

Adsorption as a predominant technology for industrial wastewater treatment: a systematic review

Walter Manuel Hoyos Alayo¹; Silvia Lourdes Vidal Taboada²
^{1,2}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c23712@utp.edu.pe, svidal@utp.edu.pe

Abstract– *The treatment of industrial wastewater is a critical environmental problem due to the increase of chemical and biological pollutants generated by growing industrialisation, which has led to an urgent need for efficient solutions. This article aims to critically analyse adsorption as a predominant technology in the treatment of these effluents, evaluating its effectiveness, sustainability and feasibility compared to conventional methods. The research was carried out through a systematic review of the scientific literature, using the Scopus database, applying the PICOC methodology and the PRISMA method to select relevant studies published between 2017 and 2024. The main results indicate that adsorption is highly efficient in removing various pollutants, including heavy metals, dyes and organic compounds, with efficiencies of up to 100% in some cases, the most effective adsorbents being activated carbon, zeolites and biosorbents. The findings indicate that adsorption is a versatile and operationally simple technology, which makes it attractive for resource-constrained industries; however, it faces challenges such as the cost of adsorbents and the need for regeneration, which drives research towards the development of more efficient and sustainable materials.*

Keywords– *Adsorption; Bioadsorbent; Industrial wastewater; Pollutant removal; Sustainability in water treatment.*

La adsorción como tecnología predominante para el tratamiento de aguas residuales industriales: una revisión sistemática

Walter Manuel Hoyos Alayo¹; Silvia Lourdes Vidal Taboada²
^{1,2}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c23712@utp.edu.pe, svidal@utp.edu.pe

Resumen– El tratamiento de aguas residuales industriales es un problema ambiental crítico debido al aumento de contaminantes químicos y biológicos generados por la creciente industrialización, lo que ha derivado en la necesidad urgente de soluciones eficientes. El presente artículo tiene como objetivo analizar críticamente la adsorción como una tecnología predominante en el tratamiento de estos efluentes, evaluando su efectividad, sostenibilidad y viabilidad frente a los métodos convencionales. La investigación se llevó a cabo a través de una revisión sistemática de la literatura científica, utilizando la base de datos Scopus, aplicando la metodología PICOC y el método PRISMA para seleccionar estudios relevantes publicados entre 2017 y 2024. Los principales resultados indican que la adsorción es altamente eficiente para eliminar diversos contaminantes, incluidos metales pesados, colorantes y compuestos orgánicos, con eficiencias de hasta el 100% en algunos casos, siendo los adsorbentes más efectivos el carbón activado, las zeolitas y los biosorbentes. Las conclusiones señalan que la adsorción es una tecnología versátil y operativamente sencilla, lo que la hace atractiva para industrias con recursos limitados; sin embargo, enfrenta desafíos como el costo de los adsorbentes y la necesidad de regeneración, lo que impulsa la investigación hacia el desarrollo de materiales más eficientes y sostenibles.

Palabras clave– Adsorción; Bioadsorbente; Aguas residuales industriales; Remoción contaminantes; Sostenibilidad en el tratamiento de aguas.

I. INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales industriales representa uno de los mayores desafíos ambientales de la actualidad [1]; la creciente industrialización ha resultado en un aumento significativo de los efluentes industriales, que contienen una amplia gama de contaminantes químicos y biológicos [2]; por ello, la disposición inadecuada de estas aguas residuales puede causar serios problemas de salud pública y daños irreparables al medio ambiente [3]. En este contexto, la adsorción ha emergido como una tecnología predominante y efectiva para la remoción de contaminantes de las aguas residuales industriales [4]; este proceso, se basa en la capacidad de ciertos materiales para retener contaminantes en sus superficies [5], ofreciendo una solución prometedora debido a su alta eficiencia y adaptabilidad a diferentes tipos de contaminantes [6].

A pesar de los avances tecnológicos en el tratamiento de aguas residuales, muchos métodos tradicionales presentan limitaciones significativas en términos de costo, eficiencia y sostenibilidad [7]; por ello, los tratamientos convencionales, como la coagulación-floculación, la precipitación química y la filtración, a menudo no logran eliminar completamente ciertos contaminantes, como los metales pesados [8], los compuestos

orgánicos persistentes y los colorantes industriales [9]; estos residuos no solo representan un riesgo para la salud humana y el medio ambiente, sino que también pueden dificultar el cumplimiento de las normativas ambientales cada vez más estrictas [10]. La persistencia de estos contaminantes en los cuerpos de agua puede provocar efectos adversos a largo plazo [11], incluyendo la bioacumulación en la cadena alimentaria [12] y la degradación de los ecosistemas acuáticos [13].

Asimismo, los métodos tradicionales de tratamiento de aguas residuales industriales suelen requerir inversiones significativas en infraestructura y mantenimiento [14], lo que puede ser prohibitivo para muchas industrias, especialmente en regiones en desarrollo [15]; además, la ineficiencia de estos métodos en términos de remoción de contaminantes específicos y la generación de subproductos secundarios que también requieren tratamiento adicional son problemas críticos que necesitan ser abordados [16]; por lo tanto, es crucial identificar y optimizar tecnologías de tratamiento más eficaces, sostenibles y económicamente viables [17]. En ese sentido, la adsorción, con su capacidad para eliminar una amplia variedad de contaminantes, se presenta como una alternativa viable que puede superar las limitaciones de los métodos convencionales y otras tecnologías [18].

La adsorción es una tecnología versátil que puede ser aplicada a diferentes tipos de aguas residuales industriales, ofreciendo una solución adaptable a los desafíos específicos de cada industria [19]; a su vez, el desarrollo de nuevos materiales adsorbentes y la optimización de los existentes pueden mejorar significativamente la eficiencia del tratamiento [20]; en ese sentido, materiales como el carbón activado, las zeolitas y los materiales nanoestructurados han demostrado una alta capacidad de adsorción para diversos contaminantes, lo que subraya el potencial de esta tecnología para abordar problemas de contaminación complejos y variados [21]; [22]; [2].

Además, la adsorción es una tecnología relativamente simple que puede ser implementada con menores costos operativos en comparación con otras tecnologías avanzadas [10], como la oxidación avanzada y la membrana de filtración [23]; esta simplicidad operativa hace que la adsorción sea una opción atractiva para las industrias en regiones donde los recursos técnicos y financieros son limitados [24].

Este manuscrito describe, en primer lugar, la metodología utilizada para realizar la revisión sistemática, incluyendo las estrategias de búsqueda, los criterios de inclusión y exclusión, y el proceso de selección de artículos. Así también, se presenta una revisión de la literatura sobre la tecnología de adsorción y

su aplicación en el tratamiento de aguas residuales industriales; en esta sección incluye una descripción detallada de los principios de la adsorción, los tipos de adsorbentes utilizados y los factores que influyen en la eficiencia del proceso. Posteriormente, se presentan y discuten los resultados obtenidos, destacando los hallazgos más relevantes sobre la eficiencia de diferentes adsorbentes y las condiciones óptimas para su uso. Finalmente, se ofrecen conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones en este campo. En este contexto, se tiene por objetivo explorar y analizar críticamente la adsorción como tecnología predominante en el tratamiento de aguas residuales industriales, buscando proporcionar una visión exhaustiva de los avances más recientes en este campo, evaluando la eficiencia, sostenibilidad y viabilidad de diversas metodologías innovadoras. Asimismo, se pretende identificar las fortalezas y limitaciones, destacando su potencial para superar los desafíos actuales. Para alcanzar estos objetivos, se investigará la evolución de las publicaciones científicas a lo largo de los años, se identificarán los países con mayor cantidad de publicaciones y las áreas de investigación asociadas al tema; además, se analizarán las instituciones que contribuyen al desarrollo de estas tecnologías emergentes, así como la co-ocurrencia y evolución de palabras clave relevantes.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Estrategia de búsqueda y selección de artículos.

Se optó por un conjunto de palabras clave para cada elemento de la pregunta PICOC, aplicando el operador booleano (OR), ver Tabla I. Estos términos clave, estructurados en una fórmula de búsqueda, nos permitieron una exploración bibliográfica lógica en SCOPUS. Los estudios obtenidos como resultado de esta ecuación de búsqueda se revisaron y seleccionaron a partir de los siguientes criterios detallados en la Tabla II. Esto posibilitó la recuperación de 334 publicaciones científicas de Scopus (n = 334), los cuales fueron sometidos a un proceso de selección siguiendo los protocolos establecidos por PRISMA, ver Fig. 1, quedándose con 56 artículos. La representación gráfica y visualización de las redes bibliométricas de los datos obtenidos, se usó el software VOSviewer versión 1.6.20.

