochar conservó más de 50 % de su capacidad inicial después de cinco ciclos con NaOH 0,2 M, y el ensayo TCLP indicó liberaciones de arsénico inferiores al umbral aplicado por los autores [32]. Una evaluación específica de fin de vida de nanocompuestos Fe-Mn mostró que regeneración, reutilización, estabilización y lixiviación deben evaluarse como un sistema integrado y no como resultados independientes [38]. Estos resultados muestran que la regeneración debe analizarse junto con pérdida de masa, consumo de reactivos, volumen del eluato, concentración de arsénico recuperado y estabilidad del residuo final.

El paso de lote a flujo continuo sigue siendo el principal límite de madurez tecnológica. Un estudio que comparó lote, columna y piloto con un nanocompuesto Fe-Mn registró rupturas entre 365 y 587 volúmenes de lecho en columna y alrededor de 475 volúmenes de lecho en piloto; la capacidad final dependió del caudal, del tiempo de contacto de lecho vacío y de la matriz real [34]. En una ruta basada en biomasa, la cáscara de pomelo modificada con hierro se evaluó en columnas de lecho fijo a 0,3 y 0,5 mg L^{-1}. Las capacidades calculadas con el modelo de Thomas fueron 8,54 ± 0,46 mg g^{-1} para As(V) y 5,83 ± 0,52 mg g^{-1} para As(III) bajo la condición de mayor concentración y lecho de 100 mm [39]. Los autores estabilizaron el adsorbente agotado en ladrillos y registraron lixiviación de arsénico entre 0,11 y 7,34 µg L^{-1}, integrando remoción, operación continua y gestión del residuo en una misma ruta.

Esta aproximación supera la evaluación basada únicamente en una eficiencia de lote. Una tecnología aplicable requiere curvas de ruptura, pérdida de carga, resistencia mecánica, recuperación del adsorbente, control microbiológico, estabilidad durante almacenamiento y una salida segura para el material saturado. En semillas sin carbonización también debe cuantificarse la liberación de carbono orgánico, proteínas, color y nutrientes, porque esos compuestos generan demanda de tratamiento posterior.

G. Lectura bibliométrica y agenda de investigación

El crecimiento del corpus desde 2022 muestra interés reciente por materiales biogénicos, pero la red de coocurrencia confirma que ese aumento incluye nutrición vegetal, suelo y biofortificación. La producción bibliométrica amplia no equivale a una expansión proporcional de ensayos de bioadsorción en agua. La concentración de afiliaciones en China, India, Egipto y Arabia Saudita refleja regiones con actividad intensa en contaminación por metaloides y valorización de biomasa, mientras la representación latinoamericana fue menor pese a la presencia documentada de arsénico en acuíferos de zonas áridas y semiáridas.

La agenda técnica debe priorizar comparaciones directas entre semillas bajo una misma matriz, concentración, dosis, granulometría y método analítico. Los estudios también deben informar pH inicial y final, potencial redox, pH_pzc, superficie específica, carga superficial, composición proximal, especiación de As(III)/As(V), concentración residual, replicación e intervalos de incertidumbre. La evaluación de materiales modificados debe incorporar rendimiento de producción, reactivos, consumo energético y lavado. El análisis de ciclo de vida y costos de un biochar activado por microondas y modificado con hierro demostró que una mayor capacidad no garantiza una opción ambiental o económicamente preferible si la activación intensifica el consumo energético [31]. El biochar de menta modificado con hierro ilustra la tendencia hacia materiales de mayor afinidad y análisis cinético detallado [30], mientras los estudios de piloto y columna muestran la necesidad de integrar hidráulica, matriz real y disposición del adsorbente agotado [34].

V. CONCLUSIONES

La evidencia publicada entre 2016 y 2026 se concentró en arsénico. Nueve de los diez estudios elegibles evaluaron As(III), As(V), arsénico total o arsenicales orgánicos, mientras un estudio examinó boro. No se encontraron ensayos directamente elegibles para antimonio, selenio o telurio. Por ello, el alcance hacia otros metaloides representa una brecha de investigación y no una base suficiente para generalizar el comportamiento observado con arsénico.

Las semillas y fracciones no carbonizadas mostraron capacidad de remoción mediante grupos hidroxilo, carboxilo, amino y azufrados, con respuestas dependientes de la especie química y las condiciones operativas. La derivatización, carbonización, activación e incorporación de hierro o lantano aumentaron superficie y afinidad, pero transformaron la naturaleza del material. La comparación técnica debe separar biomasa nativa, biomasa modificada y adsorbentes carbonizados, e integrar concentración residual, capacidad, dosis, tiempo, pH y concentración inicial.

La matriz acuosa fue uno de los factores con mayor efecto sobre la transferencia de resultados. Las soluciones sintéticas generaron las eficiencias más altas, mientras aguas subterráneas y lixiviados mostraron competencia por sitios activos y menor selectividad. La aplicación en agua de consumo requiere verificar especiación, interferentes, incertidumbre analítica, liberación de compuestos desde la biomasa y cumplimiento de la concentración final, no únicamente el porcentaje de remoción.

