



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

ÁREA ACADÉMICA DE QUÍMICA

LICENCIATURA EN QUÍMICA

TESIS

**ELIMINACIÓN DE PLOMO PRESENTE EN SISTEMAS
ACUOSOS EMPLEANDO UN HIDROGEL COMPOSITE
DE ACRILAMIDA MODIFICADO CON PARTICULAS DE
ALUMINIO**

Para obtener el título de
Licenciada en Química

PRESENTA

Gloria Lopez Flores

DIRECTORA

Dra. Irma Pérez Silva



Mineral de la Reforma, Hgo., a 19 de febrero de 2026

Número de control: ICBI-D/270/2026
 Asunto: Autorización de impresión.

**MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
 DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH**

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado a la egresada de la Licenciatura en Química **Gloria Lopez Flores**, quien presenta el trabajo de titulación **“Eliminación de plomo presente en sistemas acuosos empleando un hidrogel composite de acrilamida modificado con partículas de aluminio”**, ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Dra. María Elena Páez Hernández

Secretario: Dra. Rosa Luz Camacho Mendoza

Vocal: Dra. Irma Pérez Silva

Suplente: Dr. Israel Samuel Ibarra Ortega

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
 “Amor, Orden y Progreso”

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
 Director de ICBI



GVR/MMM

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
 Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
 direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergarar@uaeh.edu.mx

“Amor, Orden y Progreso”



Parte de este trabajo se presentó en:

- XXXVI Congreso Nacional de Química Analítica y XXVI Simposio Estudiantil desarrollado en la Universidad Autónoma del Estado México celebrado del 12 al 16 de agosto de 2024.
- XXXVII Congreso Nacional de Química Analítica y XXVII Simposio Estudiantil desarrollado en la Universidad Autónoma de Tlaxcala, celebrado del 22 al 26 de septiembre de 2025.



EN MEMORIA DE:

SILVIANO FLORES

Mi abuelito, quien se adelantó en el camino cuando estuve a punto de terminar, pero desde el cielo, fue esa luz que me daba las fuerzas para continuar.

Gracias por haber creído tanto en mí, por tu ternura, tus consejos y por enseñarme que el amor también se transmite en acciones silenciosas.

Ojalá pudieras ver hasta donde llegué, sé que estarías muy orgulloso de que tu “tlacoyito” ya es química.

Esta meta también es tuya.

Agradecimientos

Desde el fondo de mi corazón, agradezco a mi asesora, la Dra. Irma Pérez Silva, quien, desde mis primeros acercamientos a la química analítica, hasta la escritura de este trabajo, nunca me soltó. Gracias por su dedicación y por su paciencia infinita. Su dirección académica, llena de sabiduría, su inteligencia y sus consejos han sido fundamentales para dar forma no solo a esta investigación, sino también a mi crecimiento como investigadora. No tengo las palabras suficientes para expresar cuanto valoro su apoyo, su escucha y su guía a lo largo de este viaje. Ha sido un privilegio y un honor aprender bajo su tutela.

De igual manera agradezco a mi profesora, la Dra. María Elena Páez Hernández quien me mostró que a veces el tropiezo es el inicio del verdadero aprendizaje. Me hizo ver que podía dar más. Gracias por exigirme, incluso cuando yo no sabía de cuanto era capaz.

Agradezco también a la Dra. Rosa Luz Camacho Mendoza y al Dr. Israel Ibarra Ortega por el apoyo su tiempo, dedicación y valiosos comentarios que mejoraron este trabajo.

Dedicatoria

Sin ninguna duda, esta etapa de mi vida fue la mejor y una de las más importantes para mí, es por eso que quiero dedicar este logro a las personas que más quiero y que a lo largo de este camino estuvieron alentándome siempre.

A mis padres. Principalmente a mi mamá, gracias por ser mi refugio incluso cuando yo no sabía pedir ayuda. Por estar siempre, sin condiciones, escuchando cada llanto que nacía del miedo de no poder, de no ser suficiente o de sentir que todo me rebasaba. Gracias por creer en mí aun en los días en los que yo misma dudaba, por alentarme cuando quise rendirme y por celebrar cada uno de mis logros como si fueran tuyos. Gracias por cada sacrificio hecho en silencio. Este logro también es tuyo, porque sin tu amor, tu paciencia y tu fuerza, yo no estaría aquí. Todo lo que soy y todo lo que he logrado lleva un pedacito de ti.

A mi familia, mi hermano Kike, quien me enseñó a ser una hermana mayor y con quien he compartido gran parte de mi vida. A mi tía Araceli y mi prima Karina, quienes siempre me decían que podía con todo, quienes me vieron llorar muchas veces por la presión que sentía y estuvieron conmigo cuando tropecé. Gracias infinitas.

A la familia que elegí durante mi estancia en la universidad, mis mejores amigas: Abril y Mary. Gracias por sostenerme cuando sentía que todo se desmoronaba, por defenderme a cada momento con lealtad sin importar cual fuese la circunstancia. Gracias por cada risa que nos devolvió el aire en los días más pesados y por cada lágrima compartida cuando el cansancio, el miedo o la incertidumbre parecían ganar. Ustedes fueron un refugio cuando el mundo pesaba, fuerza cuando ya no podía y sobre todo un hogar en medio del caos. Su apoyo incondicional marcó profundamente no solo esta etapa, si no mi vida. Más que mis amigas, fueron certeza, compañía y amor sincero. Llevo por siempre su amistad como uno de los regalos más grandes que me dejó la universidad. Espero que jamás duden del cariño y profunda admiración que les tengo. Deseo de corazón que la vida nos siga encontrando juntas, viéndonos crecer y cumplir cada uno de nuestros sueños.