B. Ecuación final de búsqueda.

Realizadas las interacciones de búsqueda, se obtuvo la siguiente ecuación: (TITLE-ABS-KEY (contamination OR pollution OR "Water Contamination" OR "water pollution") AND TITLE-ABS-KEY ("adsorption of pollutants" OR "adsorption of contaminants" OR "pollutant adsorption" OR "contaminant adsorption" OR adsorption) AND TITLE-ABS-KEY ("Efficiency of adsorbent materials" OR "Efficiency of adsorbents" OR "Adsorbent materials efficiency" OR "adsorbent materials" OR adsorbents) AND TITLE-ABS-KEY ("Physicochemical pollutant parameters" OR "Physicochemical parameters pollutants" OR "Physicochemical polluting parameters" OR "Physicochemical parameters contaminants" OR "Pollutant parameters" OR "Contaminant parameters" OR "Polluting

parameters" OR "contaminating parameters" OR pollutants OR contaminants) AND TITLE-ABS-KEY ("Industrial wastewater" OR "Industrial waste water")) AND PUBYEAR > 2016 AND PUBYEAR < 2025 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (OA , "all")).

TABLA I
 PALABRAS CLAVE SELECCIONADAS Y SINTAXIS DE BÚSQUEDA

Componente	Descripción	Palabras Clave	Sintaxis de búsqueda
Problema	Contaminación del agua	Water Contamination water pollution.	Contamination OR Pollution OR "Water Contamination" OR "water pollution"
Intervención	Adsorción de contaminantes	Contaminant adsorption	"Contaminant adsorption" OR adsorption
Comparación	Eficiencia de los materiales adsorbentes	Adsorbent materials efficiency	"Adsorbent materials efficiency" OR "adsorbent materials" OR adsorbents
Resultado	Reducción de parámetros fisicoquímicos contaminantes.	Physicochemical polluting parameters.	"contaminating parameters" OR pollutants OR contaminants
Contexto	Aguas residuales Industriales.	Industrial wastewater.	"Industrial wastewater" OR "Industrial waste water"

TABLA II
 CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN PARA LA BÚSQUEDA

Criterios de Inclusión	Criterios de Exclusión
C.I.1. Los estudios deben abordar el tratamiento de aguas residuales industriales.	C.E.1. Artículos publicados anteriores a 2017 y posteriores al 2024.
C.I.2. Los estudios deben detallar las eficiencias de las tecnologías aplicadas.	C.E.2. Tipo de publicación no corresponde a artículo.
C.I.3. Los estudios deben reportar resultados para cada parámetro contaminante.	C.E.3. Estado o etapa de publicación distinta a final.
	C.E.4. Artículos que no permitan un acceso libre.

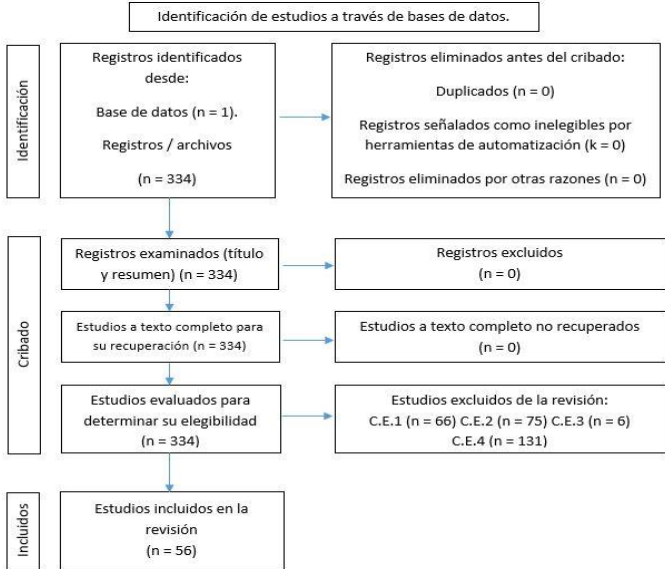


Fig. 1 Resultados de las etapas del proceso de selección bibliográfica.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. ¿Cuál es el papel fundamental de la adsorción como tecnología predominante para abordar los desafíos del tratamiento de aguas residuales?

La adsorción se ha consolidado como una tecnología clave en el tratamiento de aguas residuales industriales debido a su alta eficiencia en la eliminación de contaminantes [25]; este proceso implica la adhesión de moléculas de soluto en una fase líquida a la superficie de un material sólido adsorbente, formando una capa de moléculas en su superficie [26], por esta razón, esta técnica es particularmente eficaz para eliminar contaminantes orgánicos e inorgánicos [27], incluidos metales pesados [28], colorantes [29], fenoles [30] y compuestos orgánicos persistentes [31]; asimismo, la simplicidad operativa [32], la capacidad de tratar grandes volúmenes de agua [33] y la adaptabilidad a diferentes tipos de contaminantes hacen que la adsorción sea una opción predominante en el tratamiento de aguas residuales industriales [34].

B. ¿Cuáles son los factores que afectan la adsorción?

Varios factores influyen en la eficiencia del proceso de adsorción, incluyendo: (1) Naturaleza del adsorbente, la estructura porosa, el área superficial específica y la química de la superficie del adsorbente son determinantes críticos [35]; en ese sentido, materiales como el carbón activado, zeolitas y biosorbentes muestran diferentes capacidades de adsorción dependiendo de sus propiedades físicas como densidad de microporos [25] y área superficial de los sitios activos [36], y químicas como hidrofobicidad e hidrofiliidad de los grupos funcionales en la superficie [28], capacidad de intercambio iónico [37] y pH de punto de carga cero (pHpzc) [38]. (2) Características del adsorbato, la solubilidad, polaridad, tamaño molecular y concentración inicial del contaminante en el agua afectan significativamente la adsorción [39]; [31]. (3) pH del medio, influye en la ionización de los contaminantes y la carga de la superficie del adsorbente, afectando la interacción entre adsorbente y adsorbato [40]; [28]. (4) Temperatura, la adsorción generalmente es un proceso exotérmico [41]; por lo tanto, un aumento en la temperatura puede disminuir la capacidad de adsorción [42]. (5) Tiempo de contacto; un tiempo de contacto adecuado permite que el equilibrio de adsorción se alcance, mejorando la eficiencia del proceso [43]; [44]. (6) Presencia de otros contaminantes; la presencia de múltiples contaminantes puede generar competencia por los sitios de adsorción, afectando la capacidad total del adsorbente [45].

C. ¿Qué ventajas y desventajas muestran las tecnologías emergentes?

La adsorción se destaca como una de las tecnologías más eficientes para la remoción de parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales industriales, como se detalla en la Tabla III; esta tabla presenta un análisis comparativo de las eficiencias de diversos métodos de tratamiento, subrayando la

capacidad superior de la adsorción, especialmente mediante el uso de materiales como carbón activado, zeolitas y biosorbentes, los cuales pueden alcanzar eficiencias de remoción de hasta el 100% para ciertos contaminantes [46], [47], [48], [49]; en comparación, tecnologías tradicionales como la coagulación-floculación y la filtración muestran limitaciones significativas en la eliminación de metales pesados y compuestos orgánicos persistentes [50], [51], [52], [53], [54]; además, la versatilidad de la adsorción para adaptarse a diferentes matrices de aguas residuales industriales, junto con sus menores costos operativos, la convierte en una opción altamente atractiva para industrias con restricciones económicas [43], [55], [56]; sin embargo, persisten desafíos importantes, como la necesidad de regenerar los adsorbentes y los costos asociados a su adquisición, los cuales limitan el aprovechamiento pleno de esta tecnología [35], [43], [57], [58]; por lo tanto, aunque la adsorción se posiciona como una solución viable y sostenible en el tratamiento de aguas residuales, es fundamental implementar un enfoque equilibrado que contemple tanto sus fortalezas como sus limitaciones [59], [60], [61].

El tratamiento de aguas residuales industriales, por su parte, continúa siendo un desafío crítico debido a su complejidad fisicoquímica y microbiológica, lo que exige la búsqueda constante de soluciones sostenibles para preservar el medio ambiente y proteger la salud pública [62]; asimismo, a pesar de los avances tecnológicos, muchas estrategias enfrentan dificultades para lograr niveles óptimos de eficiencia y, al mismo tiempo, mantener costos operativos bajos [63], [64]; por ello, se requiere el desarrollo de alternativas más efectivas y rentables que permitan abordar la variabilidad intrínseca de este tipo de efluentes industriales [65], [66], garantizando así una gestión ambientalmente responsable y económicamente factible.