REFERENCIAS

[1] World Health Organization, Guidelines for Drinking-water Quality, 4th ed., incorporating the first and second addenda, Geneva, 2022. [Online]. Available: https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064

[2] World Health Organization, "Arsenic," Fact sheet, 2022. [Online]. Available: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/arsenic
[3] J. Podgorski and M. Berg, "Global threat of arsenic in groundwater," Science, vol. 368, no. 6493, pp. 845-850, 2020, doi: 10.1126/science.aba1510.
[4] A. E. Nigra et al., "Public water arsenic and birth outcomes in the Environmental Influences on Child Health Outcomes cohort," JAMA Network Open, vol. 8, no. 6, Art. no. e2514084, 2025, doi: 10.1001/jamanetworkopen.2025.14084.
[5] M. Hasan et al., "Relationship between low-level arsenic exposure in drinking water and kidney cancer risk in Texas," Environmental Pollution, vol. 363, Art. no. 125097, 2024, doi: 10.1016/j.envpol.2024.125097.
[6] World Health Organization, "Arsenic: Chemical fact sheet," Guidelines for Drinking-water Quality, 2022. [Online]. Available: https://cdn.who.int/media/docs/default-source/wash-documents/water-safety-and-quality/chemical-fact-sheets-2022/arsenic-fact-sheet-2022.pdf
[7] M. B. Shakoor 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.
[8] M. Nayyar, R. Kumar, and J. Chawla, "Development and characterization of N-substituted derivative of 2-sulfanylacetamide on Phyllanthus emblica seed coat as novel adsorbent for remediation of As(III) from water," Water Pract. Technol., vol. 17, no. 8, pp. 1742-1757, 2022, doi: 10.2166/wpt.2022.080.
[9] V. Frišták, E. Moreno-Jimenéz, T. Fresno, and E. Diaz, "Effect of physical and chemical activation on arsenic sorption separation by grape seeds-derived biochar," Separations, vol. 5, no. 4, Art. no. 59, 2018, doi: 10.3390/separations5040059.
[10] E. E. Merodio-Morales et al., "A novel CO2 activation at room temperature to prepare an engineered lanthanum-based adsorbent for a sustainable arsenic removal from water," Chem. Eng. Res. Des., vol. 185, pp. 239-252, 2022, doi: 10.1016/j.cherd.2022.07.003.
[11] United Nations, "Goal 6: Clean water and sanitation." [Online]. Available: https://sdgs.un.org/goals/goal6
[12] United Nations, "Goal 12: Responsible consumption and production." [Online]. Available: https://sdgs.un.org/goals/goal12
[13] M. J. Page et al., "The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews," BMJ, vol. 372, Art. no. n71, 2021, doi: 10.1136/bmj.n71.
[14] M. L. Rethlefsen et al., "PRISMA-S: an extension to the PRISMA Statement for Reporting Literature Searches in Systematic Reviews," Systematic Reviews, vol. 10, Art. no. 39, 2021, doi: 10.1186/s13643-020-01542-z.
[15] J. L. Leiva Piedra, W. M. Hoyos Alayo, Z. B. Chávez Romero, and M. Fernández Miranda, "Environmental research from a European and Latin American perspective: A literature review," Proc. LEIRD 2024, 2024, doi: 10.18687/LEIRD2024.1.1.253.
[16] W. M. Hoyos Alayo, "Bioadsorption of arsenic by fruit residues: A systematic review," Proc. 23rd LACCEI Int. Multi-Conf. Engineering, Education and Technology, 2025, doi: 10.18687/LACCEI2025.1.1.589.
[17] J. U. Ani, A. E. Ochonogor, K. G. Akpomie, C. S. Olikagu, and C. C. Igboanugo, "Abstraction of arsenic(III) on activated carbon prepared from Dialium guineense seed shell: kinetics, isotherms and thermodynamic studies," SN Appl. Sci., vol. 1, no. 1, Art. no. 1304, 2019, doi: 10.1007/s42452-019-1335-1.
[18] M. Mwangesi, R. L. Machunda, and Y. A. Chande Jande, "Arsenic removal from water using capacitive deionization electrode materials derived from Moringa oleifera seeds," Adsorption Sci. Technol., vol. 43, Art. no. 02636174251387199, 2025, doi: 10.1177/02636174251387199.
[19] B. K. Pramanik, S. K. Pramanik, and F. Suja, "Removal of arsenic and iron removal from drinking water using coagulation and biological treatment," J. Water Health, vol. 14, no. 1, pp. 9-96, 2016, doi: 10.2166/wh.2015.159.
[20] D. D. Giri et al., "Waste seeds of Mangifera indica, Artocarpus heterophyllus, and Schizizium commune as biochar for heavy metal removal from simulated wastewater," Biomass Convers. Biorefinery, vol. 13, no. 15, pp. 13393-13402, 2023, doi: 10.1007/s13399-021-02078-5.
[21] N. C. de Almeida, V. J. A. de Oliveira, and D. F. de Angelis, "Comparison of the adsorptive action of hydrotalcite, Moringa oleifera and activated carbon in the treatment of landfill leachate," Desalin. Water Treat., vol. 9, pp. 22-23, 2017, doi: 10.5004/dwt.2017.21417.
