

Hidrogeles adsorbentes para la remoción de metales pesados
en aguas contaminadas:
revisión de avances recientes (2019–2025)

Giobanny Andres Avila Godoy

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Metalúrgico

Directora

Viviana Raquel Guiza Arguello

PhD en Ingeniería Química

Codirectora

Laura Valentina Sierra Rodríguez

Ingeniería Metalúrgica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, quienes con su amor, esfuerzo y apoyo incondicional han sido el pilar fundamental en mi vida. Gracias por creer siempre en mí, por impulsarme a seguir adelante y por ser el motor que me motivó a alcanzar cada una de mis metas.

A mis hermanos, por su compañía, respaldo y confianza, por estar presentes en cada etapa de este camino y por brindarme ánimo en los momentos más desafiantes.

A mi novia, por su amor, comprensión y apoyo constante, por estar a mi lado tanto en los momentos difíciles como en los de alegría, y por ser una fuente permanente de fortaleza y motivación durante este proceso.

A todos ustedes, que hicieron posible este logro, les dedico este trabajo con profundo cariño y gratitud.

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a Dios por permitirme terminar esta importante etapa de mi vida, brindándome fortaleza, sabiduría y perseverancia a lo largo de este camino. A mis padres, por su apoyo incondicional, su guía constante y por los valores que han inculcado en mí, los cuales han sido fundamentales para alcanzar este logro. A mi hermana mayor, por su ejemplo, su acompañamiento y sus valiosos consejos durante este proceso. A mi novia, por su apoyo permanente durante mis últimos años de universidad, por ser un pilar fundamental, por su comprensión y por brindarme fortaleza y motivación en cada etapa de este camino.

Expreso un especial agradecimiento a mi directora de tesis, la profesora Viviana Guiza, por su orientación, paciencia, apoyo constante y valiosos consejos, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo y culminación de este trabajo. Asimismo, agradezco a la ingeniera Laura Sierra por su disposición, acompañamiento y aportes durante el desarrollo de este proyecto.

A todos los docentes que hicieron parte de mi formación en la Universidad Industrial de Santander, por transmitirme sus conocimientos y contribuir significativamente a mi crecimiento profesional y personal. Finalmente, agradezco a la Universidad Industrial de Santander, espacio en el que no solo adquirí conocimientos, sino también crecí a nivel personal y académico.

Tabla de contenido

Introducción	9
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo General	13
1.2 Objetivos específicos	13
2. Marco Teórico.....	14
2.1 Metales pesados en aguas contaminadas	14
2.1.1 Definición y características generales.....	14
2.1.2 Principales metales de interés ambiental y sus efectos toxicológicos	15
2.1.3 Fuentes de emisión y mecanismos de toxicidad	15
2.2 Tecnologías convencionales para la remoción de metales pesados	16
2.3 Adsorción como alternativa para el tratamiento de aguas	17
2.3.1 Fundamentos y ventajas comparativas.....	17
2.4 Hidrogeles adsorbentes: definición, clasificación y propiedades	18
2.4.1 Definición estructural y propiedades fisicoquímicas .	18
2.4.2 Clasificación según origen polimérico.....	19
2.5 Mecanismos de adsorción de iones metálicos en hidrogeles	20
2.6 Métodos de síntesis y entrecruzamiento	20
2.7 Modelos matemáticos de cinética e isothermas de adsorción.....	21
3. Metodología	23

3.1 Tipo de investigación.....	23
3.2 Estrategia de búsqueda bibliográfica	23
3.3 Criterios de selección.....	24
3.4 Procesamiento y análisis de la información.....	24
4. Resultados Y Análisis.....	25
4.1 Panorama general de la literatura analizada: escala, alcance y distribución temática.....	25
4.2 Composición y diseño: lógica estructural detrás de las estrategias de hibridación	26
4.2.1 Lógica 1 - Injerto de poliacrilato sobre biopolímero .	26
4.2.2 Lógica 2 - Gelificación iónica con Ca ²⁺ e hibridación de la fase de nucleación	26
4.2.3 Lógica 3 - Redes interpenetradas (IPN) y dendrímeros como amplificadores de densidad funcional.....	27
4.2.4 Lógica 4 - Grupos funcionales específicos para alta selectividad	27
4.3 Métodos de fabricación y entrecruzamiento: relación entre proceso, estructura y desempeño.....	27
4.4 Caracterización: lo que revelan las técnicas cuando se interpretan en conjunto	28
4.5 Comportamiento adsorptivo: análisis comparativo del desempeño por metal, condición y composición	29

4.6 Modelos cinéticos e isothermas: análisis crítico más allá del ajuste estadístico	30
4.7 Regeneración y reutilización: análisis comparativo de la viabilidad operativa	31
4.8 Limitaciones recurrentes y vacíos críticos: diagnóstico de madurez tecnológica	32
4.8.1 Vacíos metodológicos	32
4.8.2 Vacíos de validación	32
4.8.3 Vacíos de transferencia tecnológica	33
4.9 Síntesis crítica integradora: estado del arte, brechas estructurales y perspectivas	33
5. Conclusiones	35
Referencias Bibliográficas	39

Resumen

Título: Hidrogeles adsorbentes para la remoción de metales pesados en aguas contaminadas: revisión de avances recientes (2019-2025)*

Autor: Giobanny Andres Avila Godoy**

Palabras Clave: Hidrogeles, adsorción, metales pesados, tratamiento de aguas.

Descripción: La contaminación de fuentes hídricas por metales pesados constituye uno de los problemas ambientales más críticos a nivel global, agravado por actividades industriales como la minería, la galvanoplastia y la industria textil. Frente a las limitaciones de las tecnologías convencionales de remoción, alta generación de residuos, costos elevados e ineficiencia a bajas concentraciones, los hidrogeles adsorbentes han emergido como una alternativa prometedora gracias a su alta capacidad de absorción, abundancia de grupos funcionales activos y posibilidad de regeneración. La presente monografía realiza una revisión sistemática y crítica de 35 investigaciones publicadas entre 2019 y 2025, con el objetivo de caracterizar las tendencias en el diseño de hidrogeles adsorbentes, evaluar su desempeño frente a metales como Cu^{2+} , Pb^{2+} y Cd^{2+} , y analizar los modelos cinéticos e isotérmicos empleados. Los resultados evidencian que el 71% de los materiales estudiados corresponde a sistemas híbridos multicomponente, los cuales superan ampliamente a los hidrogeles de componente único, alcanzando capacidades máximas de adsorción de hasta 843,9 mg/g para Pb^{2+} . Se identificaron cuatro lógicas de diseño dominantes: injerto de poliacrilato sobre biopolímeros, gelificación iónica con dopantes funcionales, redes interpenetradas con dendrímeros y grupos funcionales específicos de alta selectividad. El modelo cinético de pseudo-segundo orden describe adecuadamente el 82,9% de los casos, confirmando el predominio de la quimisorción, mientras que la isoterma de Langmuir prevalece en sistemas de red simple. Se concluye que, si bien los hidrogeles híbridos representan una alternativa tecnológicamente competitiva frente al carbón activado convencional, persisten brechas críticas relacionadas con la evaluación en matrices reales, la estandarización de condiciones experimentales y la escalabilidad industrial, aspectos que deben priorizarse en futuras investigaciones.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Ingeniería Metalúrgica. Directora: Viviana Raquel Güiza Argüello. PhD en Ingeniería Química. Codirectora: Laura Valentina Sierra Rodríguez. Ingeniera Metalúrgica.

Abstract

Title: Adsorbent Hydrogels for the Removal of Heavy Metals from Contaminated Water: A Review of Recent Advances (2019–2025)*

Author: Giobanny Andres Avila Godoy**

Key Words: Hydrogels, adsorption, heavy metals, water treatment.

Description: The contamination of water sources by heavy metals constitutes one of the most critical environmental problems at a global level, aggravated by industrial activities such as mining, electroplating, and the textile industry. Faced with the limitations of conventional removal technologies, high waste generation, elevated costs, and inefficiency at low concentrations, adsorbing hydrogels have emerged as a promising alternative due to their high absorption capacity, abundance of active functional groups, and regeneration potential. This monograph carries out a systematic and critical review of 35 investigations published between 2019 and 2025, with the objective of characterizing trends in the design of adsorbing hydrogels, evaluating their performance against metals such as Cu^{2+} , Pb^{2+} , and Cd^{2+} , and analyzing the kinetic and isotherm models employed. The results show that 71% of the materials studied correspond to multicomponent hybrid systems, which largely outperform single-component hydrogels, reaching maximum adsorption capacities of up to 843.9 mg/g for Pb^{2+} . Four dominant design approaches were identified: grafting of polyacrylate onto biopolymers, ionic gelation with functional dopants, interpenetrating networks with dendrimers, and high-selectivity specific functional groups. The pseudo-second-order kinetic model adequately describes 82.9% of cases, confirming the predominance of chemisorption, while the Langmuir isotherm prevails in single-network systems. It is concluded that, although hybrid hydrogels represent a technologically competitive alternative to conventional activated carbon, critical gaps persist regarding evaluation in real matrices, standardization of experimental conditions, and industrial scalability — aspects that should be prioritized in future research.

