InvestiGO
Revista Científica Multidisciplinaria
ISSN 2953-6367
http://revistainvestigo.com

Octubre 2026
Vol. 7 No. 21, PP. 80-92
https://doi.org/10.56519/zpsgaj57

DESARROLLO DE ADSORBENTES SOSTENIBLES A PARTIR DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES EN AGUAS RESIDUALES: REVISIÓN SISTEMÁTICA

DEVELOPMENT OF SUSTAINABLE ADSORBENTS FROM AGROINDUSTRIAL WASTE FOR THE REMOVAL OF EMERGING CONTAMINANTS IN WASTEWATER: A SYSTEMATIC REVIEW

Cristina Gisela Arias Arias[1], María Belen Jaramillo[2], Lorena Patricia Flores Luna[3], Ricardo Heriberto Andrade Piñeiros[4]

{cristinaariasarias3838@gmail.com[1], maria.jaramillo3873@utc.edu.ec[3], lp93fl@hotmail.com[3], ricardoandrade858@hotmail.com[4]}

Fecha de recepción: 01/07/2026 / Fecha de aceptación: 03/09/2026 / Fecha de publicación: 14/10/2026

RESUMEN: La existencia de contaminantes emergentes fármacos, antibióticos, colorantes sintéticos y plaguicidas en las aguas residuales representa una creciente amenaza para los ecosistemas acuáticos y la salud pública, dado que las plantas de tratamiento convencionales no fueron diseñadas para su eliminación. En este contexto, los adsorbentes obtenidos a partir de residuos agroindustriales se han erigido como una alternativa sostenible, económica y acorde con los conceptos de economía circular. El objetivo fue analizar la evidencia científica sistemática publicada entre 2016 y 2026 en relación con el desarrollo y la eficacia de adsorbentes sostenibles derivados de residuos agroindustriales para la remoción de contaminantes emergentes en aguas residuales. Se llevó a cabo una revisión sistemática de tipo bibliográfico siguiendo los lineamientos PRISMA 2020, llevando a cabo búsquedas en las bases de datos Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, PubMed y Royal Society of Chemistry. Se incluyeron investigaciones primarias y de revisión, indexadas, publicadas en inglés o español, que evaluaran adsorbentes de origen agroindustrial frente a metales pesados, colorantes, fármacos, antibióticos y/o plaguicidas. Se sintetizaron los hallazgos de 27 fuentes indexadas. Los biosorbentes y biocarbones procedentes de cáscaras, cascarillas, semillas y bagazos presentan eficiencias de remoción que, tras modificación química o activación térmica, en la mayoría de las ocasiones superan el 80–95 % para metales pesados y colorantes, y capacidades de adsorción de hasta 612 mg/g para determinados antibióticos. La regeneración del material y la validación de los resultados en matrices reales siguen siendo los principales retos identificados. Los residuos agroindustriales se configuran como una materia prima viable, de bajo coste, para el diseño de adsorbentes sostenibles, con un real potencial para complementar los sistemas de

[1]Investigador Independiente, https://orcid.org/0009-0001-6052-1049
[2]Investigador Independiente, https://orcid.org/0009-0006-8986-9256
[3]Investigador Independiente, https://orcid.org/0009-0006-4370-9732
[4]Fundaer, https://orcid.org/0009-0004-1090-4545

tratamiento convencionales de aguas residuales, aunque requerían más evidencia sobre su desempeño a nivel piloto industrial.

Palabras clave: Adsorción, biosorbentes, residuos agroindustriales, contaminantes emergentes, aguas residuales, economía circular

ABSTRACT: The presence of emerging contaminants—such as pharmaceuticals, antibiotics, synthetic dyes, and pesticides—in wastewater poses a growing threat to aquatic ecosystems and public health, since conventional wastewater treatment plants were not designed to remove them. In this context, adsorbents derived from agro-industrial waste have emerged as a sustainable, cost-effective alternative that aligns with the principles of the circular economy. The objective was to analyze the systematic scientific evidence published between 2016 and 2026 regarding the development and efficacy of sustainable adsorbents derived from agro-industrial waste for the removal of emerging contaminants in wastewater. A bibliographic systematic review was conducted following the PRISMA 2020 guidelines, with searches performed in the Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, PubMed, and Royal Society of Chemistry databases. The review included indexed primary and review studies published in English or Spanish that evaluated agroindustrial adsorbents against heavy metals, dyes, pharmaceuticals, antibiotics, and/or pesticides. The findings from 27 indexed sources were synthesized. Biosorbents and biochar derived from shells, husks, seeds, and bagasse exhibit removal efficiencies that, following chemical modification or thermal activation, in most cases exceed 80–95% for heavy metals and dyes, and adsorption capacities of up to 612 mg/g for certain antibiotics. Material regeneration and the validation of results in real matrices remain the main challenges identified. Agro-industrial waste emerges as a viable, low-cost raw material for the design of sustainable adsorbents, with real potential to complement conventional wastewater treatment systems, although more evidence on their performance at the industrial pilot scale is needed.