A mis mejores amigos: Diego y Juanjo, sin ustedes la universidad hubiese sido muy aburrida, gracias por siempre hacerme reír con sus ocurrencias y chistes. Pero sobre todo a mi mejor amigo Iván Noguez, por todas las veces que me oíste quejándome de la carrera o la vida en general, por las veces que me abrazaste cuando más lo necesité y por los regaños que eran necesarios. Gracias por hacerme ver que siempre iba a poder más. Por no hacerme sentir pequeña y por siempre

compartir tu inteligencia con nosotros. Gracias infinitas por acompañarme en esta etapa tan importante.

A mi mejor amiga Hada, se siente como si hubiese sido ayer que nos conocimos y han pasado 10 años. Gracias por estar conmigo cuando te necesité, por escucharme y siempre preocuparte por mí en cada momento. La vida ha cambiado muchas veces, pero tu presencia ha sido una constante que me sostuvo cuando todo parecía moverse. Llevarte conmigo en esta etapa y en cada una de las que vendrán es uno de los regalos más grandes que me ha dado la vida.

A Sergio, mi amor y mi compañero de aventuras. Por caminar a mi lado en los momentos en los que ni yo sabía a donde iba. Gracias por estar, por sostenerme en silencio y celebrar mis logros como si fueran tuyos. Gracias por escuchar mis quejas académicas, sobrevivir a mis desvelos, y seguir creyendo en mí incluso cuando yo solo quería dormir una semana entera. Tu amor me acompañó en cada paso y tu presencia en mi vida hizo este camino más llevadero. Tu apoyo, tu amor y tu paciencia fue un refugio en medio del caos. Me siento profundamente agradecida de poder compartir este pedacito de mi vida junto a ti.

A los amigos que se fueron uniendo en el camino: Zyan, Chris, Sebas, Gio. Seguramente no lo saben, pero me salvaron la vida más de una vez, haber coincidido con ustedes es una de las cosas por las que estoy más agradecida en la vida. Gracias por hacerme reír, las pláticas serias e incluso la ayuda académica que me han brindado. Los quiero mucho.

A Alex, uno de los amigos más leales que existen. Sobran las palabras para agradecerte todo lo que has hecho por mí: por no dejarme sola, por sostenerme incluso cuando me equivoqué y por ayudarme a ver con claridad cuando fue necesario. Gracias por creer en mí cuando otros dudaron, por mantenerte firme y por recordarme que no todo el mundo se queda, pero quien lo hace, lo hace de verdad. Tu apoyo fue constante, tu presencia fue refugio y tu amistad, una prueba de carácter. Cuenta siempre conmigo. No todos supieron quedarse; nosotros sí.

Finalmente, deseo dedicar este logro a mi familia de Grupo AREA, quienes me abrieron las puertas a una de mis más grandes pasiones: la docencia. Coincidir en este espacio no solo fortaleció mi formación profesional, sino que también me transformó como persona. Gracias a Ely, Fer, Ephra, Alex, Hugo, Rodri, Fabio, Yalo, Gore, Kay y Daniel por su compañerismo, apoyo y calidez.

De manera muy especial, gracias al Profe Juan Carlos, a Miss Lau y, sobre todo, a Miss Yolita, cuyas enseñanzas, guía y confianza han sido regalos que atesoraré por siempre. En más de una ocasión, una conversación, una risa compartida o simplemente verlos fue todo lo que necesité para recuperar fuerzas y continuar. Gracias por creer en mí, por impulsarme y por hacer de este espacio un lugar de crecimiento, aprendizaje y hogar.

ÍNDICE

Introducción.....	1
1. Antecedentes.....	3
1.1 Generalidades del plomo	3
1.2 Técnicas de eliminación de plomo	4
1.2.1 Separación Química	4
1.2.2 Extracción	7
1.2.3 Resinas intercambio ionico	7
1.2.4 Membranas.....	8
1.2.5 Adsorción.....	8
1.3 Hidrogeles.....	9
1.4 Clasificación de los hidrogeles.....	10
1.5 Hidrogeles compuestos o composite	12
1.6 Métodos de síntesis de los hidrogeles composite	14
1.6.1 Polimerización a granel.....	14
1.6.2. Polimerización en solución	15
1.6.3 Polimerización por injerto.....	16
1.6.4 Polimerización por radiación.....	17
1.6.5 Polimerización por radicales libres.....	18
1.6.6 Incrustación de partículas	19
1.7 Aplicaciones de los hidrogeles composite.....	21
2. Objetivos	25
2.1 Objetivo General	25
2.2 Objetivos específicos	25
3. Metodología.....	27
3.1 Síntesis del hidrogel composite.....	27
3.1.1 Etapa 1: Síntesis de las partículas de aluminio (pAl)	27
3.1.2 Etapa 2: Elaboración del hidrogel composite.....	28
3.2 Caracterización del hidrogel composite	29