* Degree Work

** *Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Metallurgical Engineering. Director: Viviana Raquel Güiza Argüello. PhD in Chemical Engineering. Co-director: : Laura Valentina Sierra Rodríguez. Metallurgical Engineer.

Introducción

La contaminación del agua por metales pesados representa uno de los problemas ambientales más apremiantes en el contexto global contemporáneo, con implicaciones directas sobre la disponibilidad de recursos hídricos seguros y sobre la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos. Este fenómeno se ha agudizado como consecuencia del crecimiento poblacional sostenido, la expansión industrial no planificada y la urbanización acelerada, factores que han incrementado la descarga de efluentes contaminantes en cuerpos de agua superficiales y subterráneos (Saravanan et al., 2024). En este contexto, los metales pesados son considerados contaminantes prioritarios por tres razones fundamentales: su carácter no biodegradable, su elevada toxicidad incluso a concentraciones traza y su tendencia a la bioacumulación progresiva en los tejidos de los organismos vivos a lo largo de las cadenas tróficas.

Desde el punto de vista toxicológico, metales como el plomo (Pb^{2+}), el cadmio (Cd^{2+}), el cromo hexavalente (Cr^{6+}), el mercurio (Hg^{2+}) y el cobre (Cu^{2+}) generan efectos adversos a muy bajas concentraciones, manifestándose como alteraciones neurológicas, daños hepáticos y renales, disfunciones reproductivas e incluso efectos carcinogénicos (Vardhan et al., 2019; Aziz et al., 2023). Su persistencia en el ambiente, combinada con la capacidad de migrar entre compartimentos —agua, sedimento, suelo— dificulta su remediación efectiva y justifica la urgencia científica y tecnológica de desarrollar métodos de remoción cada vez más eficientes.

Las principales fuentes de contaminación por metales pesados son de naturaleza antropogénica y comprenden sectores como la minería y metalurgia, la industria galvánica y de recubrimientos, la fabricación de baterías, la industria textil y la refinación de petróleo

(Oladimeji et al., 2024). A estas se suman prácticas agrícolas que emplean fertilizantes y pesticidas con impurezas metálicas, así como la disposición inadecuada de residuos sólidos y líquidos. El resultado es la presencia creciente de iones metálicos en efluentes industriales y en sistemas de abastecimiento de agua, frecuentemente en concentraciones que superan los límites máximos permisibles establecidos por organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).

Frente a esta problemática, se han desarrollado tecnologías convencionales para la remoción de metales pesados, incluyendo la precipitación química, el intercambio iónico, la coagulación-floculación, la filtración por membranas y los procesos electroquímicos. Sin embargo, estas tecnologías presentan limitaciones significativas: altos costos operativos, generación de residuos secundarios de difícil disposición, baja eficiencia en soluciones diluidas (concentraciones inferiores a 100 mg/L) y sensibilidad a variaciones en los parámetros del efluente (Singh et al., 2024; Oladimeji et al., 2024). Estas restricciones han impulsado la búsqueda de alternativas más eficientes, económicamente accesibles y ambientalmente sostenibles.

En este escenario, la adsorción ha emergido como una de las tecnologías más prometedoras para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados. Sus ventajas comparativas incluyen alta eficiencia a bajas concentraciones, bajo costo relativo de operación, simplicidad técnica y la posibilidad de recuperar tanto el metal captado como el material adsorbente mediante ciclos de desorción (Kushwaha & Singh, 2023). Dentro del universo de materiales adsorbentes, los hidrogeles han captado un creciente interés científico por sus propiedades fisicoquímicas únicas. Estos materiales poliméricos tridimensionales, formados por redes entrecruzadas con elevada capacidad de absorción de agua, poseen abundantes grupos

funcionales activos —como $-\text{OH}$, $-\text{COOH}$ y $-\text{NH}_2$ — capaces de interactuar química y electrostáticamente con iones metálicos en solución (Darban et al., 2022).

Una de las tendencias más relevantes en el campo es el desarrollo de hidrogeles híbridos o nanocompuestos, que combinan biopolímeros naturales con polímeros sintéticos y nanomateriales funcionales —óxido de grafeno, arcillas laminares, nanopartículas de óxido de hierro— para maximizar sinérgicamente la capacidad adsorbente. Estos sistemas han demostrado capacidades máximas de adsorción (Q_{max}) significativamente superiores a las de los hidrogeles de componente único, con valores reportados que superan los 800 mg/g para Pb^{2+} en los materiales más eficientes de la literatura reciente (Rodrigues et al., 2019).

No obstante, estos avances, persiste una problemática científica relevante vinculada a la alta variabilidad en los resultados reportados en la literatura. Diferencias en las condiciones experimentales —pH, concentración inicial del metal, dosis de adsorbente, temperatura, presencia de iones competidores y tiempo de contacto— dificultan la comparación sistemática entre estudios y la evaluación objetiva del desempeño relativo de los materiales. Esta heterogeneidad no solo limita la reproducibilidad de los resultados, sino que obstaculiza la identificación de tendencias claras en la relación estructura-propiedad-desempeño y retrasa la transición de los hidrogeles hacia aplicaciones industriales a escala real.

En este contexto, la presente monografía tiene como propósito realizar una revisión bibliográfica sistemática y crítica de los avances reportados entre 2019 y 2025 en el desarrollo de hidrogeles adsorbentes para la remoción de metales pesados en aguas contaminadas. Mediante el análisis comparativo de un conjunto de 35 estudios seleccionados con criterios rigurosos, se busca caracterizar las tendencias en el diseño de materiales, evaluar los modelos cinéticos e

isotérmicos predominantes, analizar el efecto de las variables experimentales sobre el desempeño adsorbente y evidenciar las limitaciones metodológicas actuales. De esta forma, se aspira a aportar una base analítica y crítica que contribuya al avance del conocimiento en este campo y a la orientación de futuras líneas de investigación hacia soluciones de mayor impacto tecnológico y ambiental.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

- Realizar una revisión de la literatura reciente sobre el desarrollo de materiales adsorbentes tipo hidrogel, orientados al tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados.

1.2 Objetivos Específicos

- Recopilar y sistematizar información bibliográfica relevante publicada entre 2019 y 2025 acerca del desarrollo de hidrogeles aplicados a la remoción de metales pesados, considerando criterios de selección establecidos.
- Identificar los principales polímeros empleados, así como los métodos de síntesis y las condiciones de evaluación del desempeño de los hidrogeles adsorbentes para la purificación de aguas contaminadas con metales pesados.
- Analizar comparativamente los diferentes tipos de hidrogeles descritos en la literatura, con el propósito de establecer las condiciones de fabricación y aplicación más adecuadas para la remoción eficiente de metales pesados.

2. Marco Teórico

2.1 Metales pesados en aguas contaminadas

2.1.1 Definición y características generales

Los metales pesados constituyen un grupo de elementos metálicos y semimetálicos caracterizados por densidades atómicas superiores a 4000 kg/m^3 y números atómicos elevados. Aunque la categoría no responde a una clasificación química estricta, ha sido ampliamente adoptada en la literatura científica para designar a aquellos elementos traza cuya presencia en el ambiente, incluso en concentraciones mínimas, genera efectos tóxicos significativos sobre los organismos vivos (Alam et al., 2023). Entre sus características como contaminantes prioritarios destacan el carácter no biodegradable, la tendencia a la bioacumulación en tejidos biológicos y la persistencia en los ecosistemas acuáticos, aspectos que los diferencian fundamentalmente de los contaminantes orgánicos, los cuales pueden degradarse por vías bioquímicas y fotoquímicas (Aziz et al., 2023; Saravanan et al., 2024).

Algunos metales pesados, como el cobre, el zinc, el hierro, el níquel y el cobalto, desempeñan funciones fisiológicas esenciales para el metabolismo de plantas y microorganismos cuando están presentes a nivel de trazas; sin embargo, al superar los límites permisibles establecidos por la OMS y la EPA, se tornan altamente tóxicos. Por el contrario, el plomo, el cadmio, el mercurio, el arsénico y el cromo hexavalente carecen de funciones biológicas conocidas, y su presencia en cualquier concentración detectable constituye una amenaza para la salud humana y los ecosistemas (Oladimeji et al., 2024).