D. ¿Qué ventajas y desventajas tiene la aplicación de la adsorción?

La adsorción ofrece varias ventajas en el tratamiento de aguas residuales: (1) Alta eficiencia y selectividad; capacidad de remover una amplia gama de contaminantes con alta eficacia [45]; [29]. (2) Simplicidad operativa; no requiere infraestructura compleja ni procesos químicos intensivos [32]. (3) Flexibilidad para adaptarse a diferentes escalas de tratamiento y tipos de contaminantes [67]; [29].

Sin embargo, también presenta desventajas que deben considerarse: (1) Costo, el uso de adsorbentes comerciales como el carbón activado puede ser costoso, especialmente para grandes volúmenes de agua [43]; [39]. (2) Generación de residuos; la necesidad de disponer o regenerar adsorbentes saturados puede crear desafíos adicionales [42]; [68]. (3) Capacidad limitada, en algunos casos, la capacidad de adsorción puede ser insuficiente para contaminantes altamente concentrados o en presencia de múltiples contaminantes [33].

TABLA III
DESCRIPCIÓN DE LAS EFICIENCIAS DE REMOCIÓN PARA DISTINTAS SUSTANCIAS CONTAMINANTES

Autor	Tipo de Adsorbente	Contaminante	Eficiencia.
[25]	Carbono poroso derivado de citrato de potasio.	Colorante azoico Rojo Congo (CR)	652,3 mg/g
[40]	Hojas de <i>Sambucus nigra</i> L.	Cr(VI)	98,22%
[27]	Poliestireno con nanopartículas de hidróxido de cobalto.	Azul de metileno (MB)	75,2 mg/g
[69]	Harina de cáscara granada roja.	Fe(III)	112,3 mg/g
[28]	Lignito biotransformado.	Cr(VI)	413,22 mg/g
[6]	Mg(OH) ₂ con una estructura similar a una piña porosa y monodispersa.	Cu(II)	71,47 mg/g
[70]	Biosorbentes derivados de desechos agrícolas.	As(V)	100%
[29]	Resinas catiónicas de 4-amonio metilo y estireno.	Hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs)	92%
[45]	Microesferas de polisilsesquioxanos bifuncionales.	Naranja de metilo (MO)	100%
[32]	Material compuesto derivado de un líquido iónico y un marco orgánico metálico, [BMIM][PF6]/ZIF-8 (BP/Z).	Fluoresceína	100%
[67]	Carbón activado de cáscara de aguacate.	Hg(II)	100%
[71]	Marco orgánico metálico UiO-66 y nanocompuestos con materiales carbonosos como MWCNTs-COOH.	Ag(I)	100%
[14]	Loofah modificado con polianilina y esponja de loofah.	CR	1463 mg/g
[72]	Biochar basados en estiércol de vaca	DQO	100%
[73]	Heteroestructura compuesta por hidroxiapatita preparada a partir de los huesos de camello, recubierta con óxido de cerio y polímero natural quitosano.	Rojo de metilo	98%
[74]	Escoria de alto horno.	MO	98%
[33]	Salvado de trigo, un subproducto agrícola.	Rodamina B (RB)	81%
[75]	Carbón activado (AC) preparado a partir de tallos de dátiles.	RB	1241 mg/g
[76]	Residuos de té, cáscaras de plátano, almendras y huevos	Clorhidrato de tetraciclina	1105 mg/g
[35]	Combinación de nanotubos de carbono de pared múltiple y nanopartículas de plata nanoparticulada con quitosano.	Azul Brillante	11,22%
[77]	Biochar de cáscara de semilla de palma.	CR	96%
[43]	Carbón activado de desechos de polietileno tereftalato y poliestireno.	RB	58,89%
[41]	Nanotubos compuestos de polianilina dopada con ácido naftaleno sulfónico	<i>Escherichia coli</i>	95%
[44]	Ulva lactuca tratada químicamente con Hidróxido de sodio.	Co ²⁺	43,8 mg/g
[31]	Nano hierro cero valente	Pb ²⁺	30,2 mg/g
[78]	Celulosa injertada con poli(acrilato de metilo) (PMA) y celulosa injertada con poli(acrilonitrilo) (PAN).	CR	95%
[38]	Pulpa de café.	Pb(II)	85%
[39]	Carbón activado comercial (AC-40)	F ⁻¹	99%
[79]	Nano-adsorbente de alumina-sílica a partir de cenizas volantes.	Pb ²⁺	99%
[42]	Cáscaras de granada en forma de Carbón activado.	Cr(VI)	229,540 mg/g
[80]	Nanotubos de carbono de paredes múltiples modificados con 5,7-dinitro-8-quinolinol.	Ni(II)	174,784 mg/g
[81]	Material magnético reticulado basado en Fe ₃ O ₄ (magnetita).	PAHs	95,34%
[82]	Fibra de cáscara de arroz	DQO	98,21%
[68]	Cáscaras de maní	PAHs	90%
[30]	Carbono grafitico dopado con dióxido de titanio.	Pb(II)	90,9%
[34]	Arcilla.	MB	89%
[26]	Carbón activado granular (Norit 1240)	Selenometionina	96,1%
[37]	Cáscaras de nuez impregnadas con nano hierro de valencia cero.	Selenocisteína	86,7%
[83]	Nanotubos de carbono epoxidados.	Cobre	98%
[84]	Carbón activado.	Plomo	90%
[85]	Carbón activado sintetizado de <i>Prosopis cineraria</i> .	Mn(II)	53,40%
[86]	Xerogel de grafeno-quitosano.	Bisfenol A	94,34 mg/g
[36]	Hidrocarbón producido por carbonización hidrotermal de lodos fecales.	Plomo	326,2 mg/g
		MG	1655,2 mg/g
		MB	84,15%
		Ni ^{2+,3+}	81,44%
		Zn(II)	250 mg/g
		Pb(II)	200 mg/g
		CR	903 mg/g
		Zn(II)	94,33%
		Cr(VI)	89,2%
		Cr(VI)	22,94 mg/g
		Cr(VI)	24,25 mg/g
		Nitrofenoles	80%
		Metales pesados	100%
		1,4-dioxano	89%
		Zn(II)	94,46 mg/g
		Cd ²⁺ , Co ²⁺ , Cu ²⁺ , Hg ²⁺ , Ni ²⁺ , Pb ²⁺	>99,4%
		Cd, Cr, Cu, Pb	>78%
		DBO5	>65%
		Pb(II)	40,92 mg/g
		Cobre	93%

E. ¿Cuáles son las limitaciones y desafíos asociados a la adsorción?

A pesar de sus ventajas, la adsorción enfrenta varias limitaciones y desafíos:

(1) Regeneración del adsorbente, la regeneración de adsorbentes saturados puede ser costosa y técnicamente compleja, limitando su reutilización [34]; [83]. (2) Competencia de adsorbatos, la presencia de múltiples contaminantes puede reducir la eficiencia de adsorción [45] debido a la competencia por los sitios de adsorción [78]. (3) Escalabilidad, aunque efectiva a pequeña escala, la implementación de adsorción a gran escala industrial puede enfrentar desafíos técnicos y económicos [68]; [34]. (4) Desarrollo de nuevos adsorbentes, existe una necesidad continua de desarrollar adsorbentes más eficientes, económicos y sostenibles para mejorar la viabilidad del proceso [67]; [14]. Así mismo, la adsorción se destaca como una tecnología predominante para el tratamiento de aguas residuales industriales debido a su alta eficiencia y versatilidad [40]; [58]; sin embargo, para maximizar su aplicación, es crucial abordar las limitaciones y desafíos asociados [26], así como continuar innovando en el desarrollo de nuevos materiales adsorbentes [39].

F. Estudios Bibliométricos.

En la Fig. 2 se evidencia que la adsorción en el tratamiento de aguas residuales industriales ha generado un mayor interés académico, especialmente entre 2017 y 2024, periodo que concentra el 82.0% de las publicaciones analizadas; este crecimiento no solo refleja un avance significativo en la investigación científica, sino que también responde a la urgencia de mitigar la contaminación industrial de forma sostenible [25], [87]; asimismo, factores como el endurecimiento de las regulaciones ambientales y la búsqueda de tecnologías más económicas han potenciado la adopción de esta técnica como objeto de estudio, lo cual subraya la importancia de fortalecer tanto el financiamiento como la investigación en este campo para cerrar la brecha existente entre los fundamentos teóricos y sus aplicaciones prácticas [88], [89], [90].