Keywords: Adsorption, biosorbents, agroindustrial waste, emerging contaminants, wastewater, circular economy

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso cada vez más escaso y vulnerable al crecimiento poblacional, la aceleración de la industrialización y el cambio climático. Por lo tanto, el empirismo de su contaminación ha dejado de ceñirse a los condicionantes clásicos del oxígeno demandado en su medio biológico, el de los sólidos en suspensión o el de los metales pesados, para dar entrada a un grupo heterogéneo de compuestos que han sido incluidos por los autores bajo el término de contaminantes emergentes, entre los cuales encontramos fármacos, productos de cuidado personal, colorantes sintéticos, plaguicidas o disruptores endocrinos (1), (2). Dichos compuestos tienen una aparición discreta en el medio acuático, unas concentraciones que comúnmente se encuentran en una gama de ng/L hasta µg/L, presentan una alta persistencia medio ambiental algunos de ellos pueden incluso ser considerados como emergentes por su potencial oncogénico y poseen efectos toxicológicos que se encuentran todavía por explicar, lo que ha incentivado el interés creciente de la comunidad científica internacional en el desarrollo de tecnologías de remediación más eficientes y sostenibles.

Numerosos estudios realizados a nivel mundial evidencian que las plantas convencionales de tratamiento de aguas residuales, cuya finalidad principal es la eliminación de materia orgánica y de nutrientes, no son capaces de eliminar completamente este tipo de sustancias, obteniéndose unas eficiencias medias de eliminación de solamente el 48 % hasta el 77 % en determinados grupos de antibióticos (3). Como resultado de lo anterior, los contaminantes emergentes son vertidos de manera indefinida hacia ríos, lagos y acuíferos, tal y como sucede en la resistencia antimicrobiana, en la disrupción endocrina para los organismos acuáticos y en los peligros que todavía no son cuantificables e identificables para la salud humana (4), (5).

Como respuesta a esta problemática se ha puesto en práctica múltiples tecnologías con carácter de tratamiento avanzado (procesos de oxidación avanzada, filtración por membranas, ósmosis inversa, fotocatálisis, adsorción…), cada una con sus ventajas y desventajas concretas. La adsorción ha llegado a ser una de las opciones más prometedoras debido a su sencilla operatividad, bajo coste relativo, alta eficiencia y facilidad de escalado en contraposición a tecnologías de altos costes energéticos o generadoras de subproductos tóxicos (6) (7). Sin embargo, la utilización de carbón activado comercial en forma de adsorbente de referencia entraña costes en la producción y regeneración elevados, lo que ha generado un interés por encontrar materiales alternativos y renovables de coste reducido.

En este sentido, los residuos agroindustriales (cáscaras de frutas, cascarillas de cereales, bagazos, semillas, pulpas y subproductos agroindustriales de café, cacao, banano, arroz, caña de azúcar) han despertado un interés especial como materia prima para un biosorbente y un biocarbono (1), (8). Estos materiales, que son generados anualmente en volúmenes de millones de toneladas y que son incinerados o dispuestos de forma inadecuada en muchos países, poseen una composición rica en celulosa, hemicelulosa, lignina y grupos funcionales superficiales (hidroxilo, carboxilo, carbonilo) capaces de interaccionar con distintas familias de contaminantes a través de mecanismos de intercambio iónico, complejación superficial, interacciones electrostáticas y enlaces de hidrógeno (9), (2).

Su uso como adsorbentes puede suponer, además de una solución de bajo coste para el tratamiento de aguas residuales, una alternativa para hacer frente al problema ambiental que la disposición inadecuada de estos residuos produce, alineándose con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (10) relativo a la producción y al consumo responsables y la economía circular o el concepto de «de residuo a riqueza» (11), (12). A nivel específico, la evidencia científica ha registrado el potencial de los residuos agroindustriales para la eliminación de al menos cuatro grandes familias de contaminantes. En primer lugar, para la eliminación de metales pesados (Pb, Cd, Cr, Ni, Cu, Zn), biosorbentes procedentes de cáscara de café, cacao, semillas de melón, tallos de plantas y otros residuos fibrosos han mostrado capacidades de adsorción competitivas frente a los materiales comerciales, en particular tras procesos de modificación ácida, alcalina o mixta (10), (13), (14).

En segundo lugar, para la eliminación de colorantes textiles, distintas revisiones sistemáticas han documentado que biocarbones procedentes de cáscaras de banano, bagazo de caña y cascara de arroz obtienen eficiencias de eliminación superiores al 85 % bajo condiciones óptimas de pH y dosificación (1), (9). Por último, en relación con los fármacos y los antibióticos, se ha verificado que biocarbones obtenidos por medio de fibra de palma de aceite, cascarilla de arroz y de otros subproductos agrícolas pueden adsorber hasta 612 mg/g para azitromicina y 600 mg/g para eritromicina, evidenciando eficiencias de remoción superiores al 95 % en

condiciones controladas (15), (16). Por último, para los plaguicidas se han evaluado adsorbentes modificados a partir de cascarilla de arroz y biocarbones de paja de trigo con resultados prometedores para imazetapir, imazamox y alaclor (17), (18).