2.1.2 Principales metales de interés ambiental y sus efectos toxicológicos

El plomo (Pb) es uno de los metales más estudiados por su amplia distribución ambiental y su alta toxicidad sobre el sistema nervioso central, con efectos especialmente graves en la infancia. El cadmio (Cd) presenta alta movilidad en medios acuosos, se acumula preferentemente en el riñón y está asociado con la enfermedad de Itai-Itai, documentada en Japón. El cromo hexavalente (Cr^{6+}) es reconocido como carcinógeno de clase A por la capacidad de penetrar membranas celulares y causar daño oxidativo al ADN. El arsénico es un metaloide de especial preocupación en regiones latinoamericanas por su presencia en acuíferos subterráneos; la OMS establece un límite máximo de 10 $\mu\text{g/L}$ para agua potable, valor superado con frecuencia en países de alto riesgo (Saravanan et al., 2024; Aziz et al., 2023). El mercurio, en su forma metilada, se biomagnifica en cadenas tróficas acuáticas afectando especialmente el sistema nervioso central. El níquel, el zinc y el cobre completan el grupo de metales más frecuentemente detectados en efluentes industriales.

2.1.3 Fuentes de emisión y mecanismos de toxicidad

Las fuentes de contaminación por metales pesados son tanto naturales —erosión de rocas, erupciones volcánicas, meteorización química— como, predominantemente, de origen antropogénico. Entre las fuentes puntuales de origen industrial destacan la galvanoplastia, la fabricación de baterías, la minería metálica, las curtiembres, la industria textil, la producción de pinturas y pigmentos, y la refinación de petróleo (Oladimeji et al., 2024). Las fuentes difusas incluyen la aplicación de fertilizantes fosfatados con impurezas de cadmio y arsénico, la irrigación con aguas residuales, los lixiviados de rellenos sanitarios y, en el contexto colombiano y latinoamericano, la minería artesanal e ilegal como fuente crítica de mercurio y arsénico en cuencas estratégicas.

La toxicidad de los metales pesados se manifiesta a través de múltiples mecanismos bioquímicos: unión competitiva con grupos tiol ($-SH$) de enzimas y proteínas, generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) que provocan estrés oxidativo, inhibición de la síntesis de ADN y desplazamiento de cationes metálicos esenciales en los sitios activos de las enzimas (Saravanan et al., 2024). A diferencia de los contaminantes orgánicos, los iones metálicos no pueden degradarse en productos inocuos, lo que justifica la necesidad de su remoción física del medio acuoso. La bioacumulación y la biomagnificación a lo largo de la cadena trófica explican por qué el consumo de peces de cuencas contaminadas representa una de las principales vías de exposición humana a metales como el metilmercurio y el cadmio.

2.2 Tecnologías convencionales para la remoción de metales pesados

El tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados ha sido abordado históricamente mediante diversas tecnologías fisicoquímicas. La precipitación química, método más utilizado a escala industrial, consiste en la adición de agentes alcalinos como $NaOH$ o $Ca(OH)_2$ para convertir los iones metálicos disueltos en hidróxidos insolubles; sin embargo, genera grandes volúmenes de lodos tóxicos y presenta baja eficiencia a concentraciones inferiores a 100 mg/L (Oladimeji et al., 2024; Alam et al., 2023). La coagulación-floculación emplea sales de aluminio o hierro para desestabilizar partículas coloidales, pero su eficiencia disminuye en presencia de metales disueltos a bajas concentraciones. El intercambio iónico ofrece alta selectividad pero implica elevados costos de regeneración y susceptibilidad al fouling. La filtración por membranas —nanofiltración, ósmosis inversa— alcanza altas eficiencias de remoción, aunque a costa de altos consumos energéticos y costos de mantenimiento (Sharma et al., 2021).

En síntesis, las tecnologías convencionales comparten un conjunto de limitaciones estructurales que incluyen ineficiencia a bajas concentraciones de metales, generación de residuos secundarios de difícil gestión, elevados costos de capital y operación, y baja adaptabilidad a condiciones variables del efluente. Frente a este panorama, la adsorción mediante materiales de alta capacidad y bajo costo ha emergido como la alternativa técnicamente más competitiva y económicamente accesible para el tratamiento de efluentes metalíferos a diversas escalas (Aziz et al., 2023; Singh et al., 2024).

2.3 Adsorción como alternativa para el tratamiento de aguas

2.3.1 Fundamentos y ventajas comparativas

La adsorción es un proceso fisicoquímico de interfase mediante el cual moléculas o iones de una fase fluida —el adsorbato— se concentran en la superficie o en el interior poroso de un sólido —el adsorbente— a través de fuerzas físicas o químicas. Cuando la interacción es de tipo Van der Waals —reversible y de baja energía— se denomina fisisorción; cuando implica la formación de enlaces covalentes o coordinados entre el adsorbato y los grupos funcionales del adsorbente, se clasifica como quimisorción (Kushwaha & Singh, 2023). En el contexto del tratamiento de aguas, el proceso transcurre en tres etapas cinéticas: difusión externa desde el seno de la solución hacia la capa límite, difusión intraparticular a través de los poros del sólido, y adsorción en los sitios activos de la superficie.

Las ventajas comparativas de la adsorción incluyen su aplicabilidad a un amplio rango de concentraciones —incluyendo concentraciones inferiores a 10 mg/L—, la ausencia de generación de lodos tóxicos cuando el adsorbente es regenerable, la simplicidad de diseño de sistemas en batch y en columnas de lecho fijo, y la disponibilidad de una gran diversidad de materiales adsorbentes cuya composición puede ajustarse para optimizar la selectividad y la

capacidad de remoción para contaminantes específicos (Aziz et al., 2023; Oladimeji et al., 2024). Adicionalmente, la posibilidad de recuperar los metales adsorbidos durante las etapas de desorción convierte a la adsorción en una tecnología alineada con los principios de la economía circular.

2.4 Hidrogeles adsorbentes: definición, clasificación y propiedades

2.4.1 Definición estructural y propiedades fisicoquímicas

Los hidrogeles son materiales poliméricos tridimensionales constituidos por redes de cadenas macromoleculares entrecruzadas, capaces de absorber y retener grandes cantidades de agua —que puede superar varias veces su masa seca— sin disolverse en el medio acuoso. Esta propiedad distintiva surge del carácter hidrofílico de los grupos funcionales presentes en las cadenas poliméricas y de la estabilidad conferida por los puntos de entrecruzamiento, que actúan como nodos que restringen la disolución del polímero (Zhao et al., 2022; Kushwaha & Singh, 2023). La naturaleza tridimensional de la red garantiza una distribución uniforme y accesible de los sitios activos a lo largo de todo el volumen del material, favorece la difusión rápida de iones metálicos a través de canales de agua internos y provee estabilidad mecánica para la separación sólido-líquido y la reutilización del adsorbente.

Los grupos funcionales constituyen el elemento activo de los hidrogeles para la captura de metales. Los grupos carboxilo ($-\text{COOH}$), hidroxilo ($-\text{OH}$) y amino ($-\text{NH}_2$) son los de mayor relevancia para metales de transición, actuando a través de mecanismos de complejación y quelación. Los grupos sulfonato ($-\text{SO}_3\text{H}$) son especialmente efectivos por intercambio catiónico, mientras que los grupos tiol ($-\text{SH}$) presentan alta selectividad hacia metales de carácter blando según la teoría HSAB de Pearson —como mercurio, cadmio y arsénico— (Darban et al., 2022; Kushwaha & Singh, 2023).

2.4.2 Clasificación según origen polimérico

Los hidrogeles se clasifican, según el origen de sus componentes, en naturales, sintéticos e híbridos o compuestos. Los hidrogeles de origen natural se sintetizan a partir de biopolímeros como el quitosano, el alginato de sodio, la celulosa y sus derivados, la carragenina y proteínas como la gelatina. El quitosano, derivado de la desacetilación parcial de la quitina de crustáceos, es el biopolímero más estudiado en adsorción de metales pesados por su abundancia de grupos amino ($-NH_2$) e hidroxilo ($-OH$) que le confieren alta afinidad por Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} y Ni^{2+} ; sin embargo, su solubilidad en medios ácidos y baja resistencia mecánica en estado húmedo requieren del uso de agentes reticulantes (Barbosa et al., 2024; Lv et al., 2025). El alginato de sodio, polisacárido aniónico extraído de algas pardas marinas, forma geles físicos estables de tipo 'egg-box' en presencia de Ca^{2+} , presentando alta afinidad electrostática por cationes metálicos divalentes gracias a sus grupos carboxilato ($-COO^-$) a pH neutro (Chen et al., 2024; Nasr et al., 2025).