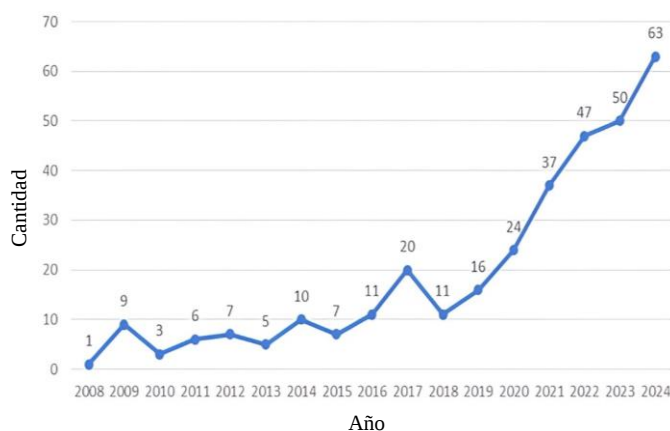


Fig. 2 Publicaciones por año.

En la Fig. 3 se evidencia un cambio significativo en las tendencias de palabras clave, destacándose "bioadsorción" como una de las más relevantes a partir del 2020; este fenómeno pone de manifiesto una creciente preferencia por el empleo de materiales sostenibles y basados en biomasa, lo cual responde a la búsqueda de alternativas al carbón activado y a otros materiales no renovables [91]; en ese contexto, la bioadsorción, surge como un enfoque prometedor, especialmente en regiones con limitaciones económicas y tecnológicas, y refleja un giro hacia tecnologías más ecológicas para el tratamiento de aguas residuales [92], [93]; asimismo, esta tendencia resalta la necesidad de explorar y emplear adsorbentes obtenidos a partir de microorganismos, bacterias, hongos, algas marinas, plantas o polímeros naturales, que han demostrado su efectividad en la eliminación de contaminantes, contribuyendo al desarrollo de soluciones innovadoras y sostenibles. [25], [94].

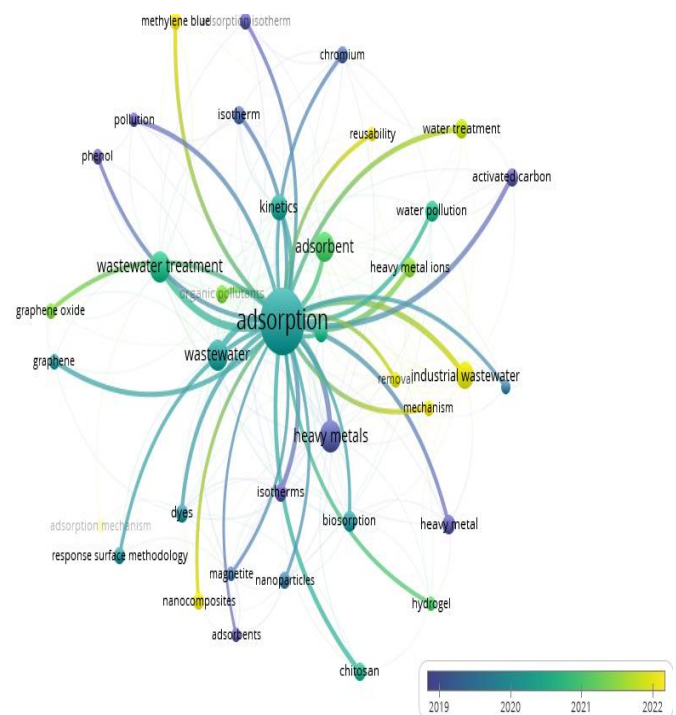


Fig. 3 Evolución de las palabras clave.

En la Fig. 4 resalta la relevancia de términos clave como "bioadsorción", "metales pesados" y "aguas residuales", los cuales están estrechamente interrelacionados en el contexto de los desafíos ambientales asociados al tratamiento de aguas residuales industriales; esta interconexión refleja un enfoque multidimensional en el uso de la adsorción, que se orienta hacia investigaciones integradoras dirigidas a desarrollar soluciones específicas para diversos contaminantes [95], [96]; en ese sentido, la predominancia de la bioadsorción como tecnología emergente demuestra su reconocimiento a nivel global y subraya la necesidad de diversificar tanto los materiales como las condiciones en las que puede aplicarse

[25]; asimismo, estas palabras clave presentan una alta co-ocurrencia con otros conceptos relacionados, evidenciando el papel central de la bioadsorción como base para el diseño de variantes técnicas destinadas a resolver múltiples problemáticas asociadas a diferentes tipos de contaminantes [97].

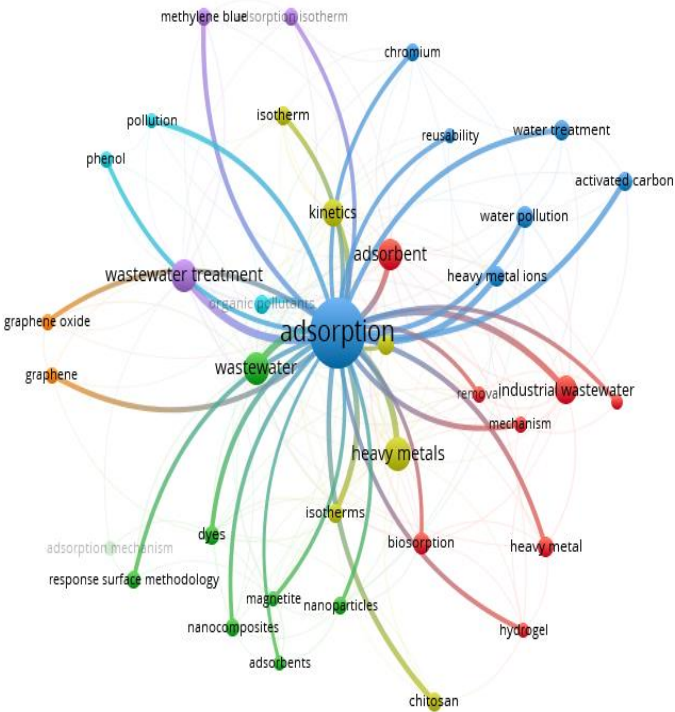


Fig. 4 Co-ocurrencia de palabras clave.

La Fig. 5 pone de manifiesto una distribución geográfica desigual en las publicaciones científicas sobre tecnologías de adsorción, destacándose Asia como la región con mayor aporte, liderada por China, India y Arabia Saudí, con un 57.4% del total; esta predominancia regional refleja no solo el enfoque en soluciones rentables y eficaces por parte de economías emergentes, sino también una fuerte inversión en infraestructura de investigación [70]; a su vez, en Europa, el liderazgo de Reino Unido resalta un enfoque colaborativo y avanzado en ingeniería química y ciencias ambientales, que contrasta con los esfuerzos orientados al costo-beneficio observados en Asia; por otro lado, África presenta a Egipto como su principal referente en este ámbito, lo cual señala una creciente participación del continente en el desarrollo de tecnologías sostenibles; finalmente, en cuanto a América Latina, Colombia encabeza la producción científica, aunque su participación sigue siendo limitada frente a otras regiones, subrayando la necesidad de fortalecer la competitividad global mediante una mayor inversión en investigación y colaboración internacional [98].

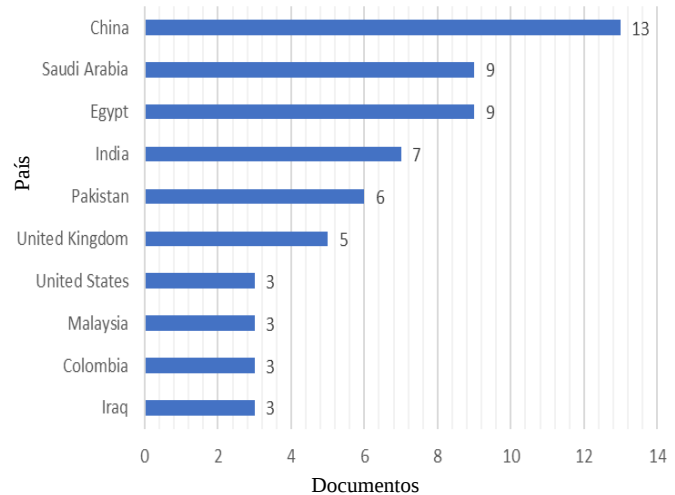


Fig. 5 Publicaciones por país.

La Figura 6 destaca que las ciencias ambientales (24.8%), la ingeniería química (12.0%) y la química (12.0%) son las áreas con mayor protagonismo en la investigación sobre tecnologías de adsorción, lo que pone de manifiesto su carácter interdisciplinario; esta interacción entre disciplinas no solo mejora la comprensión de los procesos involucrados, sino que también optimiza la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales al integrar conocimientos complementarios [40]; además, la presencia de áreas como biología, ciencia de materiales y energía sugiere un potencial significativo para futuras aplicaciones, especialmente mediante la combinación de procesos adsorbentes con estrategias energéticamente sostenibles, como sistemas bioquímicos y el aprovechamiento de energías renovables [69]; por lo tanto, esta diversificación de enfoques consolida a las tecnologías de adsorción como una herramienta prometedora frente a los retos ambientales actuales [38].