[22] D. J. Venegas-García, and L. D. Wilson, "Utilization of Bioflocculants from Flaxseed Gum and Fenugreek Gum for the Removal of Arsenicals from Water," Mater., vol. 15, no. 23, Art. no. 8691, 2022, doi: 10.3390/ma15238691.
[23] D. D. Giri et al., "Java plum and amaltash seed biomass based bio-adsorbents for synthetic wastewater treatment," Environmental Pollution, vol. 280, Art. no. 116890, 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116890.
[24] 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, Art. no. 132308, 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132308.
[25] M. Samimi and M. Nouri, "Optimized removal of trivalent arsenic from aquatic environments using Prosopis juliflora seed biomass," Global Journal of Environmental Science and Management, vol. 11, no. 2, pp. 391-402, 2025, doi: 10.22034/gjesm.2025.02.02.
[26] S. Maity, P. B. Patil, S. SenSharma, and A. Sarkar, "Bioremediation of heavy metals from the aqueous environment using Artocarpus heterophyllus (jackfruit) seed as a novel biosorbent," Chemosphere, vol. 307, Art. no. 136115, 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.136115.
[27] A. Mukherjee et al., "Efficacy of agricultural waste derived biochar for arsenic removal: Tackling water quality in the Indo-Gangetic plain," Journal of Environmental Management, vol. 281, Art. no. 111814, 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111814.
[28] I. Masood ul Hasan et al., "Enhanced capacity of thiol-functionalized sugarcane bagasse and rice husk biochars for arsenite sorption in aqueous solutions," Environmental Science and Pollution Research, vol. 31, no. 39, pp. 52293-52305, 2024, doi: 10.1007/s11356-024-34661-4.
[29] H. Ali et al., "Efficiency of a novel nitrogen-doped Fe3O4 impregnated biochar for arsenic (III and V) removal from aqueous solution: Insight into mechanistic understanding and reusability potential," Arabian Journal of Chemistry, vol. 15, no. 11, Art. no. 104209, 2022, doi: 10.1016/j.arabjc.2022.104209.
[30] N. Nand et al., "Arsenic removal using de-oiled mentha biomass biochar: Adsorption kinetics and the role of iron modification," Journal of Cleaner Production, vol. 482, Art. no. 144247, 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.144247.
[31] L. Norberto et al., "Microwave activated and iron engineered biochar for arsenic adsorption: Life cycle assessment and cost analysis," Journal of Environmental Chemical Engineering, vol. 11, no. 3, Art. no. 109904, 2023, doi: 10.1016/j.jece.2023.109904.
[32] P. Singh and A. Maiti, "Optimized synthesis and characterization of laterite biochar composite for arsenic removal: Examining colloidal stability and As(III) oxidation," Biochar, vol. 6, Art. no. 100, 2024, doi: 10.1007/s42773-024-00389-0.
[33] J. Nikić et al., "Pilot study on arsenic removal from phosphate rich groundwater by in-line coagulation and adsorption," Journal of Hazardous Materials Advances, vol. 10, Art. no. 100280, 2023, doi: 10.1016/j.hazadv.2023.100280.
[34] J. Nikić, J. Jokić Govedarica, M. Watson, Đ. Pejin, A. Tubić, and J. Agbaba, "From batch to pilot: Scaling up arsenic removal with an Fe-Mn-based nanocomposite," Nanomaterials, vol. 15, no. 14, Art. no. 1104, 2025, doi: 10.3390/nano15141104.
[35] J. Letechipia et al., "Removal of arsenic from semiarid area groundwater using a biosorbent from watermelon peel waste," Heliyon, vol. 9, no. 2, Art. no. e13251, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13251.
[36] C. L. B. S. Lima, Í. T. A. Moreira, L. M. A. Campos, L. A. M. Pontes, and L. S. G. Teixeira, "Removal of arsenic from landfill leachate using green coconut fiber," Scientific Reports, vol. 15, Art. no. 37064, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-20861-6.
[37] L. Xu, Z. Shu, J. Song, T. Li, and J. Zhou, "Waste bamboo framework decorated with α-FeOOH nanoneedles for effective arsenic (V/III) removal," Science of the Total Environment, vol. 863, Art. no. 160951, 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160951.
[38] M. Vujić et al., "End-of-life management strategies for Fe-Mn nanocomposites used in arsenic removal from water," Polymers, vol. 17, no. 10, Art. no. 1353, 2025, doi: 10.3390/polym17101353.
[39] N. T. Hai et al., "Zero waste approaches in removing arsenic from water environment using iron coated pomelo peel adsorbent: Fixed-bed column scale and management spent adsorbents," Process Safety and Environmental Protection, vol. 205, Art. no. 108055, 2026, doi: 10.1016/j.psep.2025.108055.