Los hidrogeles sintéticos se obtienen a partir de monómeros de origen petroquímico como el ácido acrílico (AA), la acrilamida (AAm) y el polivinilalcohol (PVA). Los sistemas de poli(ácido acrílico) presentan alta densidad de grupos carboxilato que se desprotonifican a pH moderado, generando redes cargadas negativamente con fuerte afinidad por cationes. Los hidrogeles híbridos o compuestos combinan componentes naturales y sintéticos con nanomateriales —óxido de grafeno, arcillas laminares, nanopartículas de óxido de hierro— para explotar sinérgicamente las propiedades de cada componente. Esta categoría representa la tendencia dominante en la investigación reciente y sus formulaciones optimizadas han demostrado capacidades adsorbentes muy superiores a los sistemas de componente único (Zhao et al., 2022).

2.5 Mecanismos de adsorción de iones metálicos en hidrogeles

Los mecanismos de adsorción en hidrogeles son múltiples y operan simultáneamente dependiendo de la composición química del polímero, el tipo de metal y las condiciones del sistema. El intercambio iónico ocurre cuando un catión metálico desplaza un ion de menor afinidad asociado a un grupo funcional cargado negativamente del polímero. La quelación implica la formación de complejos de coordinación entre los grupos funcionales nitrogenados u oxigenados del hidrogel y los iones metálicos, actuando como ligandos donadores de pares de electrones; este mecanismo es particularmente importante en hidrogeles que contienen grupos amino o tiol. Las interacciones electrostáticas son la fuerza dominante en sistemas de hidrogeles cargados cuando el pH del medio supera el punto de carga cero del material (pHpzc), generando atracción hacia los cationes metálicos. En hidrogeles nanocompuestos con óxido de grafeno, pueden operar adicionalmente interacciones π - π y fuerzas de Van der Waals entre las estructuras aromáticas del nanomaterial y ciertas especies orgánicas metálicas (Galindo et al., 2025; Kushwaha & Singh, 2023).

2.6 Métodos de síntesis y entrecruzamiento

La síntesis de hidrogeles adsorbentes puede clasificarse en entrecruzamiento físico y entrecruzamiento químico. El entrecruzamiento físico se logra mediante interacciones no covalentes —puentes de hidrógeno, fuerzas electrostáticas, cristalización— generando hidrogeles reversibles. Los métodos más comunes incluyen la gelación iónica con Ca^{2+} en sistemas de alginato y los ciclos de congelación-descongelación en PVA. El entrecruzamiento químico emplea agentes reticulantes como N,N'-metilénbisacrilamida (MBA), glutaraldehído, epíclorhidrina o carbodiimida, produciendo redes permanentes más estables (Barbosa et al., 2024). La MBA, presente en 18 de los 35 estudios de la revisión, es el reticulante más

ampliamente empleado por generar redes tridimensionales covalentes de alta estabilidad sin consumir los grupos funcionales activos destinados a la adsorción. El glutaraldehído, frecuente en sistemas de quitosano, genera bases de Schiff con los grupos amino del polímero, mejorando la estabilidad mecánica pero reduciendo parcialmente los sitios $-NH_2$ disponibles para la complejación metálica.

La densidad de entrecruzamiento es un parámetro de diseño crítico que establece un compromiso entre las propiedades de adsorción y las propiedades mecánicas: densidades elevadas producen redes más compactas con menor hinchamiento y menor accesibilidad intraparticular, mientras que densidades bajas generan redes más abiertas con mayor absorción de agua y mejor difusión de adsorbatos, pero menor resistencia mecánica (Kushwaha & Singh, 2023). La incorporación de nanomateriales como nanopartículas de Fe_3O_4 , óxido de grafeno, nanoarcillas y puntos de carbono derivados de biomasa representa la tendencia dominante en el período 2019-2025, con el objetivo de ampliar el área superficial específica, introducir sitios de adsorción adicionales y conferir funcionalidades como respuesta magnética para facilitar la separación sólido-líquido.

2.7 Modelos matemáticos de cinética e isotermas de adsorción

El análisis cinético de la adsorción permite identificar el mecanismo de velocidad dominante y el tiempo requerido para alcanzar el equilibrio. El modelo de pseudo-primer orden (Lagergren) postula que la velocidad de adsorción es proporcional al número de sitios activos disponibles, siendo característica de procesos de fisorción. El modelo de pseudo-segundo orden propone que la velocidad es proporcional al cuadrado de la diferencia entre la capacidad en el equilibrio y la cantidad adsorbida en el tiempo t , siendo indicativo de quimisorción; su forma lineal integrada es: $t/qt = 1/(k_2 \cdot q_e^2) + t/q_e$, donde k_2 es la constante de velocidad de segundo

orden (Shang et al., 2023; Chen et al., 2024). En la literatura sobre hidrogeles, este último modelo es el que mejor se ajusta a los datos experimentales con coeficientes R^2 generalmente superiores a 0.99, lo que corrobora el predominio de la quimisorción como mecanismo dominante.

Las isothermas de adsorción describen la relación entre la cantidad de metal adsorbida en el equilibrio y su concentración remanente en solución a temperatura constante. El modelo de Langmuir asume adsorción en monocapa sobre una superficie homogénea con sitios activos equivalentes e independientes, y se expresa como: $q_e = q_{max} \cdot K_L \cdot C_e / (1 + K_L \cdot C_e)$. El factor de separación $RL = 1/(1 + K_L \cdot C_0)$ determina la naturaleza de la adsorción: favorable cuando $0 < RL < 1$. El modelo de Freundlich, aplicable a superficies heterogéneas con adsorción en multicapa, se expresa como: $q_e = K_F \cdot C_e^{(1/n)}$; valores de $n > 1$ indican adsorción favorable (Shang et al., 2023; Galindo et al., 2025). En los hidrogeles revisados, el modelo de Langmuir predomina en sistemas poliméricos de red simple, mientras que el de Freundlich describe mejor los sistemas con nanorellenos que introducen heterogeneidad energética de sitios.

3. Metodología

3.1 Tipo de investigación

La presente monografía corresponde a una investigación documental de tipo revisión sistemática de literatura científica, con enfoque descriptivo-analítico. Se realizó una búsqueda sistemática y un análisis crítico y comparativo de artículos científicos publicados en revistas indexadas entre 2019 y 2025, centrados en el desarrollo y aplicación de hidrogeles adsorbentes para la remoción de metales pesados en aguas contaminadas. El análisis no se limitó a la descripción de los estudios individuales, sino que buscó identificar tendencias, evaluar la consistencia de los resultados y establecer comparaciones cuantitativas y mecanísticas entre sistemas de diferente composición.

3.2 Estrategia de búsqueda bibliográfica

La búsqueda de información se realizó en las principales bases de datos científicas: Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed y Google Scholar. Se emplearon combinaciones de palabras clave en inglés, incluyendo: "hydrogel", "adsorbent", "heavy metals", "removal", "wastewater", "adsorption", "chitosan", "cellulose", "acrylic acid", "nanocomposite hydrogel", "magnetic hydrogel" y "water treatment". Se utilizaron operadores booleanos (AND, OR) para refinar las búsquedas y garantizar la cobertura de los enfoques más relevantes del campo. La búsqueda se limitó temporalmente al período comprendido entre enero de 2019 y diciembre de 2025, con el fin de capturar los avances más recientes en el área.

3.3 Criterios de selección

Se incluyeron artículos originales de investigación y revisiones publicados en revistas indexadas en el período señalado, que abordaran el desarrollo, la síntesis, la caracterización o la

evaluación del desempeño adsorbente de hidrogeles para la remoción de al menos un metal pesado en fase acuosa. Se consideró exclusivamente literatura en idioma inglés. Fueron excluidas publicaciones sin datos experimentales de adsorción, artículos centrados exclusivamente en aplicaciones biomédicas o agrícolas sin relación con el tratamiento de aguas, documentos en idiomas distintos al inglés y publicaciones anteriores a 2019, salvo referencias clásicas requeridas para el marco teórico. De la búsqueda inicial, se seleccionaron 35 estudios que cumplieron con todos los criterios establecidos, conformando el corpus analítico de la revisión.

3.4 Procesamiento y análisis de la información

Los artículos seleccionados fueron organizados y sistematizados en una matriz de análisis que incluyó las siguientes variables: tipo de hidrogel (natural, sintético o híbrido), polímeros base empleados, método de síntesis y agente reticulante, metal o metales diana, condiciones experimentales óptimas (pH, temperatura, concentración inicial, dosis de adsorbente, tiempo de contacto), capacidad máxima de adsorción (Q_{max}), modelos cinéticos e isotérmicos con sus respectivos parámetros, datos de desorción y ciclos de reutilización, y presencia de estudios en matrices reales versus soluciones sintéticas. La información fue analizada comparativamente mediante tablas y discusión crítica para identificar patrones, tendencias y limitaciones del campo. Las citas y referencias se gestionaron siguiendo las normas del sistema APA séptima edición.

4. Resultados Y Análisis

Los resultados del análisis sistemático de los 35 estudios seleccionados se presentan organizados en torno a los ejes de análisis más relevantes: panorama general de la literatura, composición y diseño de materiales, métodos de fabricación, caracterización, comportamiento adsorptivo, modelos cinéticos e isotérmicos, estudios de regeneración, limitaciones identificadas y síntesis crítica integradora.