3.2.1 Análisis morfológico	29
3.2.2 Análisis de Infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR)	29
3.2.3 Grado de hinchamiento.....	30
3.3 Evaluación del hidrogel para la adsorción de plomo	30
3.4 Evaluación en una matriz compleja (agua sintética)	32
4. Resultados	34
4.1 Caracterización del hidrogel composite	34
4.1.1 Análisis mediante microscopía óptica.	34
4.1.2 Análisis mediante espectroscopía infrarroja	35
4.1.3 Evaluación del grado de hinchamiento	36
4.2 Evaluación del hidrogel para la adsorción de plomo	37
4.2.1 Efecto de la concentración de aluminio en el hidrogel composite.....	37
4.2.2 Efecto de la masa del hidrogel.....	38
4.2.3 Efecto del pH de la solución de plomo en su adsorción por HC	39
4.2.4 Efecto de la concentración de plomo en el sistema	41
4.2.5 Modelado cinético de adsorción	45
4.3 Muestra sintética	48
5. Conclusiones.....	51
6. Referencias	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Principales características del plomo	3
Tabla 2.	Usos de diversos hidrogeles composite para la remoción de especies metálicas	22
Tabla 3.	Ecuaciones no linealizadas de los modelos de isothermas Langmuir, Freundlich, Sips y Dubinin-Radushkevich	31
Tabla 4.	Ecuaciones linealizadas de los modelos cinéticos de pseudo primer orden y pseudo segundo orden	32
Tabla 5.	Efecto de la masa del HC en el proceso de eliminación de Pb(II). Condiciones experimentales: 5 mg/L Pb (II), pH= 7, tiempo de contacto 2 h, HC con 4 % ^{m/v} de pAl en la solución casting	39
Tabla 6.	Efecto del pH en el proceso de adsorción. Condiciones experimentales: 0.1 g de HC con 4 % ^{m/v} de pAl en la solución casting, 5 ^{mg} /L Pb(II), tiempo de contacto 2 h	40
Tabla 7.	Análisis del tiempo en que la eliminación llega al equilibrio. Condiciones experimentales: 0.1 g de HC con 4 % ^{m/v} de pAl en la solución casting, 5 ^{mg} /L Pb (II), pH= 7	42
Tabla 8.	Capacidades de adsorción de plomo de diversos adsorbentes	44
Tabla 9.	Constantes de las diferentes isothermas de adsorción (Langmuir, Freundlich, Sips y Dubinin Radushkevich) del proceso de adsorción de Pb(II) empleando el HC	45
Tabla 10.	Parámetros cinéticos del proceso de adsorción de Pb(II) empleando el HC	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Precipitación química	5
Figura 2.	Representación esquemática del proceso convencional de coagulación, floculación y sedimentación	6
Figura 3.	Representación esquemática del proceso de flotación	7
Figura 4.	Clasificación de los hidrogeles en función de sus propiedades ..	10
Figura 5.	Polimerización a granel.....	15
Figura 6.	Polimerización en solución	16
Figura 7.	Polimerización por injerto	17
Figura 8.	Polimerización por radiación	18
Figura 9.	Polimerización por radicales libres	19
Figura 10.	Incrustación de nanopartículas	20
Figura 11.	Síntesis de las partículas de aluminio (pAl)	28
Figura 12.	Síntesis de hidrogel composite (HC)	29
Figura 13.	Morfología del hidrogel compuesto a) hidrogel de acrilamida y N,N'-metilenbisacrilamida (HB), b) hidrogel modificado con pAl incrustadas (HC), c) microfotografía HB, d) microfotografía HC...	34
Figura 14.	Espectro de infrarrojo de a) pAl, b) HB y c) HC	36
Figura 15.	Grado de hinchamiento del HC después de 14 días	37
Figura 16.	Porcentaje de eliminación de plomo frente a la concentración de pAl en la solución casting del HC. Condiciones experimentales: 5 mg/L Pb (II), pH= 7, tiempo de contacto 2 h, masa de HC = 0.1 g.	38
Figura 17.	Determinación del punto de carga cero del HC con 4 % ^{m/v} de pAl en la solución casting	40
Figura 18.	Diagrama de distribución de especies pPb frente a pH	41

Figura 19.	Isoterma de adsorción del Pb (II) en el HC. Condiciones experimentales: 0.1 g de HC 4 % ^m / _v de pAl en la solución casting, 3-1000 mg/L Pb (II), tiempo de contacto 1h, pH= 7	42
Figura 20.	Modelo IPD del proceso de adsorción de Pb (II) empleando el HC. Condiciones experimentales: 0.1 g de HC, pH= 7, tiempo de contacto 1h.....	48

Introducción

El plomo es un metal pesado capaz de ocasionar graves problemas a la salud, como daños neurológicos, renales, reproductivos e incluso anemia, y en casos muy extremos ocasionar la muerte (Alraddadi et al., 2023).

Dentro de sus características principales se encuentran la persistencia, bioacumulación, biotransformación y alta toxicidad. Lo anterior provoca que se encuentren en los ecosistemas por largos periodos de tiempo ya que su degradación natural es imposible.

Debido a su uso excesivo en diversas prácticas industriales y domésticas son considerados un problema actual y un desafío ambiental, por lo que su eliminación se ha hecho indispensable. (Rodríguez, 2017).

Entre los procesos que se tienen para la eliminación de plomo, la adsorción emerge como una opción ampliamente utilizada debido a su versatilidad. La adsorción es un proceso superficial que implica la transferencia de moléculas de un fluido a una superficie sólida; su aplicación en la cuantificación de metales pesados ofrece diferentes ventajas como simplicidad operativa, bajo costo y capacidad de tratamiento a escala industrial (Alaqarbeh, 2021).

Dentro de los adsorbentes que se han desarrollado en los últimos años se encuentran los hidrogeles composite (HC) los cuales se forman mezclando polímeros de origen natural o sintético con la finalidad de proporcionarles una mayor estabilidad y un aumento en su capacidad de adsorción lo que los convierte en una alternativa prometedora para la adsorción de diversas especies químicas en medios acuosos (Maji y Lee, 2022).

En este contexto, en el presente trabajo se sintetizó mediante polimerización de radicales libres un HC de acrilamida como monómero, N,N'-metilenbisacrilamida como agente entrecruzante y partículas de aluminio que permita la eliminación de plomo en medios acuosos.



1

ANTECEDENTES

1. Antecedentes

1.1 Generalidades del plomo

En particular, el plomo (Pb) es un metal pesado cuya densidad, peso atómico o número atómico es relativamente alto (Pourret et al., 2021), se encuentra ampliamente distribuido en la corteza terrestre, y, aunque raramente se encuentra en su forma metálica natural, se puede encontrar como parte de minerales como la galena (PbS), anglesita (PbSO₄) y cerusita (PbCO₃) (ATSDR, 2007). Dentro de las fuentes comunes de contaminación por plomo se encuentran los residuos de la industria metalúrgica, minera y en la fabricación de baterías, pinturas, esmaltes, tuberías y residuos electrónicos (World Health Organization, 2024).