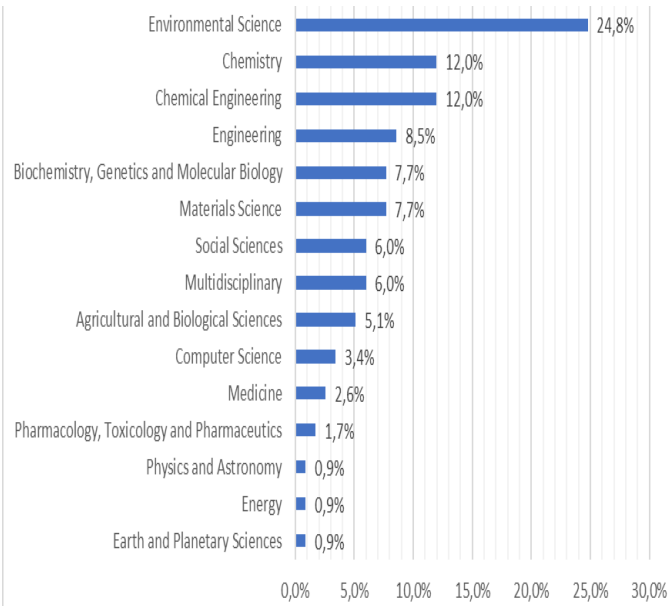


Fig. 6 Áreas de investigación.

IV. CONCLUSIONES

La adsorción se ha consolidado como una tecnología predominante para el tratamiento de aguas residuales industriales debido a su alta eficiencia en la eliminación de diversos contaminantes, incluyendo metales pesados, colorantes y compuestos orgánicos; además, su versatilidad y simplicidad operativa la hacen una opción viable en una amplia variedad de aplicaciones industriales.

La eficiencia del proceso de adsorción está influenciada por múltiples factores como la naturaleza del adsorbente, las características del contaminante (adsorbato), el pH del medio, la temperatura y el tiempo de contacto; por ende, es importante comprender y optimizar estos factores es clave para mejorar la capacidad de remoción de contaminantes en escenarios industriales.

Existen diversos tipos de adsorbentes que se utilizan en el tratamiento de aguas residuales industriales, entre ellos el carbón activado, las zeolitas, biosorbentes y materiales nanoestructurados; cada uno presenta ventajas particulares en términos de eficiencia y selectividad, lo que sugiere que la selección del adsorbente debe adaptarse al tipo de contaminante y las condiciones del agua residual.

Los estudios revisados demuestran que la adsorción es altamente eficaz en la remoción de una amplia gama de contaminantes fisicoquímicos, alcanzando eficiencias de hasta el 100% en algunos casos; esta capacidad de remoción depende tanto del tipo de adsorbente como de las condiciones óptimas de operación, tales como pH y tiempo de contacto.

La adsorción presenta varias ventajas, como su alta eficiencia y simplicidad operativa, que la hacen accesible incluso para industrias en regiones con limitados recursos técnicos y financieros; sin embargo, sus desventajas incluyen el costo elevado de algunos adsorbentes comerciales y la necesidad de disponer adecuadamente los adsorbentes saturados, lo cual genera residuos adicionales.

Aunque la adsorción es una tecnología efectiva, enfrenta desafíos importantes, como la regeneración de los adsorbentes saturados, la competencia entre contaminantes por los sitios de adsorción, y la necesidad de desarrollar adsorbentes más eficientes y económicos; asimismo, las investigaciones futuras deben enfocarse en superar estas barreras para aumentar la viabilidad de la adsorción a mayor escala.

Los análisis bibliométricos revelan un crecimiento significativo en las investigaciones sobre la adsorción a partir de 2017, con una fuerte concentración de estudios en Asia, especialmente en China, Arabia Saudí e India; asimismo, las ciencias ambientales y la ingeniería química lideran las publicaciones desempeñando roles clave en el avance de esta tecnología; esto demuestra una tendencia global hacia la investigación y desarrollo de tecnologías de adsorción, impulsadas por la necesidad de soluciones más sostenibles para el tratamiento de aguas industriales.

REFERENCIAS

- [1] M. Ahmaruzzaman *et al.*, «Polymeric hydrogels-based materials for wastewater treatment», *Chemosphere*, vol. 331, 2023, doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.138743.
- [2] T. A. Saleh, «Materials, nanomaterials, nanocomposites, and methods used for the treatment and removal of hazardous pollutants from wastewater: Treatment technologies for water recycling and sustainability», *Nano-Struct. Nano-Objects*, vol. 39, 2024, doi: 10.1016/j.nanoso.2024.101231.
- [3] Y. Wang *et al.*, «CoS₂/GO nanocomposites for highly efficient and ppb level adsorption of Hg(II) from wastewater», *J. Mol. Liq.*, vol. 322, 2021, doi: 10.1016/j.molliq.2020.114899.
- [4] A. Moges, T. T. I. Nkambule, y J. Fito, «The application of GO-Fe₃O₄ nanocomposite for chromium adsorption from tannery industry wastewater», *J. Environ. Manage.*, vol. 305, 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.114369.
- [5] F. Persano, C. Malitesta, y E. Mazzotta, «Cellulose-Based Hydrogels for Wastewater Treatment: A Focus on Metal Ions Removal», *Polymers*, vol. 16, n.º 9, 2024, doi: 10.3390/polym16091292.
- [6] Q. Lin, W. Chen, F. Lin, H. Zhu, y X. Wang, «Exaggerated arsenic removal efficiency and pH adaptability by adsorption using monodispersed porous pinecone-like magnesium hydroxide», *Aqua Water Infrastruct. Ecosyst. Soc.*, vol. 72, n.º 6, pp. 969-982, 2023, doi: 10.2166/aqua.2023.012.
- [7] X. Yan, X. Liu, M. Zhang, X. Cui, J. Zhong, y X. Hu, «Research Progress in Biosorption Technology for Chromium Contamination», *Xiyou Jinshu/Chinese J. Rare Met.*, vol. 45, n.º 2, pp. 240-250, 2021, doi: 10.13373/j.cnki.cjrm.XY19060028.
- [8] A. E. Gahrouei, A. Rezapour, M. Pirooz, y S. Pourebrahimi, «From classic to cutting-edge solutions: A comprehensive review of materials and methods for heavy metal removal from water environments», *Desalination Water Treat.*, vol. 319, 2024, doi: 10.1016/j.dwt.2024.100446.
- [9] M. H. Ashraf, N. Hussain, M. A. Muneer, I. Arif, y M. R. Ali, «Chitosan-based nanomaterials for pharmaceutical waste remediation», *Adv. Chem. Pollut. Environ. Manag. Prot.*, vol. 10, pp. 83-116, 2024, doi: 10.1016/bs.apmp.2023.09.001.
- [10] D. M. Solanki *et al.*, «A Review on Adsorption of Dyes in Batch and Column Mode: Effects of Operating Parameters», presentado en AIP Conference Proceedings, 2023. doi: 10.1063/5.0183031.
- [11] S. O. Elshabrawy *et al.*, «Valorization of Agricultural and Marine Waste for Fabrication of Bio-Adsorbent Sheets», presentado en World Environmental and Water Resources Congress 2023: Adaptive Planning and Design in an Age of Risk and Uncertainty - Selected Papers from World Environmental and Water Resources Congress 2023, 2023, pp. 99-113. doi: 10.1061/9780784484852.010.
- [12] R. Gupta *et al.*, «Potential and future prospects of biochar-based materials and their applications in removal of organic contaminants from industrial wastewater», *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 24, n.º 3, pp. 852-876, 2022, doi: 10.1007/s10163-022-01391-z.
- [13] H. A. Dakhly, S. A. H. Albohy, A. A. Salman, y A. S. Abo Dena, «Facile synthesis of a magnetic molecularly-imprinted polymer adsorbent for solid-phase extraction of diclofenac from water», *RSC Adv.*, vol. 14, n.º 23, pp. 15942-15952, 2024, doi: 10.1039/d4ra02529f.
- [14] M. G. Galloni, V. Bortolotto, E. Falletta, y C. L. Bianchi, «pH-Driven Selective Adsorption of Multi-Dyes Solutions by Loofah Sponge and Polyaniline-Modified Loofah Sponge», *Polymers*, vol. 14, n.º 22, 2022, doi: 10.3390/polym14224897.
- [15] L. C. Paredes-Quevedo, N. J. Castellanos, y J. G. Carriazo, «Influence of Porosity and Surface Area of a Modified Kaolinite on the Adsorption of Basic Red 46 (BR-46)», *Water. Air. Soil Pollut.*, vol. 232, n.º 12, 2021, doi: 10.1007/s11270-021-05450-3.
- [16] A. Roy, «Progress, Challenges, and Prospects of Jute Fiber as Green Adsorbents: A Scope Beyond Traditional Applications», en *Jute: Cultivation, Properties and Uses*, 2022, pp. 95-110.
- [17] A. Lv, X. Lv, X. Xu, Y. Chen, J. Zhang, y Z.-B. Shao, «Tailored multifunctional composite hydrogel based on chitosan and quaternary ammonium ionic liquids@montmorillonite with different chain lengths