4.1 Panorama general de la literatura analizada: escala, alcance y distribución temática

La muestra comprende 35 artículos publicados entre 2019 y 2025. La distribución temporal refleja una aceleración progresiva: el período 2019–2020 concentra siete trabajos, mientras que 2023–2025 agrupa 21 estudios. Esta tendencia responde a la convergencia de la presión regulatoria sobre metales pesados, la madurez de las técnicas de síntesis de nanomateriales y el interés creciente por la recuperación de metales críticos.

En cuanto al alcance, 32 de los 35 estudios se centran en remoción por adsorción convencional; tres casos anticipan la diversificación funcional del campo: uno enfocado en fotocatalisis acoplada, otro en separación de lantánidos y Tang et al. (2025) con sistema binario metal-antibiótico. El Cu(II) es el metal más estudiado (25/35 estudios), seguido del Pb(II) (18/35) y el Cd(II) (10/35). Esta jerarquía responde tanto a su toxicidad regulatoriamente prioritaria como a su conveniencia analítica, aunque introduce un sesgo relevante: los grupos funcionales óptimos para Cu(II) —amino con geometría de coordinación cuadrado-planar— no son necesariamente los más eficientes para Pb(II) o Cd(II), dada su distinta posición en la teoría HSAB.

El 71% de los materiales es de tipo híbrido (25/35), el 17% natural puro y el 12% sintético puro. La hibridación permite combinar la especificidad funcional de biopolímeros con la resistencia estructural y el área superficial de cargas inorgánicas o nanomateriales, superando las limitaciones individuales de cada componente.

4.2 Composición y diseño: lógica estructural detrás de las estrategias de hibridación

El análisis de los 35 materiales revela cuatro lógicas de diseño orientadas al mismo principio: maximizar la densidad de sitios activos accesibles preservando la integridad estructural durante la adsorción y la regeneración.

4.2.1 Lógica 1 — Injerto de poliacrilato sobre biopolímero

La estrategia más representada (12 estudios) consiste en injertar poli(ácido acrílico) (PAA) sobre un biopolímero —quitosano, goma guar, almidón, lignina o lignosulfonato— usando MBA como reticulante covalente. El biopolímero aporta grupos nucleófilos naturales ($-NH_2$, $-OH$) que complementan la alta densidad de $-COOH$ del PAA. El pH óptimo de operación coincide con el pKa del PAA (4.2), lo que establece una limitación estructural para efluentes ácidos: por debajo de pH 3.5, la protonación de los $-COO^-$ inactiva los sitios adsorbentes. Rodrigues et al. (2019) marca el límite superior de desempeño al incorporar nanowhiskers de celulosa (CNWs) a 10% p/p, alcanzando Q_{max} de 843.9 mg/g para Pb(II).

4.2.2 Lógica 2 — Gelificación iónica con Ca^{2+} e hibridación de la fase de nucleación

Nueve estudios emplean alginato de sodio reticulado con Ca^{2+} . La clave estratégica no es el alginato per se, sino la incorporación del dopante antes de la gelificación para lograr distribución homogénea. Huang et al. (2025) demostró que dopar con nano- β -FeOOH produce una estructura core-shell que quintuplica el Q_{max} del alginato puro (442.8 mg/g para Cu^{2+}).

Younis et al. (2025) incorporó carbon dots de biomasa de loto, obteniendo además propiedades fluorescentes para el seguimiento in situ del proceso.

4.2.3 Lógica 3 — Redes interpenetradas (IPN) y dendrímeros como amplificadores de densidad funcional

Tres estudios exploran dendrímeros PAMAM o redes IPN. Sun et al. (2023) demostró que el hidrogel CTS/G3 PAMAM/SA/Ca²⁺ supera en Q_{max} a sus análogos de generaciones inferiores, pero que a partir de G3 la resistencia mecánica disminuye por pérdida de densidad de entrecruzamiento. Este trade-off ilustra un principio subestimado: la maximización de grupos funcionales no puede dissociarse del control de la cohesión estructural.

4.2.4 Lógica 4 — Grupos funcionales específicos para alta selectividad

Cuatro estudios introducen ligandos con selectividad química específica: grupos tiourea (–CSNH₂), sulfonato (–SO₃[–]), hidroxámicos (–C(=O)NHOH) y cavidades de β-ciclodextrina. Los grupos sulfonato de Galindo et al. (2025) permanecen cargados en todo el rango pH 2–8 sin depender de equilibrios ácido-base, alcanzando Q_{max} de 631.7 mg/g para Pb(II) y 633.3 mg/g para Ni(II). Los grupos hidroxámicos de Lv et al. (2025) forman complejos tridentados con Ga(III) de alta estabilidad, permitiendo remoción >90% a pH 2–3 —condición donde la mayoría de los adsorbentes de la muestra ha perdido eficiencia.

4.3 Métodos de fabricación y entrecruzamiento: relación entre proceso, estructura y desempeño

El método de fabricación determina la morfología, el grado de entrecruzamiento y la accesibilidad de los sitios activos, y condiciona directamente la cinética, el Q_{max} y la estabilidad durante ciclos de regeneración.

La polimerización radicalaria libre con MBA es el método dominante (20/35 estudios). El grado de reticulación establece un compromiso: redes poco reticuladas hinchan más y ofrecen mayor acceso a los sitios activos, pero son mecánicamente frágiles; redes densas son estables pero dificultan la difusión interna. Los materiales con cinéticas más rápidas dentro de esta categoría —Hang et al. (2025), Zhang et al. (2024)— complementan la red covalente con porosidad macroscópica inducida por liofilización.

La criogelación produce la morfología más favorable para cinética rápida, generando poros macroscópicos $>50\text{--}100\ \mu\text{m}$ que minimizan la resistencia a la transferencia de masa. Takuya et al. (2025) reporta que el 95% del Cu^{2+} se adsorbe en los primeros 6 min a concentraciones ambientales —el tiempo de contacto más corto de toda la muestra. La reticulación covalente mediante EDC/NHS —utilizada por Hang et al. (2025) y Chen et al. (2024)— genera enlaces amida resistentes a la hidrólisis ácida, lo que explica la conservación del 97% de la capacidad tras cinco ciclos con HCl 1 M. El caso singular de Yang et al. (2021) —coacervación inducida por reducción de puentes disulfuro de BSA con TCEP, sin monómeros sintéticos ni calor— produce en menos de un minuto un material capaz de remover más de ocho metales simultáneamente a concentraciones de trazas, posicionándolo como el más prometedor para tratamiento de agua potable.

4.4 Caracterización: lo que revelan las técnicas cuando se interpretan en conjunto

La caracterización sigue una estructura piramidal: FTIR (35/35), SEM (33/35), TGA (18/35), XPS (15/35) y BET (7/35). El FTIR y el SEM son necesarios pero insuficientes para establecer el mecanismo de adsorción en sistemas multicomponente. La XPS solventa esta limitación al operar en el nivel de elemento y estado de oxidación: Sun et al. (2023) identificó que el Cu^{2+} se coordina específicamente con los grupos $-\text{NH}_2$ del quitosano y no con los $-\text{COO}^-$

del alginato, mientras que Galindo et al. (2025) confirmó que los grupos $-\text{SO}_3^-$ del VBS están directamente comprometidos en la coordinación con los tres metales evaluados. La ausencia de XPS en el 57% de los estudios limita la comprensión mecanística del campo.

El análisis BET, presente en solo 7/35 estudios, es el gran ausente. Sin área superficial, resulta imposible verificar que el Q_{max} derivado del modelo de Langmuir sea físicamente compatible con la estructura real del material. Mubark et al. (2022) es uno de los pocos que lo reporta ($\text{BET} = 61.9 \text{ m}^2/\text{g}$; $Q_{\text{max}} = 198.8 \text{ mg/g}$ para Cd(II) , equivalente a ~ 2.9 sitios/ nm^2), resultado coherente con una superficie funcionalizada. Esta verificación es imposible en los estudios sin BET, dejando sus Q_{max} como parámetros matemáticos sin anclaje estructural.

4.5 Comportamiento adsorptivo: análisis comparativo del desempeño por metal, condición y composición

Una advertencia metodológica es indispensable: los valores de Q_{max} de distintos estudios no son directamente comparables, pues dependen del pH, la temperatura, la concentración inicial, la dosis del adsorbente y el modelo de isoterma. Cualquier jerarquización basada exclusivamente en Q_{max} sin considerar estas condiciones es técnicamente cuestionable.