El plomo es de color gris azulado, maleable, poco reactivo y posee una temperatura de fusión baja (327.5 °C), algunas de sus principales características se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales características del plomo (World Health Organization, 2024)

Propiedad	Característica
Densidad	Alta (11.34 g/cm ³)
Conductividad eléctrica	Baja en comparación con otros metales
Toxicidad	Elevada (incluso en concentraciones bajas, alrededor de 40 µg/dL)
Bioacumulación	Especialmente en huesos, riñones y cerebro
Persistencia	No se degrada fácilmente en el ambiente

Debido a estas características, la exposición crónica al plomo puede ocasionar diversos problemas a la salud como daños al sistema nervioso (especialmente en niños), anemia por interferencia con la síntesis de hemoglobina, disfunciones

renales y hepatotóxicas y alteraciones en el sistema reproductivo (World Health Organization, 2025).

Lo anterior ha obligado a implementar diversas técnicas que permitan su eliminación; algunas de estas se describen a continuación

1.2 Técnicas de eliminación de plomo

1.2.1 Separación Química

La separación química consiste en añadir productos químicos a los efluentes con la finalidad de eliminar el analito de interés. Dentro de estas tenemos:

Precipitación

La precipitación se emplea en la industria debido a su fácil implementación y control. Para que esta técnica se pueda llevar a cabo se adicionan productos químicos como hidróxidos o carbonatos con la finalidad de obtener las especies insolubles (hidroxocomplejos de plomo o carbonato de plomo) (Figura 1). Una vez obtenido el precipitado, se separan por filtración o sedimentación (Benalia et al., 2021).

Dentro de las principales desventajas que presenta la precipitación química es la utilización de grandes cantidades de productos químicos lo cual la convierte en una técnica costosa y con una elevada generación de residuos, al mismo tiempo que los precipitados generados poseen una baja estabilidad (Şenol & Arslanoğlu, 2024).

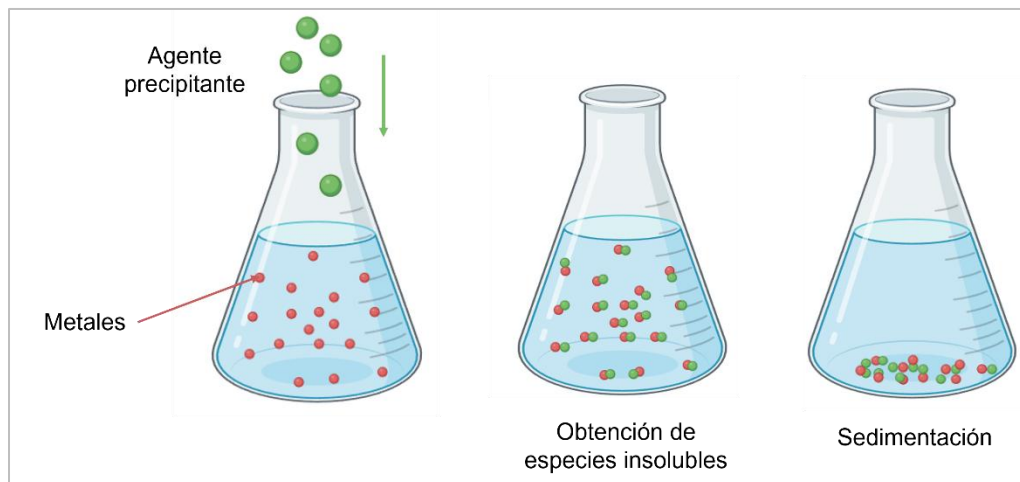


Figura 1. Precipitación química (Bernalia et al., 2021).

Coagulación y floculación

Es una técnica que tiene como objetivo remover sólidos suspendidos, partículas coloidales y contaminantes, incluidos metales pesados. La coagulación consiste en añadir un coagulante como el sulfato ferroso o el cloruro férrico que desestabilice las partículas coloidales o suspendidas. Estas partículas suelen aportar cargas eléctricas que las mantienen en dispersión y al ser neutralizadas se reduce la repulsión electrostática y las partículas pueden acercarse.

Por otro lado, la floculación es la aglomeración de partículas desestabilizadas mediante la adición de diversas especies químicas como el cloruro de polialumino (PAC), sulfato poliférrico (PFS) o la poliacrilamida (PAM) para formar flóculos con suficiente tamaño y peso con la finalidad de sedimentarlos y ser filtrados o separados por otros métodos (Lucas et al., 2025).

La Figura 2 muestra de manera esquemática las etapas del proceso de coagulación, floculación y sedimentación, el cual se presenta como un método de referencia para la remoción de metales en sistemas acuosos.