A pesar de todo este acervo creciente de información, la literatura se caracteriza por una evidente heterogeneidad metodológica; así, los estudios son diferentes en relación a la materia prima utilizada, las condiciones de modificación o activación utilizadas, los modelos de isoterma y cinética utilizados para ajustar los datos experimentales y las condiciones fisicoquímicas de trabajo (pH, temperatura, dosis de adsorbente, concentración inicial del contaminante). Esta heterogeneidad metodológica hace difícil la posibilidad de una comparación directa entre estudios y, en consecuencia, limita la posibilidad de elegir los materiales y condiciones más esperanzadores para una eventual aplicación a nivel piloto o industrial (6), (19). De igual forma, la existencia de ensayos que analicen la regeneración, la reutilización y el comportamiento de los biosorbentes en sistemas de agua residual real ha sido denunciada repetidamente, en contraposición con la mayor parte de los ensayos que tienen lugar en soluciones sintéticas monocomponente (6), (3).

El problema de investigación que guía la elaboración del presente trabajo se puede formular del modo siguiente: si bien existe un volumen importante de producción científica alrededor de adsorbentes producidos a partir de residuos agroindustriales, dicha evidencia se encuentra diseminada entre diferentes familias de contaminantes, tipos de residuos y enfoques metodológicos, sin que exista un estado del arte reciente y sistemático que sintetice tales hallazgos y permita identificar patrones de eficiencia, vacíos de conocimiento y líneas de investigación preferentes para contextos como el latinoamericano, donde el repositorio de residuos agroindustriales es elevado y donde las alternativas tecnológicas de bajo coste son especialmente apreciadas (20), (14).

La justificación de esta revisión sistemática radica en el hecho de que, en suma, tres consideraciones resultan pertinentes para sostenerla. Primero, la necesidad ambiental y/o sanitaria de disponer de tecnologías de remediación accesibles ante la presencia creciente de contaminantes emergentes en cuerpos de agua. Segundo, la pertinentica económica y ambiental de valorizar residuos agroindustriales que hoy día suponen un activo ambiental en determinada medida en muchas cadenas productivas, de convertirlos en insumos con valor agregado. Tercero, la pertinencia metodológica de sistematizar la evidencia dispersa mediante un procedimiento riguroso y replicable que sirva de referencia para investigadores, tomadores de decisiones y operadores del sector del tratamiento de aguas en la región.

Por lo tanto, el objetivo de la revisión sistemática que se presenta a continuación es analizar la evidencia científica publicada entre el año 2016 y el 2026 sobre la producción y la eficiencia de adsorbentes sostenibles producidos a partir de residuos agroindustriales para la remoción de contaminantes emergentes en aguas residuales, con énfasis en los tipos de residuos empleados, los mecanismos de adsorción implicados, las eficiencias de remoción reportadas y los principales vacíos de conocimiento que guía la futura investigación en el área.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo responde a una investigación bibliográfica basada en un diseño de revisión sistemática de la literatura científica, realizado bajo las directrices de la declaración PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), reconocida internacionalmente como guía metodológica para asegurar la transparencia, la replicación y el rigor en la búsqueda, selección y síntesis de los estudios primarios y secundarios. La opción decisión por una síntesis narrativa y no por un metaanálisis cuantitativo se fundamenta en que la alta heterogeneidad de las variables experimentales que se han reportado en los estudios primarios (materia prima, contaminante objetivo, condiciones de operación, unidades de reporte) no es posible agregar estadísticamente los resultados.

La población de análisis se conformó por artículos científicos indexados de tipo experimental, revisiones sistemáticas y revisiones narrativas publicados entre enero de 2016 y julio de 2026, que abordaran o discutieran el desarrollo, la caracterización o la evaluación de adsorbentes o biosorbentes de residuos agroindustriales (cáscaras, cascarillas, bagazos, semillas, pulpas, tallos y subproductos vegetales) en remoción de contaminantes emergentes (fármacos, antibióticos, colorantes sintéticos, plaguicidas y metales pesados de relevancia ambiental) en matrices de agua residual o soluciones acuosas sintéticas representativas.

La búsqueda de información se desarrolló en bases de datos científicas indexadas de alto reconocimiento internacional: Scopus, Web of Science, ScienceDirect (Elsevier), SpringerLink, PubMed/PMC y Royal Society of Chemistry (RSC Publishing), complementada con la verificación cruzada de referencias en Google Scholar.Se hicieron combinaciones de los términos de búsqueda en los idiomas español e inglés que incluyeron: «agricultural waste», «agro-industrial waste», «biosorbent», «biochar», «emerging contaminants», «wastewater treatment», «adsorption», «heavy metals», «pharmaceuticals», «dyes» y «pesticides», utilizando los operadores booleanos AND/OR.

Para cada una de los trabajos incluidos se extrajeron, cuando era posible, las siguientes variables: tipo de residuo agroindustrial que sirvió de precursor, tipo de contaminante objetivo, tipo de proceso de modificación o activación del adsorbente, eficiencia de remoción (%), capacidad máxima de adsorción del adsorbente (qmax, mg/g), el modelo de isoterma de mejor ajuste (Langmuir, Freundlich, etc.), el modelo cinético de mejor ajuste (pseudo-primer orden, pseudo-segundo orden), condiciones experimentales relevantes (pH, dosis de adsorbente, temperatura) y rendimiento en ciclos de regeneración.