Para Pb(II) , el rango de Q_{max} entre los 18 estudios que lo evaluaron es de 45.3 a 843.9 mg/g. Los valores más altos se concentran en hidrogeles con alta densidad de grupos carboxilato libres y morfología porosa, coherente con la alta polarizabilidad del Pb^{2+} (radio iónico 1.19 Å) y su afinidad por complejos de esfera interna con $-\text{COO}^-$. Para Cu(II) , la dispersión de Q_{max} (21.4 a 442.8 mg/g) es mayor, indicando que la composición influye más que para Pb(II) . Un resultado contraintuitivo emerge del hidrogel PGA/PAMAM G3 de Chen et al. (2024): pese a ser el material con mayor densidad de grupos amino, su Q_{max} para Cu(II) es el más bajo de la muestra

(21.4 mg/g), mientras que para Zn(II) alcanza 212.3 mg/g; la explicación reside en que la cinética del Cu²⁺ en ese material está limitada por difusión intraparticular, no por termodinámica.

La influencia del pH es la variable experimental de mayor impacto: 26 de los 30 estudios que la evaluaron reportan un rango óptimo de 4.0 a 6.0, convergencia que refleja el pKa del PAA (4.2) y del quitosano (6.2). Las excepciones —Lv et al. (2025) a pH 2–3, Chen et al. (2024) a pH 7— obedecen a grupos funcionales con equilibrios ácido-base distintos y confirman que la selección del polímero base define estructuralmente el dominio de pH de operación del material.

4.6 Modelos cinéticos e isothermas: análisis crítico más allá del ajuste estadístico

La uniformidad estadística —PSO en 29/35 estudios, Langmuir en 27/35— entraña un riesgo de confort matemático: ambos modelos se ajustan por tradición del campo, no necesariamente porque sean los más adecuados para cada sistema. Tres casos críticos ilustran este punto. Galindo et al. (2025) sigue isoterma de Freundlich por la heterogeneidad energética introducida por los grupos sulfonato, amida y el grafeno; el Q_{max} reportado (631–633 mg/g) proviene de la extrapolación del parámetro K_f a concentraciones extremas, y su interpretación como capacidad de saturación es técnicamente incorrecta porque el modelo Freundlich no presupone saturación. Arafa et al. (2024) ajusta mejor al modelo cinético de Avrami, indicando un mecanismo fraccionario coherente con la coexistencia de sitios de zeolita y LDH con cinéticas distintas. Respecto al parámetro KL de Langmuir, varía en más de tres órdenes de magnitud para Cu(II) entre estudios, diferencia que refleja la energía libre de adsorción y que apenas tres estudios de la muestra discuten explícitamente.

4.7 Regeneración y reutilización: análisis comparativo de la viabilidad operativa

El HCl es el desorbente dominante (18/28 estudios con regeneración), pues su mecanismo —protonación de carboxilatos y grupos amino— revierte directamente el de adsorción. Sin embargo, la exposición repetida a $\text{pH} < 2$ fatiga el entrecruzamiento iónico Ca^{2+} y puede hidrolizar las bases de Schiff del glutaraldehído. Los materiales con entrecruzamiento covalente resistente (MBA, EDC/NHS) conservan $>96\%$ de la capacidad en los primeros ciclos, mientras que los sistemas con reticulación iónica caen al $\sim 73\%$ al quinto ciclo.

El EDTA supera al HCl en sistemas con grupos carboxilato dominantes: Mubark et al. (2022) reportó 97% de desorción para Cu(II) y 98% para Cd(II) frente al 85% y 82% del HCl 5 M. El mecanismo es termodinámicamente consistente dado que el EDTA forma complejos hexadentados con $\log K = 18.8$ y 16.5 para ambos metales. Notablemente, Yu et al. (2019) demostró que la regeneración con EDTA-4Na deja los grupos $-\text{COO}^-$ en forma sódica, incrementando la capacidad un 22.7% en el ciclo siguiente —efecto único en la muestra que convierte al protocolo de regeneración en herramienta de activación funcional. El caso más revelador de regeneración inadecuada es Hidayat et al. (2025): el HNO_3 0.1 M protona los $-\text{COOH}$ del PAA pero es insuficiente para descoordinar el Pb^{2+} de los grupos imidazol del VIm y de los grupos fenólicos del humato de sodio, acumulando metal residual bloqueante en cada ciclo, e ilustrando que en sistemas multicomponente con grupos funcionales de diferente pK_a un desorbente único de pH intermedio es inevitablemente ineficiente.

4.8 Limitaciones recurrentes y vacíos críticos: diagnóstico de madurez tecnológica

4.8.1 Vacíos metodológicos

La falta de estandarización experimental es la limitación más grave: el pH oscila entre 1 y 7 según el estudio, la concentración inicial entre 10 y 12 000 mg/L, y la dosis del adsorbente

entre 5 mg y varios gramos. En consecuencia, los Q_{\max} de diferentes estudios son inconmensurables sin normalización. La adopción de condiciones de referencia comunes —pH 5.0 ± 0.1 , $C_0 = 100$ mg/L, $T = 25^\circ\text{C}$, dosis 0.5 g/L, tiempo 24 h— permitiría construir rankings comparativos genuinos.

La ausencia de BET en el 80% de los estudios impide correlacionar área superficial con Q_{\max} . A esto se suma la omisión del modelo de difusión intrapartícula de Weber-Morris en la mayoría de estudios que reportan PSO: los cuatro estudios de la muestra que lo aplican identifican que la cinética está al menos parcialmente controlada por difusión en las etapas avanzadas, resultado que —si se generalizara— obligaría a rediseñar muchos materiales para aumentar la difusividad efectiva.

4.8.2 Vacíos de validación

El 86% de los estudios emplea soluciones sintéticas de sal metálica en agua ultrapura, sin materia orgánica, sin aniones competidores ni variación de conductividad. Los tres estudios que sí incorporaron matrices reales —Tang et al. (2025), Galindo et al. (2025) y Alsaka et al. (2025)— reportan reducciones de eficiencia del 10–30% por la competencia de iones mayoritarios, la interferencia de humatos y los efectos de turbidez sobre la cinética. Solo siete estudios evalúan adsorción competitiva en mezclas binarias y ninguno supera el sistema ternario; Arafá et al. (2024) cuantificó que la presencia de Cr^{3+} reduce la capacidad para Cd^{2+} en un 25–30%.

4.8.3 Vacíos de transferencia tecnológica

El 97% de los estudios opera en modo batch. El tránsito al modo continuo requiere caracterizar la curva de breakthrough, el número de volúmenes de lecho tratados y la estabilidad

mecánica bajo flujo sostenido; Chen et al. (2024) con SA/CNF evaluó parcialmente la columna de lecho fijo, pero sin la curva de breakthrough completa necesaria para el diseño real del proceso. Ningún estudio incluye análisis de costo de producción ni huella de carbono, lo que deja sin respaldo cuantitativo las afirmaciones de “bajo costo” frecuentes en la literatura, especialmente en materiales que emplean reactivos costosos como PAMAM de generaciones altas, EDC/NHS o grafeno de pocas capas.

4.9 Síntesis crítica integradora: estado del arte, brechas estructurales y perspectivas

Los 35 estudios configuran un campo en rápida maduración técnica pero con brechas de validación que aún impiden la transferencia tecnológica. La trayectoria 2019–2025 es inequívoca: se ha pasado del hidrogel quitosano-PAA como referencia a sistemas multicomponente con nanocargas funcionales, grupos quelantes selectivos y propiedades adicionales como separación magnética, fluorescencia o catálisis post-uso.

Cuatro tensiones estructurales limitan el impacto real del campo. Primera: complejidad composicional versus regenerabilidad —los sistemas más sofisticados presentan con frecuencia las regenerabilidades más bajas, como ilustra el β -CDMOF de Jia et al. (2024) cuyo Q_{\max} del 99% en el primer ciclo colapsa al 7.5% en el quinto por reducción irreversible del Au^{3+} a Au^0 . Segunda: optimización para un metal único frente a la realidad de efluentes con mezclas. Tercera: el pH óptimo de adsorción (4–6) frente al pH de efluentes industriales reales (1–4 en galvánica y drenaje ácido). Cuarta: la escala de laboratorio (10–100 mL, miligramos de adsorbente) frente a los requisitos mínimos de aplicación real (m^3/h de caudal, kilogramos de adsorbente por ciclo).

Los vectores de investigación más prometedores son tres. El primero es el diseño de materiales con grupos funcionales de alto pKa diferencial —como los hidroxámicos de Lv et al. (2025)— que permitan desorción selectiva por pH escalonado en efluentes ácidos. El segundo es la integración de geometrías de perlas o microesferas por microfluídica con composiciones de alta densidad funcional, para combinar cinética rápida, alta Q_{max} y operabilidad en columna. El tercer vector es la validación sistemática en matrices reales de complejidad creciente, acompañada de modelos de transferencia de masa que permitan el scale-up con base en primeros principios.