- for effective removal of dyes and 4-nitrophenol», *Sep. Purif. Technol.*, vol. 342, 2024, doi: 10.1016/j.seppur.2024.127019.
- [18] K. Saini *et al.*, «Metal-Organic Frameworks: A promising solution for efficient removal of heavy metal ions and organic pollutants from industrial wastewater», *J. Mol. Liq.*, vol. 399, 2024, doi: 10.1016/j.molliq.2024.124365.
- [19] D. C. C. D. S. Medeiros *et al.*, «Pristine and engineered biochar for the removal of contaminants co-existing in several types of industrial wastewaters: A critical review», *Sci. Total Environ.*, vol. 809, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151120.
- [20] M. I. S. Haider *et al.*, «Synergistic interactions and reaction mechanisms of biochar surface functionalities in antibiotics removal from industrial wastewater», *Environ. Pollut.*, vol. 356, 2024, doi: 10.1016/j.envpol.2024.124365.
- [21] Y. H. Teow, N. I. Nordin, y A. W. Mohammad, «Green synthesis of palm oil mill effluent-based graphenic adsorbent for the treatment of dye-contaminated wastewater», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 26, n.º 33, pp. 33747-33757, 2019, doi: 10.1007/s11356-018-2189-6.
- [22] A. A. Melaibari, A. S. Elamoudi, M. E. Mostafa, y N. H. Abu-Hamdeh, «Waste-to-Energy in Saudi Arabia: Treatment of petroleum wastewaters utilizing zeolite structures in the removal of phenol pollutants by using the power of molecular dynamics method», *Eng. Anal. Bound. Elem.*, vol. 148, pp. 317-323, 2023, doi: 10.1016/jenganabound.2023.01.003.
- [23] M. K. Nguyen *et al.*, «Microplastics in sewage sludge: Distribution, toxicity, identification methods, and engineered technologies», *Chemosphere*, vol. 308, 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.136455.
- [24] H. Singh, S. Raj, R. K. S. Rathour, y J. Bhattacharya, «Bimetallic Fe/Al-MOF for the adsorptive removal of multiple dyes: optimization and modeling of batch and hybrid adsorbent-river sand column study and its application in textile industry wastewater», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, n.º 37, pp. 56249-56264, 2022, doi: 10.1007/s11356-022-19686-x.
- [25] S. Wang *et al.*, «Potassium citrate-derived porous carbon with high CO₂ capture and Congo red adsorption performance», *Environ. Sci. Eur.*, vol. 35, n.º 1, 2023, doi: 10.1186/s12302-023-00712-9.
- [26] M. A. Myers *et al.*, «Abiotic and bioaugmented granular activated carbon for the treatment of 1,4-dioxane-contaminated water», *Environ. Pollut.*, vol. 240, pp. 916-924, 2018, doi: 10.1016/j.envpol.2018.04.011.
- [27] M. Adel *et al.*, «Decoration of polystyrene with nanoparticles of cobalt hydroxide as new composites for the removal of Fe(III) and methylene blue from industrial wastewater», *RSC Adv.*, vol. 13, n.º 36, pp. 25334-25349, 2023, doi: 10.1039/d3ra03794k.
- [28] J. Cheng *et al.*, «Removal of Heavy Metal Ions from Aqueous Solution Using Biotransformed Lignite», *Molecules*, vol. 28, n.º 13, 2023, doi: 10.3390/molecules28135031.
- [29] S. Alfei, F. Grasso, V. Orlandi, E. Russo, R. Boggia, y G. Zuccari, «Cationic Polystyrene-Based Hydrogels as Efficient Adsorbents to Remove Methyl Orange and Fluorescein Dye Pollutants from Industrial Wastewater», *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 24, n.º 3, 2023, doi: 10.3390/ijms24032948.
- [30] A. B. RanguMagar *et al.*, «Removal of nitrophenols from water using cellulose derived nitrogen doped graphitic carbon material containing titanium dioxide», *Part. Sci. Technol.*, vol. 37, n.º 4, pp. 440-448, 2019, doi: 10.1080/02726351.2017.1391906.
- [31] S. O. Okonji, L. Yu, J. A. Dominic, D. Pernitsky, y G. Achari, «Adsorption by granular activated carbon and nano zerovalent iron from wastewater: A study on removal of selenomethionine and selenocysteine», *Water Switz.*, vol. 13, n.º 1, 2021, doi: 10.3390/w13010023.
- [32] H. Li *et al.*, «An easily-synthesized low carbon ionic liquid functionalized metal-organic framework composite material to remove Congo red from water», *Water Cycle*, vol. 4, pp. 127-134, 2023, doi: 10.1016/j.watcyc.2023.05.004.
- [33] W. J. Chung, J. Shim, y B. Ravindran, «Application of wheat bran based biomaterials and nano-catalyst in textile wastewater», *J. King Saud Univ. - Sci.*, vol. 34, n.º 2, 2022, doi: 10.1016/j.jksus.2021.101775.
- [34] H. Han, M. K. Rafiq, T. Zhou, R. Xu, O. Mašek, y X. Li, «A critical review of clay-based composites with enhanced adsorption performance for metal and organic pollutants», *J. Hazard. Mater.*, vol. 369, pp. 780-796, 2019, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.02.003.
- [35] T. C. Egbosiuba *et al.*, «Adsorption of Cr(VI), Ni(II), Fe(II) and Cd(II) ions by KIAgNPs decorated MWCNTs in a batch and fixed bed process», *Sci. Rep.*, vol. 11, n.º 1, 2021, doi: 10.1038/s41598-020-79857-z.
- [36] T. Koottatep, K. Fakkaew, N. Tajai, y C. Polprasert, «Isotherm models and kinetics of copper adsorption by using hydrochar produced from hydrothermal carbonization of faecal sludge», *J. Water Sanit. Hyg. Dev.*, vol. 7, n.º 1, pp. 102-110, 2017, doi: 10.2166/washdev.2017.132.
- [37] P. S. Kumar, A. S. Nair, A. Ramaswamy, y A. Saravanan, «Nano-zero valent iron impregnated cashew nut shell: a solution to heavy metal contaminated water/wastewater», *IET Nanobiotechnol.*, vol. 12, n.º 5, pp. 591-599, 2018, doi: 10.1049/IET-NBT.2017.0264.
- [38] D. L. G. Aguilar, J. P. R. Miranda, D. B. Guzmán, y J. A. E. Muñoz, «Using coffee pulp as bioadsorbent for the removal of manganese (Mn (II)) from synthetic wastewater», *Water Switz.*, vol. 12, n.º 9, 2020, doi: 10.3390/w12092500.
- [39] M. A. Martín-Lara, M. Calero, A. Ronda, I. Iáñez-Rodríguez, y C. Escudero, «Adsorptive behavior of an activated carbon for bisphenol A removal in single and binary (bisphenol A-heavy metal) solutions», *Water Switz.*, vol. 12, n.º 8, 2020, doi: 10.3390/W12082150.
- [40] H. B. Mancilla *et al.*, «Effective removal of Cr (VI) ions using low-cost biomass leaves (*Sambucus nigra* L.) in aqueous solution», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, n.º 49, pp. 106982-106995, 2023, doi: 10.1007/s11356-022-24064-8.
- [41] M. Bhaumik, A. Maity, y H. G. Brink, «Zero valent nickel nanoparticles decorated polyaniline nanotubes for the efficient removal of Pb(II) from aqueous solution: Synthesis, characterization and mechanism investigation», *Chem. Eng. J.*, vol. 417, 2021, doi: 10.1016/j.ccej.2020.127910.
- [42] A. E. Elsayed *et al.*, «A study on the removal characteristics of organic and inorganic pollutants from wastewater by low cost biosorbents», *Egypt. J. Chem.*, vol. 63, n.º 4, pp. 1429-1442, 2020, doi: 10.21608/ejchem.2019.15710.1950.
- [43] M. Ilyas, W. Ahmad, y H. Khan, «Utilization of activated carbon derived from waste plastic for decontamination of polycyclic aromatic hydrocarbons laden wastewater», *Water Sci. Technol.*, vol. 84, n.º 3, pp. 609-631, 2021, doi: 10.2166/wst.2021.252.
- [44] N. H. M'sakni y T. Alsufyani, «Removal of cationic organic dye from aqueous solution by chemical and pyrolysis activated ulva lactuca», *Water Switz.*, vol. 13, n.º 9, 2021, doi: 10.3390/w13091154.
- [45] B. Wang *et al.*, «Feasible synthesis of bifunctional polysilsesquioxane microspheres for robust adsorption of Hg(II) and Ag(I): Behavior and mechanism», *J. Hazard. Mater.*, vol. 442, 2023, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.130121.
- [46] J. Emiliani, W. G. L. Oyarce, C. D. Bergara, L. M. Salvatierra, L. A. B. Novo, y L. M. Pérez, «Variations in the phytoremediation efficiency of metal-polluted water with *salvinia biloba*: Prospects and toxicological impacts», *Water Switz.*, vol. 12, n.º 6, 2020, doi: 10.3390/W12061737.
- [47] M. Umar, C. Singdahl-Larsen, y S. B. Rannekleiv, «Microplastics Removal from a Plastic Recycling Industrial Wastewater Using Sand Filtration», *Water Switz.*, vol. 15, n.º 5, 2023, doi: 10.3390/w15050896.
- [48] A. García-Valero *et al.*, «Treatment of wastewater from the tannery industry in a constructed wetland planted with *phragmites australis*», *Agronomy*, vol. 10, n.º 2, 2020, doi: 10.3390/agronomy10020176.
- [49] Q. Li *et al.*, «Construction of hybrid constructed wetlands for phosphorus chemical industry tailwater treatment in the middle Yangtze river basin: Responses of plant growth and root-associated microbial communities», *Water Biol. Secur.*, vol. 2, n.º 3, 2023, doi: 10.1016/j.watbs.2023.100144.
- [50] M. Kamali, K. M. Persson, M. E. Costa, y I. Capela, «Sustainability criteria for assessing nanotechnology applicability in industrial wastewater treatment: Current status and future outlook», *Environ. Int.*, vol. 125, pp. 261-276, 2019, doi: 10.1016/j.envint.2019.01.055.
- [51] S. A. Razzak *et al.*, «A comprehensive review on conventional and biological-driven heavy metals removal from industrial wastewater», *Environ. Adv.*, vol. 7, 2022, doi: 10.1016/j.envadv.2022.100168.
- [52] A. S. Smolyanichenko y E. V. Yakovleva, «OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF INDUSTRIAL WASTEWATER TREATMENT BY DISAGGREGATION OF PHASE-DISPERSED CONTAMINANTS», *Sib. J. Life Sci. Agric.*, vol. 14, n.º 6, pp. 34-50, 2022, doi: 10.12731/2658-6649-2022-14-6-34-50.