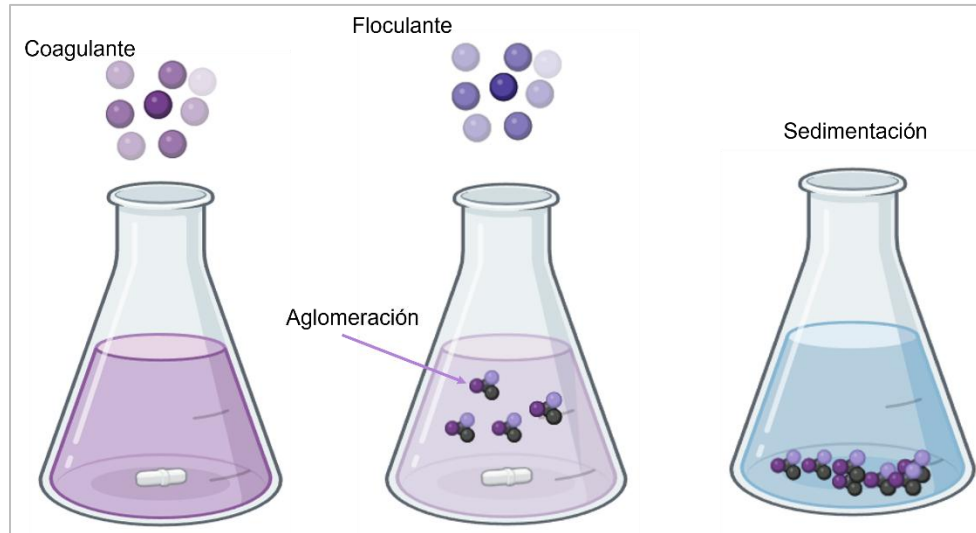


Figura 2. Representación esquemática del proceso convencional de coagulación, floculación y sedimentación (Lucas et al., 2025).

Flotación

La flotación es un proceso de separación basado en la introducción de burbujas de gas como medio de transporte. La materia suspendida, al ser hidrofoba o condicionada a serlo, se adhiere a las burbujas y se mueve hacia la superficie en contra de la dirección de la gravedad (Kyzas & Matis, 2018).

Dependiendo de la técnica, se puede realizar de diversas formas: flotación de iones (cuando los iones metálicos se hacen hidrofóbicos mediante surfactantes), flotación por aire disuelto (burbujas pequeñas de aire) o flotación por precipitación (primero precipitación química, luego flotación de partículas) (Qasem et al., 2021).

En la Figura 3 se ilustra de manera general el principio del proceso de flotación, el cual constituye una de las técnicas empleadas para la separación de metales en sistemas acuosos mediante la adhesión de especies hidrofóbicas a burbujas de gas.

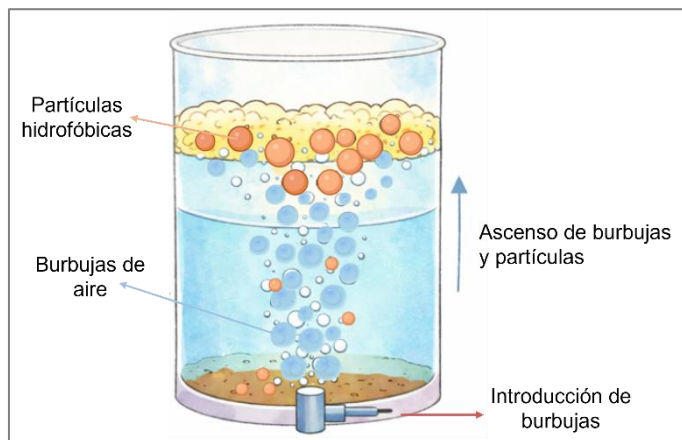


Figura 3. Representación esquemática del proceso de flotación (Kyzas & Matis, 2018).

1.2.2 Extracción

La extracción es una técnica basada en transferir uno o más analitos desde una fase inicial hacia otra fase en la que estos poseen mayor solubilidad permitiendo la preconcentración de metales, mejorar la sensibilidad analítica y reduce las interferencias. En el tratamiento de aguas, la extracción puede realizarse de dos diferentes maneras (Jadaa & Mohammed, 2023):

- Extracción líquido-líquido: Un solvente inmiscible con el agua captura selectivamente iones metálicos o compuestos presentes en la muestra.
- Extracción sólido-líquido: Un material sólido (hidrogeles, resinas, materiales porosos) retiene iones metálicos desde la solución acuosa, permitiendo su separación y posterior recuperación.

1.2.3 Resinas intercambio iónico

Las resinas de intercambio iónico son materiales sólidos con grupos funcionales capaces de intercambiar iones con especies presentes en la disolución. Para que el plomo pueda interactuar con las resinas esta debe tener afinidad con sus componentes, de modo que el ión metálico pueda intercambiar a los iones presentes

originalmente en la resina (Jadaa & Mohammed, 2023). Dentro de los grupos funcionales que se pueden utilizar se encuentran los grupos sulfonato (SO_3^-), carboxilato (COO^-) y fosfonato (PO_3^{2-}) (Ponnaiah et al., 2024).

1.2.4 Membranas

Las membranas son barreras selectivas que permiten el paso de ciertos componentes debido al tamaño de poro, carga superficial o interacciones químicas. La tecnología de nanofiltración, ultrafiltración y membranas adsorptivas ha permitido remover iones como Pb (II) con alta eficiencia, gracias a que la membrana retiene especies metálicas mientras permite el paso del solvente (Covaliu-Mierlă et al., 2023; Vo et al., 2020).

1.2.5 Adsorción

La adsorción, es una técnica simple que elimina todo tipo de contaminantes, con un bajo consumo energético y económicamente viable (Gusain et al., 2019). Se describe como la interacción que existe entre dos fases diferentes que forman una capa interfacial mediante la transferencia de una molécula desde una masa de fluido líquido o gas (adsorbato), a una superficie sólida (adsorbente), por lo que se clasifica como un proceso superficial reversible (siendo el proceso inverso la desorción), y puede explicarse mediante dos tipos de interacciones: física (fisisorción) o química (quimisorción) (Alaqarbeh, 2021).

La adsorción física, también llamada fisisorción, se produce cuando el adsorbato y la superficie del adsorbente interactúan únicamente por medio de fuerzas de Van der Waals; en consecuencia, las moléculas adsorbidas están ligadas débilmente a la superficie sin que exista la formación de enlaces químicos (Alaqarbeh, 2021).