Dado el carácter cualitativo-descriptivo de la revisión, el análisis de los datos se desarrolló mediante estadísticas descriptivas simples (rangos, valores extremos, frecuencias de aparición de los distintos modelos de isoterma y cinética) y síntesis narrativa por categoría de contaminantes, sin la utilización de técnicas inferenciales ni de meta-análisis cuantitativos, acorde con la heterogeneidad de los estudios primarios incluidos.

El sistema de búsqueda, selección y análisis de la información se basó en las cuatro fases que han sido establecidas por el protocolo PRISMA 2020-21: identificación, cribado, elegibilidad e inclusión. La Tabla 1 proporciona los detalles de los criterios metodológicos que fueron utilizados en cada una de las fases.

Tabla 1. Matriz metodológica del proceso de revisión sistemática según PRISMA 2020.

Fase PRISMA	Criterio aplicado	Detalle
Identificación	Bases de datos consultadas	Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, PubMed/PMC, RSC Publishing
Identificación	Periodo de búsqueda	Enero de 2016 – julio de 2026
Identificación	Palabras clave	agricultural/agro-industrial waste; biosorbent; biochar; emerging contaminants; adsorption; heavy metals; pharmaceuticals; dyes; pesticides
Cribado	Criterios de inclusión	Artículos indexados en revistas con revisión por pares; texto completo disponible; idioma español o inglés; adsorbente de origen agroindustrial; contaminante de tipo emergente o metal pesado de relevancia ambiental
Cribado	Criterios de exclusión	Estudios sin datos experimentales o de síntesis verificables; adsorbentes sintéticos no derivados de biomasa; duplicados entre bases de datos; congresos sin arbitraje; publicaciones anteriores a 2016
Elegibilidad	Evaluación de calidad	Revisión del título, resumen y texto completo por los autores; verificación de la indexación de la revista y del DOI
Inclusión	Síntesis de datos	Extracción de variables en matriz de datos: residuo precursor, contaminante, eficiencia de remoción, qmax, isoterma, cinética, regeneración
Inclusión	Número final de fuentes	27 fuentes indexadas incorporadas a la síntesis narrativa final

La aplicación estructurada del protocolo PRISMA 2020 permitió delimitar de manera objetiva el universo de estudios analizados, minimizando el riesgo de sesgo en la selección de la evidencia. La combinación de bases de datos multidisciplinarias (ciencias ambientales, química e ingeniería) garantizó una cobertura amplia de la producción científica sobre el tema, mientras que los criterios de exclusión permitieron descartar estudios que no aportaban evidencia experimental verificable o que se encontraban fuera del periodo de interés. Este procedimiento otorga trazabilidad y replicabilidad al proceso de búsqueda, aspectos centrales de cualquier revisión sistemática de calidad.

RESULTADOS

En lo siguiente, se enumeran los resultados más destacados de la revisión, organizándolos en cuatro grupos dependiendo del tipo de contaminante objetivo: metales pesados, colorantes sintéticos, fármacos y antibióticos, y plaguicidas. Para cada tipo de contaminante se nombran los residuos agroindustriales que más se estudian en los trabajos revisados, las eficacias de remoción ofrecidas y los mecanismos de la adsorción que predominan. Esto último sirve para mostrar una visión comparativa y objetiva del estado de la cuestión.

Remoción de metales pesados

En la Tabla 2 se indican los residuos agroindustriales más trabajados como biosorbentes de metales pesados (Pb, Cd, Cr, Ni, Cu y Zn) en la literatura revisada. En general, los trabajos reportan que las modificaciones químicas (tratamientos ácidos, alcalinos o mixtos) aumentan entre 1.5 y 3 veces la capacidad de adsorción de los materiales respecto a su forma cruda, principalmente a consecuencia de la exposición de nuevos grupos funcionales superficiales (3), (9).

Tabla 2. Biosorbentes agroindustriales evaluados para la remoción de metales pesados.

Residuo agroindustrial	Metal(es) evaluado(s)	Hallazgo principal	Ref.
Cáscara de café (Arabica) y cacao (Theobroma)	Pb(II)	Biosorbentes agroindustriales latinoamericanos con capacidad efectiva de remoción de plomo en soluciones acuosas	(14)
Residuo de semilla de melón (Cucumis melo) desgrasada	Metales pesados seleccionados	Biosorbente renovable con buen ajuste a modelos cinéticos e isotérmicos clásicos	(10)
Rumex acetosella (biomasa modificada ácida/alcalina/mixta)	Cationes metálicos	Las modificaciones alcalina y mixta mejoran significativamente la capacidad de remoción frente al material sin tratar	(13)
Residuos fibrosos de origen vegetal (alimentario)	Metales pesados diversos	Los grupos pectina, hemicelulosa y celulosa favorecen la unión de iones metálicos; capacidad variable según fuente y modificación	(12)
Residuos agrícola-industriales diversos (cáscaras, bagazos)	Metales pesados de relevancia ambiental	Los biosorbentes de bajo costo constituyen alternativa viable frente a intercambiadores iónicos comerciales	(11)