En síntesis, los hidrogeles adsorbentes analizados han demostrado capacidades que en el mejor caso (CS-g-PAA/CNW: 843.9 mg/g para Pb[II]) superan en uno a dos órdenes de magnitud al carbón activado convencional (20–100 mg/g). La condición para que ese margen técnico se traduzca en impacto real es que la investigación desplace su centro de gravedad desde la síntesis novedosa hacia la validación rigurosa en condiciones próximas a las de aplicación —la brecha más urgente que este análisis identifica en el campo.

5. Conclusiones

La revisión sistemática de 35 investigaciones publicadas entre 2019 y 2025 permite afirmar que el campo de los hidrogeles adsorbentes para la remoción de metales pesados ha experimentado una transformación cualitativa profunda, cuyo rasgo definitorio es la transición desde formulaciones monomateriales de desempeño moderado hacia sistemas híbridos multicomponente de alta funcionalidad. Los hidrogeles híbridos —que representan el 71% de la muestra— exhiben Q_{\max} significativamente superiores, con valores de hasta 843.9 mg/g para Pb^{2+} (Rodrigues et al., 2019) y 633.3 mg/g para Ni^{2+} (Galindo et al., 2025), frente a los 50–200 mg/g de formulaciones naturales sin modificar. Esta superioridad obedece a la confluencia sinérgica de múltiples mecanismos: complejación coordinada con carboxilatos y grupos amino, reconocimiento molecular por cavidades de inclusión, intercambio iónico fuerte mediante grupos sulfonato, y adsorción en sitios heterogéneos de alta energía aportados por nanomateriales carbonosos, arcillas laminares y oxihidróxidos de hierro.

Cuatro lógicas de diseño explican la diversidad composicional de la muestra. El injerto de PAA sobre biopolímeros con MBA (12/35 estudios) ofrece alta densidad funcional y buena estabilidad en ciclos ácidos, aunque con limitación estructural a $pH < 3.5$. La gelificación iónica del alginato con dopantes de la fase de nucleación amplía el Q_{\max} de 3 a 5 veces sin sacrificar la facilidad de síntesis. Los sistemas con dendrímeros PAMAM maximizan la densidad funcional pero presentan las regenerabilidades más bajas, evidenciando que la maximización de grupos activos no puede dissociarse del control de la cohesión estructural. Los materiales con grupos funcionales específicos —tiourea, sulfonato, hidroxámico— abren selectividades que los

sistemas convencionales no pueden alcanzar, con aplicaciones directas en la recuperación de metales críticos.

El tipo de entrecruzamiento es la variable de diseño con mayor impacto sobre la estabilidad a largo plazo. La reticulación covalente con MBA o EDC/NHS genera redes de alta resistencia química sin consumir los grupos funcionales adsorbentes, configurándose como la estrategia de mayor eficiencia global para múltiples ciclos de regeneración. El hidrogel γ -PGA/PEI/Laponite de Hang et al. (2025), con enlace amida EDC/NHS, conserva el 97% de su capacidad tras cinco ciclos con HCl 1 M. La reticulación iónica con Ca^{2+} , aunque operativamente simple, introduce vulnerabilidad ante quelantes, iones competidores y medios ácidos acumulable por ciclo.

El modelo PSO describe adecuadamente la cinética en 29 de los 35 estudios (82.9%), expresando un mecanismo dominante de quimisorción. No obstante, el ajuste estadístico no debe interpretarse automáticamente como evidencia de control por reacción química: los materiales con tiempo de equilibrio inferior a 60 min comparten morfología macroporosa que minimiza la resistencia a la difusión intrapartícula, lo que indica que la optimización de la cinética requiere rediseñar la morfología del hidrogel, no solo su composición. La isoterma de Langmuir predomina en 27/35 estudios, con factores de separación RL consistentemente favorables ($0 < \text{RL} < 1$), aunque el parámetro KL varía en más de tres órdenes de magnitud para Cu(II), diferencia raramente discutida que refleja energías libres de adsorción sustancialmente distintas entre sistemas.

El pH se consolida como la variable experimental de mayor influencia, con rango óptimo predominante entre 4 y 6, convergencia directamente ligada al pKa del PAA y el quitosano. Esta

restricción constituye una limitación estructural relevante para efluentes ácidos reales (pH 1–4), escenario en el que los grupos funcionales de alto pKa —como los hidroxámicos de Lv et al. (2025)— representan la alternativa más prometedora.

La regenerabilidad depende más del tipo de entrecruzamiento y de la compatibilidad entre el desorbente y los grupos funcionales que del Q_{max} inicial. El HCl diluido es el agente desorbente dominante, aunque el EDTA ofrece ventajas termodinámicas superiores en sistemas con carboxilatos dominantes (Mubark et al., 2022: 97–98% de desorción). El caso de Hidayat et al. (2025), con caída del 30–48% desde el primer ciclo usando HNO_3 0.1 M, confirma que en sistemas multicomponente con grupos funcionales de diferente pKa un desorbente único de pH intermedio es estructuralmente ineficiente.

El análisis comparativo revela una brecha estructural entre el conocimiento generado en condiciones ideales y los requerimientos industriales. La evaluación casi exclusiva en soluciones sintéticas monocomponente (91% de estudios) sobreestima el desempeño real: los pocos estudios en matrices reales reportan reducciones del 10–30% por interferencia iónica. La ausencia de evaluaciones multimetálicas competitivas, de estudios en columna con curvas de breakthrough completas, y de análisis de costos y ciclo de vida constituyen los vacíos más críticos para la ingeniería de proceso.

Los Q_{max} de los sistemas más eficientes superan en uno a dos órdenes de magnitud al carbón activado convencional, posicionando a los hidrogeles híbridos como alternativas tecnológicamente competitivas. Para que esa ventaja se materialice, se recomienda que futuras investigaciones prioricen: la adopción de condiciones de referencia estandarizadas (pH 5.0, $C_0 = 100$ mg/L, $T = 25^\circ\text{C}$, dosis 0.5 g/L) para comparación sistemática entre laboratorios; la

evaluación en matrices reales multimetálicas como estándar mínimo de validación aplicada; el diseño de estudios en columna de lecho fijo con modelos de Thomas o Adams-Bohart para el scale-up; el análisis de ciclo de vida completo; la síntesis a partir de biomasa residual alineada con la economía circular; y la exploración de hidrogeles con grupos funcionales de alto pKa diferencial para efluentes ácidos y recuperación de metales críticos. La integración de hidrogeles en sistemas combinados con membranas, fotocatalisis o intercambio iónico configura la dirección estratégica más prometedora hacia soluciones de tratamiento de aguas de mayor eficiencia y sostenibilidad.

Referencias bibliograficas

- Alam, M. M., Bhuyian, M. A. H., & Hossain, M. S. (2023). Heavy metals – Definition, natural and anthropogenic sources, toxicity and remediation approaches. *Journal of Ecological Engineering*, 24(6), 249–271. <https://doi.org/10.12911/22998993/162955>
- Alsaka, L., Mezai, A., & Bouhicha, M. (2025). Kappa-carrageenan-based hydrogel for leachate wastewater treatment and heavy metal removal. *Desalination*, 565, 116826. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.116826>
- Ali, A., Hira, Z., & Khan, M. A. (2023). Chitosan-based hydrogel system for efficient removal of Cu(II) and organic dyes. *International Journal of Biological Macromolecules*, 247, 125805. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125805>
- Aziz, K. H. H., Kareem, R., Faisal, A. A. H., & Mustafa, F. S. (2023). Heavy metal removal from aqueous solutions using various hydrogel-based adsorbents: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3), 109889. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109889>
- Aziz, K. H. H., Mustafa, F. S., Omer, K. M., Hama, S., Hamarawf, R. F., & Rahman, K. O. (2023). Heavy metal pollution in the aquatic environment: Efficient and low-cost removal approaches to eliminate their toxicity: A review. *RSC Advances*, 13, 17595–17610. <https://doi.org/10.1039/D3RA00723E>
- Barbosa, C. H., Cunha, M. G., & Lima, A. L. (2024). Chitosan hydrogels crosslinked with glutaraldehyde for heavy metal removal from aqueous solution. *Carbohydrate Polymers*, 330, 121250. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121250>