- [53] A. Alkhubiri, M. Hakami, M.-P. Zacharof, H. A. Homod, y A. Alsadun, «Mercury, arsenic and lead removal by air gap membrane distillation: Experimental study», *Water Switz.*, vol. 12, n.º 6, 2020, doi: 10.3390/W12061574.
- [54] N. Nippatlapalli y L. Philip, «Assessment of novel rotating bipolar multiple disc electrode electrocoagulation-flotation and pulsed plasma corona discharge for the treatment of textile dyes», *Water Sci. Technol.*, vol. 81, n.º 3, pp. 564-570, 2020, doi: 10.2166/WST.2020.137.
- [55] A. Yfantis *et al.*, «Industrial Pilot for Assessment of Polymeric and Ceramic Membrane Efficiency in Treatment of Liquid Digestate from Biogas Power Plant», *Energies*, vol. 15, n.º 18, 2022, doi: 10.3390/en15186574.
- [56] C. V. Montoya-Bautista, P. Acevedo-Peña, R. Zanella, y R.-M. Ramírez-Zamora, «Characterization and Evaluation of Copper Slag as a Bifunctional Photocatalyst for Alcohols Degradation and Hydrogen Production», *Top. Catal.*, vol. 64, n.º 1-2, pp. 131-141, 2021, doi: 10.1007/s11244-020-01362-4.
- [57] O. T. Opafola, A. O. David, F. O. Ajibade, H. O. Adeyemi, O. I. Solana, y B. D. Odugbose, «The utilization of bentonite enhanced termite mound soil mixture as filter for the treatment of paint industrial effluent», *SN Appl. Sci.*, vol. 3, n.º 4, 2021, doi: 10.1007/s42452-021-04405-x.
- [58] S. M. Abdelbasir y M. A. A. Khalek, «From waste to waste: iron blast furnace slag for heavy metal ions removal from aqueous system», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, n.º 38, pp. 57964-57979, 2022, doi: 10.1007/s11356-022-19834-3.
- [59] Y. Zeng, L. Ma, y P. Bai, «Study of Organic Acid Pollutant Removal Efficient in Treatment of Industrial Wastewater with HDH Process Using ASPEN Modelling», *Water Switz.*, vol. 14, n.º 22, 2022, doi: 10.3390/w14223681.
- [60] J. C. Czarnecki, B. Manoli, N. Fuad, y T. M. Vadas, «Disinfection byproduct formation from chlorination of agricultural reuse water sources», *Environ. Adv.*, vol. 15, 2024, doi: 10.1016/j.envadv.2024.100488.
- [61] V. Hernández-Chover, Á. Bellver-Domingo, L. Castellet-Viciano, y F. Hernández-Sancho, «AI Applied to the Circular Economy: An Approach in the Wastewater Sector», *Sustain. Switz.*, vol. 16, n.º 4, 2024, doi: 10.3390/su16041365.
- [62] M. Wilschnack, B. Homer, E. Cartmell, K. Yates, y B. Petrie, «Targeted multi-analyte UHPLC-MS/MS methodology for emerging contaminants in septic tank wastewater, sludge and receiving surface water», *Anal. Methods*, vol. 16, n.º 5, pp. 709-720, 2024, doi: 10.1039/d3ay01201h.
- [63] K. Witt, M. A. Kaczorowska, y D. Bożewicz, «Efficient, fast, simple, and eco-friendly methods for separation of toxic chromium(VI) ions based on ion exchangers and polymer materials impregnated with Cyphos IL 101, Cyphos IL 104, or D2EHPA», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 31, n.º 5, pp. 7977-7993, 2024, doi: 10.1007/s11356-023-31648-5.
- [64] S. Singla, P. Devi, y S. Basu, «Revolutionizing the Role of Solar Light Responsive BiVO₄/BiOBr Heterojunction Photocatalyst for the Photocatalytic Deterioration of Tetracycline and Photoelectrocatalytic Water Splitting», *Materials*, vol. 16, n.º 16, 2023, doi: 10.3390/ma16165661.
- [65] X. Yu, A. Cabrera-Reina, M. Graells, S. Miralles-Cuevas, y M. Pérez-Moya, «Towards an efficient generalization of the online dosage of hydrogen peroxide in photo-fenton process to treat industrial wastewater», *Int. J. Environ. Res. Public. Health*, vol. 18, n.º 24, 2021, doi: 10.3390/ijerph182413313.
- [66] S. A. Khilji *et al.*, «Application of Algal Nanotechnology for Leather Wastewater Treatment and Heavy Metal Removal Efficiency», *Sustain. Switz.*, vol. 14, n.º 21, 2022, doi: 10.3390/su142113940.
- [67] M. A. Irshad *et al.*, «Green and Eco-Friendly Treatment of Textile Wastewater by Using Azadirachta indica Leaf Extract Combined with a Silver Nitrate Solution», *Sustain. Switz.*, vol. 15, n.º 1, 2023, doi: 10.3390/su15010081.
- [68] A. Das, M. Banerjee, N. Bar, y S. K. Das, «Adsorptive removal of Cr(VI) from aqueous solution: kinetic, isotherm, thermodynamics, toxicity, scale-up design, and GA modeling», *SN Appl. Sci.*, vol. 1, n.º 7, 2019, doi: 10.1007/s42452-019-0813-9.
- [69] L. Abed y N. Belattar, «Assessing the Dual Use of Red and Yellow Algerian Pomegranate Husks: Natural Antiradical Agents and Low-Cost Biosorbents for Chromium (VI) Removal from Contaminated Waters», *Water Switz.*, vol. 15, n.º 16, 2023, doi: 10.3390/w15162869.
- [70] Z. T. Chong, L. S. Soh, y W. F. Yong, «Valorization of agriculture wastes as biosorbents for adsorption of emerging pollutants: Modification, remediation and industry application», *Results Eng.*, vol. 17, 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.100960.
- [71] M. Athari, M. Fattahi, M. Khosravi-Nikou, y A. Hajhariri, «Adsorption of different anionic and cationic dyes by hybrid nanocomposites of carbon nanotube and graphene materials over UiO-66», *Sci. Rep.*, vol. 12, n.º 1, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-24891-2.
- [72] X. Chen, G. Yu, Y. Chen, S. Tang, y Y. Su, «Cow Dung-Based Biochar Materials Prepared via Mixed Base and Its Application in the Removal of Organic Pollutants», *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 23, n.º 17, 2022, doi: 10.3390/ijms231710094.
- [73] A. A. Alshahrani, A. Q. Alorabi, M. S. Hassan, T. Amna, y M. Azizi, «Chitosan-Functionalized Hydroxyapatite-Cerium Oxide Heterostructure: An Efficient Adsorbent for Dyes Removal and Antimicrobial Agent», *Nanomaterials*, vol. 12, n.º 15, 2022, doi: 10.3390/nano12152713.
- [74] S. M. Abdelbasir y M. A. A. Khalek, «From waste to waste: iron blast furnace slag for heavy metal ions removal from aqueous system», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, n.º 38, pp. 57964-57979, 2022, doi: 10.1007/s11356-022-19834-3.
- [75] S. Bakhta *et al.*, «Functional activated carbon: from synthesis to groundwater fluoride removal», *RSC Adv.*, vol. 12, n.º 4, pp. 2332-2348, 2022, doi: 10.1039/d1ra08209d.
- [76] H. Çelebi, T. Bahadır, İ. Şimşek, y Ş. Tulun, «An Environmental and Green Process for Pb²⁺ Pollution: An Experimental Research from the Perspective of Adsorption $\uparrow$ », *Eng. Proc.*, vol. 19, n.º 1, 2022, doi: 10.3390/ECP2022-12658.
- [77] A. Alhothali *et al.*, «Optimization of micro-pollutants' removal from wastewater using agricultural waste-derived sustainable adsorbent», *Int. J. Environ. Res. Public. Health*, vol. 18, n.º 21, 2021, doi: 10.3390/ijerph182111506.
- [78] M. L. Rahman, C. J. Fui, T. X. Ting, M. S. Sarjadi, S. E. Arshad, y B. Musta, «Polymer ligands derived from jute fiber for heavy metal removal from electroplating wastewater», *Polymers*, vol. 12, n.º 11, pp. 1-27, 2020, doi: 10.3390/polym12112521.
- [79] A. Chatterjee, S. Shamim, A. K. Jana, y J. K. Basu, «Insights into the competitive adsorption of pollutants on a mesoporous alumina-silica nano-sorbent synthesized from coal fly ash and a waste aluminium foil», *RSC Adv.*, vol. 10, n.º 26, pp. 15514-15522, 2020, doi: 10.1039/d0ra01397h.
- [80] E. T. Abdel Salam, K. M. Abou El-Nour, A. A. Awad, y A. S. Orabi, «Carbon nanotubes modified with 5,7-dinitro-8-quinolinol as potentially applicable tool for efficient removal of industrial wastewater pollutants», *Arab. J. Chem.*, vol. 13, n.º 1, pp. 109-119, 2020, doi: 10.1016/j.arabjc.2017.02.005.
- [81] A. M. Atta *et al.*, «Synthesis of new magnetic crosslinked poly (Ionic liquid) nanocomposites for fast congo red removal from industrial wastewater», *Nanomaterials*, vol. 9, n.º 9, 2019, doi: 10.3390/nano9091286.
- [82] M. E. H. El Nadi y M. A. F. Abd Alla, «Removing heavy metals from wastewater by using rice husk wastes fiber», *Int. J. Eng. Adv. Technol.*, vol. 8, n.º 6, pp. 3929-3933, 2019, doi: 10.35940/ijeat.F9055.088619.
- [83] P. N. Alagappan, J. Heimann, L. Morrow, E. Andreoli, y A. R. Barron, «Easily Regenerated Readily Deployable Absorbent for Heavy Metal Removal from Contaminated Water», *Sci. Rep.*, vol. 7, n.º 1, 2017, doi: 10.1038/s41598-017-06734-7.
- [84] M. Sajjad *et al.*, «Removal of potentially toxic elements from aqueous solutions and industrial wastewater using activated carbon», *Water Sci. Technol.*, vol. 75, n.º 11, pp. 2571-2579, 2017, doi: 10.2166/wst.2017.130.
- [85] A. Kateja y B. Mordhiya, «Preparation and Characterization of Cost Effective Adsorbent: Treatment of Wastewater from Dyeing Industry in Sanganer, Jaipur (India)», *J. Environ. Sci. Eng.*, vol. 59, n.º 2, pp. 341-348, 2017, doi: 10.47915/jese.2017.v59i02.004.
- [86] S. Satapathi, «Graphene-based 3D xerogel as adsorbent for removal of heavy metal ions from industrial wastewater purnendu», *J. Renew. Mater.*, vol. 5, n.º 2, pp. 96-102, 2017, doi: 10.7569/JRM.2016.634134.