Por otro lado, la adsorción química o quimisorción, se produce cuando las moléculas adsorbidas reaccionan químicamente con la superficie, formando y rompiendo enlaces, es decir, se caracteriza por la unión química fuerte entre el adsorbato y el adsorbente (Alaqarbeh, 2021).

Lo anterior depende de las características fisicoquímicas del adsorbente, ya que dependiendo de su naturaleza permiten la eliminación de diversos compuestos tóxicos. Dentro de las principales características que debe poseer un adsorbente se encuentra el contar con una gran área superficial, grupos funcionales específicos, porosidad, estabilidad térmica y química, morfología única, facilidad de funcionalización y resistencia mecánica (Ray et al., 2020).

Los adsorbentes se pueden clasificar de acuerdo con su origen (sintéticos, naturales o semisintéticos) o conforme a su composición y/o morfología (nanopartículas basadas en óxido/sulfuro de metal, nanomateriales en capas, geles, nanomateriales basados en polímeros, nanomateriales basados en carbono, y materiales convencionales) (Ray et al., 2020).

1.3 Hidrogeles

Dentro de los adsorbentes más utilizados en los últimos años, se encuentran los hidrogeles, los cuales son redes tridimensionales altamente reticuladas que se utilizan como soportes para la eliminación y cuantificación de diferentes especies químicas debido a su capacidad para absorber grandes cantidades de agua, así como su compatibilidad con diversos análisis químicos (Ramirez et al., 2016). El primer hidrogel fue sintetizado en 1960 por Wichterle y Lim el cual estaba constituido de una red de polihidroxietilmetacrilato (Bashir et al., 2020). Actualmente pueden conformarse por grupos funcionales hidrofílicos presentes dentro de su estructura polimérica, entre los cuales se destacan $-NH_2$, $-COOH$, $-OH$, $-CONH_2$, $-CONH$ y $-SO_3H$ (Zhang, 2021). Dichos grupos tienen una influencia directa tanto en la capacidad de absorción del agua como en la resistencia a la disolución del material. Por un lado, su afinidad por el agua favorece la formación de puentes de hidrógeno y en ciertos casos, la ionización de los grupos funcionales, lo que genera fuerzas osmóticas que incrementan la hinchazón del hidrogel. Por otro lado, aunque una mayor cantidad de grupos hidrofílicos tiende a aumentar la absorción, también puede comprometer la estabilidad del hidrogel si la red de entrecruzamiento no es

lo suficientemente densa, lo que podría afectar su resistencia a la disolución (Peppas & Hoffman, 2013).

Los componentes principales de los hidrogeles son un polímero base, conformado por cadenas hidrofílicas como la poliacrilamida, el acetato de vinilo (origen sintético) o como el quitosano y el alginato (origen natural) que permiten formar la red tridimensional del material mientras que un agente entrecruzante, como la N,N'-metilenbisacrilamida (MBA) o la bisacrilamida que entrelaza las diversas cadenas poliméricas mediante enlaces covalentes o enlaces físicos, mejorando así su estabilidad y resistencia mecánica (Santoni et al., 2008). Lo anterior ha generado la necesidad de clasificarlos para su mejor entendimiento.

1.4 Clasificación de los hidrogeles

Existen diversos tipos de hidrogeles los cuales se pueden clasificar con fundamento en su origen y composición, tal y como se muestra en la Figura 4.

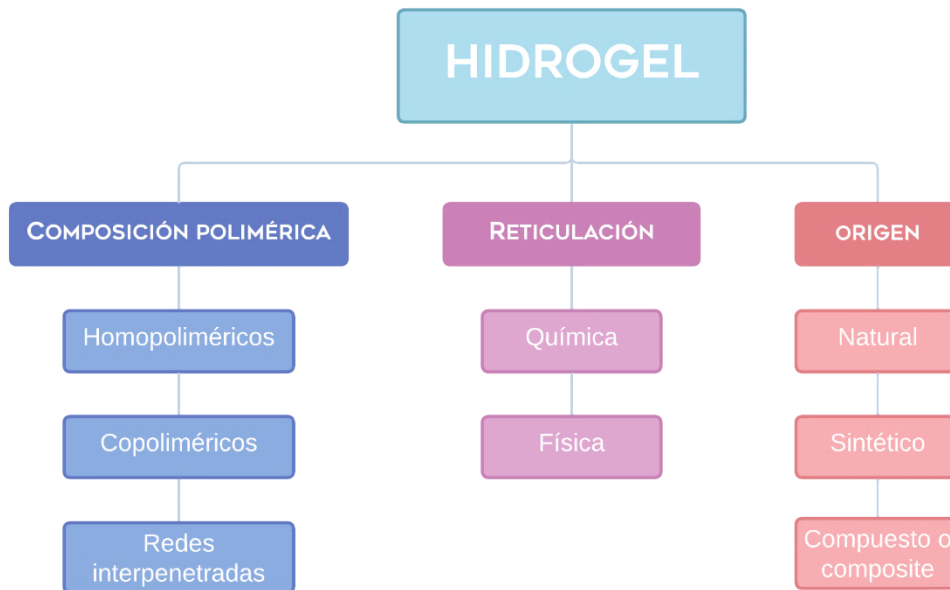


Figura 4. Clasificación de los hidrogeles en función de sus propiedades (El Sayed, 2023).

Como se puede observar en la Figura 4, la clasificación de los hidrogeles se puede realizar acorde a su composición polimérica en:

- *Homopoliméricos*: Se refieren a redes poliméricas derivadas de una sola especie de monómero que constituye la unidad estructural básica de cualquier red polimérica. Pueden presentar una estructura esquelética reticulada, dependiendo de la naturaleza del monómero y la técnica de polimerización (Iizawa et al., 2007).
- *Copoliméricos*: Compuestos por dos o más especies monoméricas diferentes con al menos un componente hidrofílico, dispuestas en una configuración aleatoria, en bloque o alternada a lo largo de la cadena de la red polimérica (Ahmed, 2013).
- *Redes interpenetradas*: Cuando los polímeros naturales y sintéticos se disponen en un sistema de red reticulado y no reticulado. Este sistema se utiliza para confirmar la estabilidad de los productos a granel, así como para garantizar la morfología de las superficies (Derashri et al., 2024).