La información obtenida apunta a que los residuos de elevado contenido en compuestos fenólicos, pectina y celulosa, como pueden ser la cáscara de café y la cáscara de cacao, ampliamente presentes en países productores, como Ecuador, Colombia o Perú, poseen una específica afinidad por cationes divalentes como el Pb(II). Esto debe de ser considerado en un contexto especialmente productivo en Latinoamérica en donde existen grandes volúmenes de generación de residuos de bajo valor (14), (13). Por otro lado, se debe resaltar que el tipo de modificación química experimental del precursor (es decir, el material inicial) fue la clave determinante en el rendimiento final de la eficiencia de la utilización de los residuos, independientemente del tipo concreto de biomasa que se utilizó. Este hallazgo coincide con la consideración de que el pH y la existencia de grupos funcionales disponibles serían las variables que más pesan en los procesos de biosorción de metales (9), (3).

Remoción de colorantes sintéticos

Con respecto a los colorantes utilizados en los textiles, cuya vertiente incontrolada de la carga también afecta el nivel de penetración de luz solar y la actividad fotosintética en cuerpos de agua, la evidencia revisada coincide en señalar que los biocarbones y carbones

activados obtenidos mediante carbonización de los residuos agroindustriales (cáscara de banano, bagazo de caña, cascarilla de arroz, tallos de piña) alcanzan eficiencias de remoción que oscilan entre 80% y 95% en condiciones óptimas de pH y dosificación, sean colorantes

aniónicos o catiónicos (1), (9), (7). En el modelo de isoterma de Langmuir, el cual hace la suposición de que se produce una adsorption en monocapa en sitios homogéneamente energéticos, fue reportado como el que mayor cantidad de datos de ajuste se correspondía con el de mayor cantidad de datos de ajuste en la mayoría de los estudios revisados, y la cinética de pseudo-segundo orden predominó como descriptor de la naturaleza del proceso de adsorción, sugiriendo un mecanismo de quimisorción como una etapa limitante de la velocidad de reacción (1), (6).

Remoción de fármacos y antibióticos

La Tabla 3 brinda una escala con los principales resultados sobre el proceso de eliminación de fármacos y antibióticos con biocarbones y carbones activados de origen agroindustrial, clase de contaminantes emergentes que ha recibido la mayor atención científica en los últimos años porque se relaciona directamente con la resistencia antimicrobiana (21).

Tabla 3. Desempeño de biocarbones agroindustriales en la remoción de fármacos y antibióticos.

Residuo precursor	Contaminante	Resultado reportado	Ref.
Cascarilla de arroz (biocarbón, 450–600 °C)	Azitromicina y eritromicina	Remoción superior al 95 %; capacidades máximas de 612,22 y 599,72 mg/g respectivamente	(15)
Marlojo/olote de maíz (corn cob)	Antibióticos tipo tirosina	Capacidad de adsorción de 14,4 mg/g; mejor ajuste al modelo de Langmuir	(15)
Fibra de palma de aceite (biocarbón)	Tres fármacos representativos	Buen ajuste cinético e isotérmico; mecanismo confirmado mediante análisis computacional	(16)
Huesos de aceituna (olive stones)	Residuos farmacéuticos diversos	Remoción eficiente mediante diseño de mezclas experimentales optimizado	(19)
Biomasa microbiana y polímeros naturales	Fármacos en general	Biomateriales compuestos con potencial de aplicación industrial, aún en fase de escalamiento	(18)
Biocarbón agroindustrial general	Plantas de tratamiento convencionales (línea base)	Eficiencia promedio de remoción de antibióticos de apenas 48–77 % sin tratamiento avanzado	(15)

Los datos indican que los biocarbones producidos a temperaturas de pirólisis moderadas a altas (450–600 °C) tienen capacidades de adsorción significativamente mayores para moléculas de fármacos voluminosos como son los macrólidos, frente a adsorbentes de menor grado de carbonización (15). Este resultado se puede explicar de acuerdo con el hecho de que el aumento de la temperatura de pirólisis favorece el desarrollo de microporosidad, área superficial específica e hidrofobicidad, que son características que determinan la retención de compuestos orgánicos de baja polaridad (16), (22).También es importante destacar que la eficiencia de eliminación lograda por los biocarbones agroindustriales supera con creces la media reportada para plantas convencionales sin un tratamiento avanzado, lo cual refuerza el argumento de que la necesidad de incluir etapas de adsorción con materiales de bajo coste puede ser una solución técnicamente razonable para agregar a los sistemas existentes (15), (3).

Remoción de plaguicidas

En el caso de los plaguicidas, se presenta una evidencia relativamente menor aunque también con muy buenos resultados. La cascarilla de arroz modificada se ha probado con éxito en la eliminación de los herbicidas imazetapir e imazamox, mientras que los biocarbones generados a partir de paja de trigo mostraban eficiencias en la eliminación del herbicida alaclor entre el 76 % y el 94 %, alcanzando capacidades máximas de adsorción de hasta 1,94 mg/g bajo el modelo de Langmuir y una cinética de pseudo-segundo orden (17), (20). Una reciente revisión sobre el uso de biocarbones como adsorbentes de plaguicidas, la cual estudió 76 artículos de laboratorio, concluyó que el atrazina era el compuesto utilizado con mayor frecuencia (presente en el 22% de los artículos) y que el rendimiento de estos adsorbentes depende de forma crítica de la biomasa precursora, de las condiciones de pirolisis y de las estrategias de modificación superficial que se utilicen (20).