- Chen, B., Zhao, Y., Zhao, H., Zhou, X., & Liu, X. (2024). Porous sodium alginate-cellulose nanofiber composite hydrogel beads for efficient removal of Pb^{2+} , Cu^{2+} and Cd^{2+} from water. *Chemical Engineering Journal*, 485, 150020. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150020>
- Darban, Z., Shahabuddin, S., Gaur, R., Ahmad, I., & Sridewi, N. (2022). Hydrogel-based adsorbent material for the effective removal of heavy metals from wastewater: A comprehensive review. *Gels*, 8(5), 263. <https://doi.org/10.3390/gels8050263>
- Galindo, J. M., Martínez, R., & Pedraza, H. (2025). Few-layer graphene-hybrid sulfonate hydrogels for high-efficient removal of heavy metals from wastewater. *Separation and Purification Technology*, 355, 129600. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129600>
- Ghiorghita, C. A., Dinu, M. V., & Dragan, E. S. (2020). Thiourea-grafted chitosan porous hydrogels for selective removal of heavy metal ions. *Reactive and Functional Polymers*, 151, 104599. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104599>
- Hang, J., Liu, Q., & Wang, H. (2025). Development of a novel nanoclay-doped hydrogel adsorbent for Cu^{2+} removal from aqueous solutions. *Gels*, 11, 287. <https://doi.org/10.3390/gels11040287>
- Alraddadi, H. M., Fagieh, T. M., Bakhsh, E. M., Akhtar, K., Khan, S. B., Khan, S. A., & Bahaidarah, E. M. (2023). Adsorptive removal of heavy metals and organic dyes by sodium alginate/coffee waste composite hydrogel. *International Journal of Biological Macromolecules*, 247, 125708. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125708>

- Huang, L., Zhang, Y., & Chen, W. (2025). Magnetic Laponite-PAM-AA composite hydrogels doped with nano- β -FeOOH for efficient heavy metal removal. *Journal of Hazardous Materials*, 462, 132750. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.132750>
- Jia, J., Zhu, J., Guo, L., Yu, J., Li, J., & Li, F. (2024). Synthesis and characterization of a β -cyclodextrin-MOF-based porous hydrogel for efficient adsorption of Au^{3+} , Ag^+ , and Pb^{2+} ions. *Separation and Purification Technology*, 348, 127664. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127664>
- Jiang, X., Li, Y., & Zhao, M. (2020). Lignosulfonate-lysine hydrogel for simultaneous removal of Cu(II) and Co(II) from wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 398, 122967. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122967>
- Kushwaha, J., & Singh, R. (2023). Cellulose hydrogel and its derivatives: A review of application in heavy metal adsorption. *Inorganic Chemistry Communications*, 152, 110721. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110721>
- Lv, Z., Chen, X., & Wang, J. (2025). Hydroxamic acid-functionalized chitosan hydrogel beads for sustainable removal of gallium(III) from wastewater. *International Journal of Biological Macromolecules*, 322, 146869. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.146869>
- Mohammadzadeh Pakdel, P., Peighambaroust, S. J., Foroutan, R., & Peighambaroust, S. H. (2022). Carboxymethyl cellulose-based superabsorbent hydrogels reinforced with montmorillonite for heavy metal ion adsorption from aqueous solutions. *Cellulose*, 29(8), 4531–4553. <https://doi.org/10.1007/s10570-022-04578-3>

- Nasr, R., Ahmed, M., & El-Sayed, A. (2025). Recyclable hydrogel beads from sodium alginate-cellulose-graphene oxide for heavy metal removal. *Environmental Science and Pollution Research*, 32, 19929–19944. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35129-1>
- Oladimeji, T. E., Oyedemi, M., Emetere, M. E., Agboola, O., Adeoye, J. B., & Odunlami, O. A. (2024). Review on the impact of heavy metals from industrial wastewater effluent and removal technologies. *Heliyon*, 10, e40370. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40370>
- Rodrigues, F. H. A., Spagnol, C., Pereira, A. G. B., Martins, A. F., Fajardo, A. R., & Muniz, E. C. (2019). Nanocellulose/poly(acrylic acid) composite hydrogels for heavy metal ion removal: Synthesis, characterization and adsorption studies. *Chemical Engineering Research and Design*, 147, 334–349. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.05.018>
- Saravanan, P., Saravanan, V., Rajeshkannan, R., Arnica, G., Rajasimman, M., Baskar, G., & Pugazhendhi, A. (2024). Comprehensive review on toxic heavy metals in the aquatic system: Sources, identification, treatment strategies, and health risk assessment. *Environmental Research*, 258, 119440. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119440>
- Sesia, C., Barrientos, E., & Díaz, M. (2022). UV-cured chitosan-based hydrogels strengthened by tannic acid for heavy metal removal. *Carbohydrate Polymers*, 290, 119470. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119470>
- Shang, H., Liu, J., & Chen, X. (2023). Preparation and adsorption study of polyvinyl alcohol-functionalized sodium carboxymethyl cellulose hydrogel for Pb(II) removal. *Desalination and Water Treatment*, 313, 162–172. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29200>

- Sharma, R., Kumar, A., & Singh, V. (2021). A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives. *Journal of Hazardous Materials*, 418, 126026. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126026>
- Singh, R., Kumar, N., Mehrotra, T., Bisaria, K., & Sinha, S. (2024). Hydrogel-based adsorbents for heavy metal removal from wastewater: A review of recent advances and future perspectives. *Journal of Water Process Engineering*, 58, 104792. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104792>
- Takuya, O., Suzuki, K., & Tanaka, H. (2025). Chitosan sponge hydrogel with macroporous structure for rapid removal of Cu(II) from aqueous solutions. *Carbohydrate Polymers*, 348, 122890. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122890>
- Tang, W., Zhou, M., & Liu, R. (2025). Waste biomass-based sodium lignosulfonate-chitosan-polyvinyl alcohol hydrogel for heavy metal removal. *Separation and Purification Technology*, 358, 130200. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130200>
- Vardhan, K. H., Kumar, P. S., & Panda, R. C. (2019). A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives. *Journal of Molecular Liquids*, 290, 111197. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111197>
- Yang, F., Yang, Q., Chen, M., He, C., & Yang, P. (2021). Toxic metal ion sequestration by amyloid-mediated fast coacervation. *Cell Reports Physical Science*, 2(3), 100379. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100379>

- Yin, X., Ke, T., Zhu, H., Xu, P., & Wang, H. (2023). Efficient removal of heavy metals from aqueous solution using licorice residue-based hydrogel adsorbent. *Gels*, 9(7), 559. <https://doi.org/10.3390/gels9070559>
- Younis, S. A., Kim, K. H., & Lee, J. (2025). Lotus carbon dots-doped sodium alginate hydrogel beads for effective removal of heavy metals. *Journal of Hazardous Materials*, 468, 133745. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133745>
- Yu, S., Wang, X., & Chen, Z. (2019). Chitosan/attapulgitite/polyacrylic acid composite hydrogel synthesized by plasma for Pb(II) removal from aqueous solution. *Chemical Engineering Journal*, 359, 1527–1536. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.016>
- Zhang, H., Yang, X., Zhang, X., Liu, W., Fan, M., & Wang, L. (2024). Functionalized cyclodextrin/carboxymethyl cellulose composite hydrogel with double network structure for adsorption of heavy metal ions in wastewater. *Molecules*, 29(22), 5414. <https://doi.org/10.3390/molecules29225414>
- Zhang, W., Ou, J., Wang, B., Wang, H., He, Q., & Song, J. (2021). Construction of a porous GO@PAN-PPy/SA nanocomposite hydrogel for simultaneous removal of Cr(VI) and Cu(II) from wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 418, 126358. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126358>
- Zhang, Y., Chen, S., & Liu, X. (2022). Cu(II) adsorption from aqueous solution onto poly(acrylic acid/chestnut shell pigment) hydrogel. *Water*, 14, 3500. <https://doi.org/10.3390/w14213500>

- Zhao, C., Liu, G., Tan, Q., Gao, M., Chen, G., Huang, X., & Wang, L. (2022). Polysaccharide-based biopolymer hydrogels for heavy metal detection and adsorption. *Journal of Advanced Research*, 44, 53–70. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2022.04.005>
- Wang, Z., Li, M., & Zhang, J. (2021). Low-cost hydrogel adsorbent enhanced by trihydroxy melamine and β -cyclodextrin for Pb^{2+} and Ni^{2+} removal. *Chemical Engineering Journal*, 423, 130205. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130205>
- Arafa, E. G., Mahmoud, R., & Mohamed, R. R. (2024). Design, preparation, and performance of different adsorbents based on carboxymethyl chitosan/sodium alginate hydrogel beads for selective adsorption of Cadmium (II) and Chromium (III) metal ions. *Environmental Research*, 262, 119878. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119878>
- Hidayat Muhammad Rapaiee, H., Julaihi, D., Nordin, M. I. A., Liew, F. K., Sim, S. F., & Tan, C. S. Y. (2025). Sodium humate-functionalised superabsorbent hydrogels for heavy metals and organic dyes remediation in aqueous systems. *Inorganic Chemistry Communications*, 180, 115013. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.115013>
- Mubark, A. E., Hakem, H. A., Zaki, E. G., Elsaed, S. M., & Abdel-Rahman, A. A.-H. (2022). Sequestration of Cd(II) and Cu(II) ions using bio-based hydrogel: a study on the adsorption isotherms and kinetics. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 10877–10892. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03857-3>