También existe la clasificación de acuerdo a su forma de reticulación la cual tiene que ver con los enlaces que se forman en el hidrogel, como se muestra a continuación:

- *Reticulación química*: Son aquellos que se crean a partir de combinar reticulantes químicos con polímeros y así formar enlaces covalentes. Dado que no se disuelven en agua sin romper los enlaces covalentes, este tipo de hidrogel resulta ser estable y duradero. Estos se sintetizan mediante diferentes técnicas de polimerización, siendo las más importantes la polimerización por radicales libres y polimerización por irradiación (El Sayed, 2023).
- *Reticulación física*: Son formados a través de reticulados no covalentes. Esto generalmente se logra a través de diversos procesos físicos por ejemplo la complejación (ion-polímero o polímero-polímero), la agregación de cadenas, la cristalización y los enlaces de hidrógeno (El Sayed, 2023)

Por otro lado, la clasificación según su origen tiene que ver con la naturaleza del material empleado para su elaboración, tal y como se describe a continuación.

- *Naturales*: Son aquellos que se fabrican a partir de polímeros naturales como proteínas y polisacáridos. Poseen excelentes propiedades tales como una fuerte capacidad de adhesión celular, biocompatibilidad y biodegradabilidad que pueden conducir a la producción de materiales de hidrogel avanzados. El colágeno, el quitosano, la celulosa y el alginato son populares para la fabricación de hidrogeles naturales (Ahmed, 2015).
- *Sintéticos*: Suelen ser de naturaleza hidrofóbica y químicamente más fuertes en comparación de los naturales. Sus propiedades se pueden modificar según las necesidades. Se utilizan ampliamente en aplicaciones biomédicas. Los ejemplos más comunes de monómeros/polímeros utilizados en la fabricación de hidrogeles sintéticos son Metacrilato de hidroxietilo (HEMA), Acetato de Vinilo (VAc), Ácido acrílico (AA), entre otros (Bharskar, 2020).
- *Compuestos o composite*: Surgen de combinar polímeros de diversa naturaleza con la finalidad de conferirles una gran estabilidad y un aumento en su capacidad adsorción tal y como se describe a continuación (Maji & Lee, 2022).

1.5 Hidrogeles compuestos o composite

Si bien, en un inicio, la primera generación de hidrogeles contaba con un solo polímero en su estructura y con frecuencia se empleaba con un solo propósito, con el paso del tiempo, se comenzaron a sintetizar nuevos hidrogeles compuestos o composite por más de un polímero y monómero; estos son los llamados hidrogeles compuestos. Estos hidrogeles surgen al mezclar polímeros de origen natural y/o sintético, por ejemplo; los naturales-naturales se obtienen de mezclar dos o más polímeros de origen natural, los cuales presentan biodegradabilidad, capacidad de unión molecular y ajuste, biodegradabilidad y características bioactivas. Algunos de los polímeros empleados para la síntesis de este tipo de hidrogeles son los polisacáridos como alginato y el colágeno. Los sintéticos-sintéticos se tiene a partir

de la copolimerización de polímeros sintéticos como el polietilenglicol, policaprolactona y ácido poliláctico los cuales presentan cierta biodegradabilidad y toxicidad lo cual ha limitado su uso al tener una baja sustentabilidad y seguridad (El Sayed, 2023).

Por otro lado, los naturales-sintéticos pueden ser considerados como una parte natural (por ejemplo, polímeros biodegradables) y otra sintética (como nanomateriales). El objetivo de este tipo de materiales es conferirle al hidrogel mejores propiedades ya que la interacción complementaria entre sus componentes, y su combinación permite mejorar sus características mecánicas, capacidad de hinchamiento, estabilidad química y respuesta a estímulos externos, generando materiales con funcionalidades superiores a las de los hidrogeles simples. (El Sayed, 2023). Un ejemplo de esto son los materiales a base de carbono (óxido de grafeno, nanotubos de carbono, etc) los cuales al tener una alta densidad, resistencia y dureza han permitido la resolución de diversos problemas ambientales ya que han permitido la eliminación de diversos contaminantes presentes en cuerpos de agua como los colorantes debido a los diversos grupos hidrofílicos que presenta en su estructura (OH, C-O-C y COOH) (Pereira et al., 2020).

La inserción de materiales arcillosos como la montmorillonita, atapulgita, esmectita, vermiculita, biotita, laponita, sepiolita, bentonita y haloisita permiten aumentar las propiedades mecánicas del hidrogel, su conductividad térmica, la capacidad calorífica y de hinchamiento debido a su composición y estructura (Pereira et al., 2020).

Otra alternativa que se tiene en el desarrollo de hidrogeles composite es la incorporación de partículas metálicas las cuales además de mejorar las propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas del hidrogel composite, también le proporciona actividad catalítica. Si las partículas empleadas presentan propiedades magnéticas, estos pueden responder a campos magnéticos externos modificando su forma y volumen por la distensión de las cadenas poliméricas lo cual permite modular la difusión de los líquidos en la matriz polimérica afectando la adsorción y desorción de los analitos de interés (Pereira et al., 2020)

Parte de estas propiedades estas relacionadas con la forma de síntesis de los hidrogeles composite, por lo que su estudio se vuelve indispensable.