Mecanismos de adsorción, isotermas y modelos cinéticos

De modo transversal a las cuatro categorías de contaminantes analizadas, la revisión pone de manifiesto que los mecanismos de adsorción que han sido reportados con mayor frecuencia son, junto con el intercambio iónico, el de complejación superficial, las interacciones electrostáticas, las interacciones por formación de enlaces de hidrógeno y las interacciones π–π. Y todos ellos dependerán de la cláusula de la naturaleza del contaminante, así como del adsorbente (9), (6), (7). En cuanto a los modelos matemáticos utilizados para describir el proceso, el modelo de isoterma de Langmuir se encontraba presente en la mayoría de los artículos revisados antes que el de Freundlich, lo que sugiere que el mecanismo de adsorción definido es de monocapa sobre superficies energéticamente homogéneas; y el modelo cinético que mejor se ajustaba a la gran mayoría de los casos revisados lo constituye el cinético de pseudo-segundo orden, confirmando la hipotesis de que la quimisorción sería el que limitaría la velocidad del proceso (1), (7), (9).

DISCUSIÓN

Los resultados de esta revisión corroboran, en términos generales, la tendencia prevista por Kainth et al. (3) y Osman et al. (6), donde se determina que los biosorbentes a partir de residuos agroindustriales son opciones técnicamente competitivas respecto a los carbones activados comerciales, pero además son más económicos y favorecen la valorización de residuos; no obstante, al contrastar los resultados simplificados de los trabajos aquí reseñados, esto con los resultados de Chong et al. (1) y Karić et al. (2), presenta la coincidencia más que relevante y es que la inmensa mayoría de los trabajos primarios continúan evaluando el desempeño de los adsorbentes en soluciones sintéticas monocomponente, impidiendo así realizar extrapolaciones a matrices de agua residual real caracterizadas por la misma presencia de contaminantes, materia orgánica disuelta, variaciones de pH, temperatura y fuerza iónica.

En lo que respecta a la eliminación de metales pesados, los resultados obtenidos coinciden con los de Karim et al. (12) así como con los de Ligarda-Samanez et al. (13), en cuanto indica que la modificación química de la biomasa precursor es la que más mejora su capacidad de adsorción, sin importar la biomasa específica. Este comportamiento es congruente con los principios fisicoquímicos de la biosorción, donde se muestra cómo la disponibilidad de grupos funcionales activos sobre la superficie del biosorbente determina la adsorción de iones metálicos. Sin embargo, en contradicción a lo afirmado por Saxena et al. (11), quienes

conceden un gran peso al tamaño de partícula del biosorbente, la revisión presente no encontró evidencia suficientemente sistematizada respecto a dicha variable en los artículos más recientes, constituyendo esto una brecha metodológica a abordar en futuros trabajos.

Con relación a la eliminación de fármacos y antibióticos, los resultados de Ajala et al. y de Grisales-Cifuentes et al. , que presentan capacidades de adsorción de algunos cientos de mg/g para diferentes antibióticos, contrastan considerablemente con los valores menores (del orden de algunas decenas de mg/g) obtenido para otros fármacos por parte de Boudrahem et al. y de Rusu et al. (18). La diferencia entre estas dos referencias puede llegar a ser importante, dado que, como se reseña, la eficiencia de los biosorbentes agroindustriales tampoco puede ser generalizada para todas las familias farmacéuticas. Más bien la eficiencia como añaden Monisha et al. (17) y Kang et al. (22) en sus revisiones del biocarbón aplicado a la remediación de residuos farmacéuticos dependerá de la estructura molecular del contaminante, de la polaridad de este, así como de la afinidad del contaminante hacia los grupos funcionales presentes en el material empleado para la remediación (23).

Por otro lado, en el caso específico de los plaguicidas, la escasez relativa de estudios hallados en esta revisión comparados con las categorías de metales pesados y fármacos concuerda con la aseveración de Beljin et al. (24), ya que, de la totalidad de plaguicidas usados en el mundo, solo una proporción muy reducida ha sido objeto de estudio más allá del uso de adsorbentes de tipo biológico, constituyendo ésta una limitación importante, sobre todo cuando el problema de la contaminación causada por agroquímicos es de gran magnitud, especialmente en los países de la región andina.

Por último, uno de los elementos transversales salidos de la discusión de los distintos estudios, como uno de los puntos a mejorar, es la escasa evidencia disponible acerca de la regeneración y reutilización de los biosorbentes en múltiples ciclos de adsorción-desorción, un aspecto clave para la viabilidad económica de este tipo de tecnologías a escala real. Si bien algunos estudios han reportado eficiencias de regeneración de más del 70 % tras varios ciclos gracias al uso de ácidos, álcalis o agentes quelantes (6), (9), la mayoría de las investigaciones primarias no abordan este punto de forma sistemática, aspecto que constituye, junto con la validación en matrices reales y el escalado a nivel planta piloto, una de las líneas de investigación futura que se deriva de esta revisión (25), (26).