- [87]H. He, B. M. Wagner, A. L. Carlson, C. Yang, y G. T. Daigger, «Recent progress using membrane aerated biofilm reactors for wastewater treatment», *Water Sci. Technol.*, vol. 84, n.º 9, pp. 2131-2157, 2021, doi: 10.2166/wst.2021.443.
- [88]J. Mejjide, G. Lama, M. Pazos, M. A. Sanromán, y P. S. M. Dunlop, «Ultraviolet-based heterogeneous advanced oxidation processes as technologies to remove pharmaceuticals from wastewater: An overview», *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 10, n.º 3, 2022, doi: 10.1016/j.jece.2022.107630.
- [89]P. Gour, J. Kumar, S. E. Arland, L. D. Roy, y N. Rahman, «Green synthesis of DL-homocysteine decorated magnetic nanoparticles for selective and efficient mercury remediation from simulated wastewater: Kinetics, isotherm, and mechanism studies», *Environ. Eng. Res.*, vol. 29, n.º 5, 2024, doi: 10.4491/eer.2023.584.
- [90]Y. Yue *et al.*, «Activated carbon derived from highland barley straw for removing heavy metals and organic pollutants», *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 19, pp. 135-141, 2024, doi: 10.1093/ijlct/ctad042.
- [91]M. Ben Amar *et al.*, «Competitive heavy metal adsorption on pinecone shells: Mathematical modelling of fixed-bed column and surface interaction insights», *Sci. Total Environ.*, vol. 917, 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.170398.
- [92]W. A. Hammad, M. A. Darweesh, N. Zouli, S. M. Osman, B. Eweida, y M. H. A. Amr, «Adsorption of cationic dye onto Raphanus seeds: optimization, adsorption kinetics, thermodynamic studies», *Sci. Rep.*, vol. 14, n.º 1, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-66761-z.
- [93]S. Vaidh *et al.*, «Amyloid fibril-bacterial cellulose nanohybrid membrane cartridge for efficient removal of heavy metal from industrial wastewater», *Water Qual. Res. J.*, vol. 59, n.º 2, pp. 73-88, 2024, doi: 10.2166/wqrj.2024.001.
- [94]M. Nasir *et al.*, «Regenerable chitosan-embedded magnetic iron oxide beads for nitrate removal from industrial wastewater», *Environ. Sci. Adv.*, vol. 3, n.º 4, pp. 572-584, 2024, doi: 10.1039/d3va00351e.
- [95]S. A. Aliyu, N. Salahudeen, y A. A. Rasheed, «Adsorptive Removal of Lead (II) Pollutants from Wastewater Using Corncob-Activated Carbon», *J. Eng. Sci. Ukr.*, vol. 11, n.º 2, pp. H1-H10, 2024, doi: 10.21272/jes.2024.11(2).h1.
- [96]E. H. Khader *et al.*, «Evaluation of adsorption treatment method for removal of phenol and acetone from industrial wastewater», *Desalination Water Treat.*, vol. 317, 2024, doi: 10.1016/j.dwt.2024.100091.
- [97]S. Hailan, P. Sobolciak, A. Popelka, P. Kasak, S. Adham, y I. Krupa, «Complex treatment of oily polluted waters by modified melamine foams: from colloidal emulsions to a free oil removal», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, n.º 43, pp. 97872-97887, 2023, doi: 10.1007/s11356-023-29055-x.
- [98]U. F. C. Sayago, V. B. Ballesteros, y A. M. L. Aguilar, «Designing, Modeling and Developing Scale Models for the Treatment of Water Contaminated with Cr (VI) through Bacterial Cellulose Biomass», *Water Switz.*, vol. 16, n.º 17, 2024, doi: 10.3390/w16172524.