CONCLUSIONES

La citada revisión sistemática adolece de aportar la evidencia científica publicada desde 2016 hasta un año de finalización en 2026 en torno al desarrollo y la eficiencia de los adsorbentes sostenibles provenientes de residuos agroindustriales para la remoción de contaminantes emergentes en las aguas residuales, cumpliendo así el objetivo planteado desde el principio. Los resultados obtenidos permiten concluir que los residuos agroindustriales con cascaras, cascarillas, bagazos, semillas y los subproductos agroindustriales del café, el cacao, el arroz y de la caña de azúcar son la materia prima técnicamente viable y de coste reducido para el diseño de biosorbentes y biocarbones adecuados para las aguas residuales.

Se concluye que la modificación química o la activación térmica del material precursor, constituyen el factor determinante para aumentar de una forma importante la capacidad de

adsorción ya que se han alcanzado eficiencias de remoción superiores al 80 % para metales pesados y colorantes y capacidades de adsorción de varios cientos de mg por gramo para algunos antibióticos, mientras que la evidencia existente para la remoción de plaguicidas, a pesar de ser esperanzadora, es todavía relativamente pobre, también que existen brechas metodológicas importantes en la literatura revisada, sobre todo en lo que respecta hasta la evaluación del desempeño de los adsorbentes en matrices de agua residual real, la sistematización de los ciclos de regeneración y reutilización, o el escalado de los procesos desde el nivel de laboratorio hasta plantas piloto o de tratamiento en la industria.

Cerrar estas brechas es necesario para confirmar el paso de estas tecnologías desde la investigación básica hasta la aplicación práctica y sostenible. Finalmente, se concluye que el aprovechamiento de residuos agroindustriales como adsorbentes, para zonas agrícolas de producción como Ecuador o de Latinoamérica, representa una oportunidad estratégica porque permite atacar simultáneamente dos problemáticas ambientales relevantes: la mala disposición de los residuos agrícolas y la contaminación del agua por contaminantes emergentes, acorde con los principios de la economía circular y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Chong ZT, Soh LS, Yong WF. Valorization of agriculture wastes as biosorbents for adsorption of emerging pollutants: Modification, remediation and industry application. Results in Engineering. 2023 Mar;17:100960. doi:10.1016/j.rineng.2023.100960
2. Karić N, Maia AS, Teodorović A, Atanasova N, Langergraber G, Crini G, et al. Bio-waste valorisation: Agricultural wastes as biosorbents for removal of (in)organic pollutants in wastewater treatment. Chemical Engineering Journal Advances. 2022 Mar;9:100239. doi:10.1016/j.ceja.2021.100239
3. Kainth S, Sharma P, Pandey OP. Green sorbents from agricultural wastes: A review of sustainable adsorption materials. Applied Surface Science Advances. 2024 Feb;19:100562. doi:10.1016/j.apsadv.2023.100562
4. Aguilar-Rosero J, Urbina-López ME, Rodríguez-González BE, León-Villegas SX, Luna-Cruz IE, Cárdenas-Chávez DL. Development and Characterization of Bioadsorbents Derived from Different Agricultural Wastes for Water Reclamation: A Review. Applied Sciences. 2022 Mar 7;12(5):2740. doi:10.3390/app12052740
5. Bobde P V., Sharma AK, Kumar R, Pandey JK, Wadhwa S. Recent advances on sustainable removal of emerging contaminants from water by bio-based adsorbents. New Journal of Chemistry. 2023;47(38):17626–44. doi:10.1039/D3NJ03731B
6. Osman AI, El-Monaem EMA, Elgarahy AM, Aniagor CO, Hosny M, Farghali M, et al. Methods to prepare biosorbents and magnetic sorbents for water treatment: a review. Environ Chem Lett. 2023 Aug 4;21(4):2337–98. doi:10.1007/s10311-023-01603-4
7. Kumar A, Nighojkar A, Varma P, Prakash NJ, Kandasubramanian B, Zimmermann K, et al. Algal mediated intervention for the retrieval of emerging pollutants from aqueous media. J Hazard Mater. 2023 Aug;455:131568. doi:10.1016/j.jhazmat.2023.131568
8. Amalina F, Razak ASA, Krishnan S, Sulaiman H, Zularisam AW, Nasrullah M. Biochar production techniques utilizing biomass waste-derived materials and environmental applications – A review. Journal of Hazardous Materials Advances. 2022 Aug;7:100134. doi:10.1016/j.hazadv.2022.100134

9. Ghosh S, Nandasana M, Webster TJ, Thongmee S. Agrowaste-generated biochar for the sustainable remediation of refractory pollutants. Front Chem. 2023 Nov 16;11. doi:10.3389/fchem.2023.1266556
10. Akhtar T, Batool F, Ahmad S, Al-Farraj ES, Irfan A, Iqbal S, et al. Defatted Seed Residue of Cucumis Melo as a Novel, Renewable and Green Biosorbent for Removal of Selected Heavy Metals from Wastewater: Kinetic and Isothermal Study. Molecules. 2022 Oct 7;27(19):6671. doi:10.3390/molecules27196671
11. Saxena A, Bhardwaj M, Allen T, Kumar S, Sahney R. Adsorption of heavy metals from wastewater using agricultural–industrial wastes as biosorbents. Water Science. 2017 Oct 1;31(2):189–97. doi:10.1016/j.wsj.2017.09.002
12. Karim A, Raji Z, Karam A, Khalloufi S. Valorization of Fibrous Plant-Based Food Waste as Biosorbents for Remediation of Heavy Metals from Wastewater—A Review. Molecules. 2023 May 20;28(10):4205. doi:10.3390/molecules28104205
13. Ligarda-Samanez CA, Choque-Quispe D, Palomino-Rincón H, Ramos-Pacheco BS, Moscoso-Moscoso E, Huamán-Carrión ML, et al. Modified Polymeric Biosorbents from Rumex acetosella for the Removal of Heavy Metals in Wastewater. Polymers (Basel). 2022 May 28;14(11):2191. doi:10.3390/polym14112191
14. Lavado-Meza C, De la Cruz-Cerrón L, Cisneros-Santos G, De la Cruz AH, Angeles-Suazo J, Dávalos-Prado JZ. Arabica-coffee and teobroma-cocoa agro-industrial waste biosorbents, for Pb(II) removal in aqueous solutions. Environmental Science and Pollution Research. 2023 Jan 8;30(2):2991–3001. doi:10.1007/s11356-022-22233-3
15. AJALA OA, AKINNAWO SO, BAMISAYE A, ADEDIPE DT, ADESINA MO, OKON-AKAN OA, et al. Adsorptive removal of antibiotic pollutants from wastewater using biomass/biochar-based adsorbents. RSC Adv. 2023;13(7):4678–712. doi:10.1039/D2RA06436G
16. Grisales-Cifuentes CM, Serna Galvis EA, Porras J, Flórez E, Torres-Palma RA, Acelas N. Kinetics, isotherms, effect of structure, and computational analysis during the removal of three representative pharmaceuticals from water by adsorption using a biochar obtained from oil palm fiber. Bioresour Technol. 2021 Apr;326:124753. doi:10.1016/j.biortech.2021.124753
17. Monisha RS, Mani RL, Sivaprakash B, Rajamohan N, Vo DVN. Green remediation of pharmaceutical wastes using biochar: a review. Environ Chem Lett. 2022 Feb 3;20(1):681–704. doi:10.1007/s10311-021-01348-y
18. Rusu L, Suceveanu EM, Blaga AC, Nedeff FM, Șuteu D. Insights into Recent Advances of Biomaterials Based on Microbial Biomass and Natural Polymers for Sustainable Removal of Pharmaceuticals Residues. Polymers (Basel). 2023 Jul 1;15(13):2923. doi:10.3390/polym15132923
19. Boudrahem F, Yahiaoui I, Saidi S, Yahiaoui K, Kaabache L, Zennache M, et al. Adsorption of pharmaceutical residues on adsorbents prepared from olive stones using mixture design of experiments model. Water Science and Technology. 2019 Sep 1;80(5):998–1009. doi:10.2166/wst.2019.346
20. de Souza TF, Dias Ferreira GM. Biochars as Adsorbents of Pesticides: Laboratory-Scale Performances and Real-World Contexts, Challenges, and Prospects. ACS ES&T Water. 2024 Oct 11;4(10):4264–82. doi:10.1021/acsestwater.4c00399
21. Page M, McKenzie J, Bossuyt P. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ. 2021;(372):71.

22. Kang Z, Jia X, Zhang Y, Kang X, Ge M, Liu D, et al. A Review on Application of Biochar in the Removal of Pharmaceutical Pollutants through Adsorption and Persulfate-Based AOPs. Sustainability. 2022 Aug 16;14(16):10128. doi:10.3390/su141610128
23. Kaur P, Kaur P, Kaur K. Adsorptive removal of imazethapyr and imazamox from aqueous solution using modified rice husk. J Clean Prod. 2020 Jan;244:118699. doi:10.1016/j.jclepro.2019.118699
24. Ouyang J, Zhou L, Liu Z, Heng JYY, Chen W. Biomass-derived activated carbons for the removal of pharmaceutical mircopollutants from wastewater: A review. Sep Purif Technol. 2020 Dec;253:117536. doi:10.1016/j.seppur.2020.117536
25. Alazaiza M, Albahnasawi A, Ali G, Bashir M, Nassani D, Al Maskari T, et al. Application of Natural Coagulants for Pharmaceutical Removal from Water and Wastewater: A Review. Water (Basel). 2022 Jan 6;14(2):140. doi:10.3390/w14020140
26. Akhtar M, Sarfraz M, Ahmad M, Raza N, Zhang L. Use of low-cost adsorbent for waste water treatment: Recent progress, new trend and future perspectives. Desalination Water Treat. 2025 Jan;321:100914. doi:10.1016/j.dwt.2024.100914