1.6 Métodos de síntesis de los hidrogeles composite

Para llevar a cabo la síntesis de un hidrogel es necesario realizar un entrecruzamiento que permita la formación de la red tridimensional lo cual involucra la formación de enlaces covalentes entre las cadenas lo cual se tiene por la presencia de monómeros multifuncionales en bajas concentraciones o por el acoplamiento de radicales (entrecruzamiento químico). Si este entrecruzamiento se da por interacciones secundarias no covalentes (interacción electrostática, interacción dipolo-dipolo, etc) se considera físico (Soto & Oliva, 2012). Algunas de las metodologías desarrolladas hasta el momento se describen a continuación.

1.6.1 Polimerización a granel

Es uno de los métodos más tradicionales y sencillos para la síntesis de hidrogeles con alta resistencia, aquí los monómeros y el agente entrecruzante reaccionan sin la adición de disolventes, formando una red tridimensional altamente densa (Figura 5). La polimerización se inicia generalmente utilizando luz ultravioleta, radiación y/o catalizadores químicos. La ausencia de disolventes permite obtener hidrogeles de alta pureza, sin embargo, la alta concentración de monómeros produce una alta velocidad y grado de polimerización por lo que la viscosidad de la reacción aumenta rápidamente lo que influye directamente en las propiedades del hidrogel. (Ahmed, 2015; Sikdar et al., 2021).

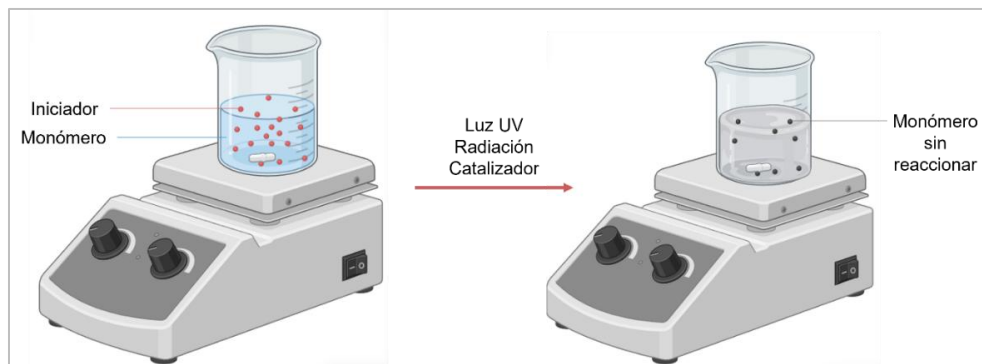


Figura 5. Polimerización a granel (Ahmed, 2015).

Las principales desventajas de este método de síntesis suelen ser la presencia de reacciones exotérmicas lo que implica dificultades para controlar la homogeneidad del hidrogel, especialmente en síntesis a gran escala; sin embargo, a pesar de las limitaciones, este método sigue siendo utilizado cuando se busca producir hidrogeles con estructuras densas y alta resistencia (Skidar et al., 2021; Ahmed, 2015).

1.6.2. Polimerización en solución

Este tipo de polimerización consiste en disolver los monómeros y en algunos casos, el agente entrecruzante, en un solvente adecuado previo a la adición de un iniciador químico que genera radicales libres (Figura 6). Este método permite un mejor control sobre la viscosidad del sistema y la concentración de monómeros, lo que se traduce en hidrogeles homogéneos y reproducibles (Skidar et al., 2021). La presencia del solvente facilita la dispersión uniforme de los reactivos, evitando la formación de zonas densas o heterogéneas (Ahmed, 2015).

Esta polimerización presenta ventajas como la posibilidad de obtener hidrogeles con estructura controlada y propiedades ajustables como permeabilidad, capacidad de hinchamiento y estabilidad mecánica. Sin embargo, el uso de solventes requiere procesos adicionales de purificación para eliminar restos químicos, además de que la velocidad de polimerización puede ser menor en comparación con la polimerización a granel. Aun así, este método se sigue utilizando debido a su

versatilidad y facilidad para modificar las propiedades del hidrogel (Darban et al., 2022).

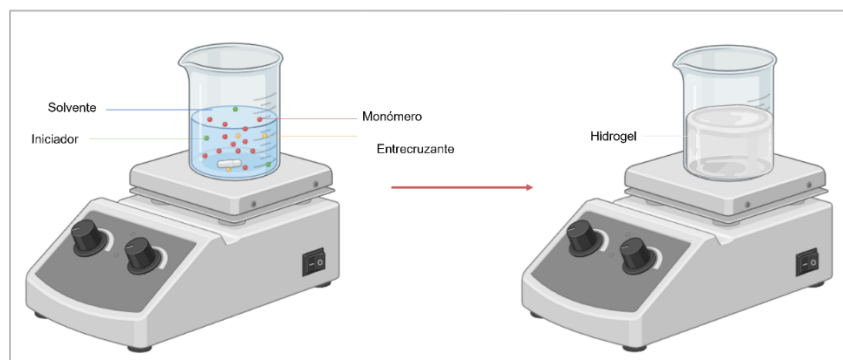


Figura 6. Polimerización en solución (Ahmed, 2015)

1.6.3 Polimerización por injerto

En este tipo de polimerización se añaden cadenas laterales de monómeros sobre un polímero preexistente, formando una estructura ramificada o modificada (Figura 7). Este método permite combinar polímeros naturales y sintéticos, lo que ofrece la posibilidad de mejorar propiedades específicas como la capacidad de hinchamiento, la estabilidad química o la funcionalidad superficial tal y como se mencionó anteriormente (Bashir et al., 2020).

Este método favorece la obtención de hidrogeles compuestos con diversas propiedades como la capacidad de hinchamiento, la porosidad, la disponibilidad de grupos funcionales superficiales y la afinidad por especies metálicas acorde a la aplicación deseada (Darban et al., 2022).

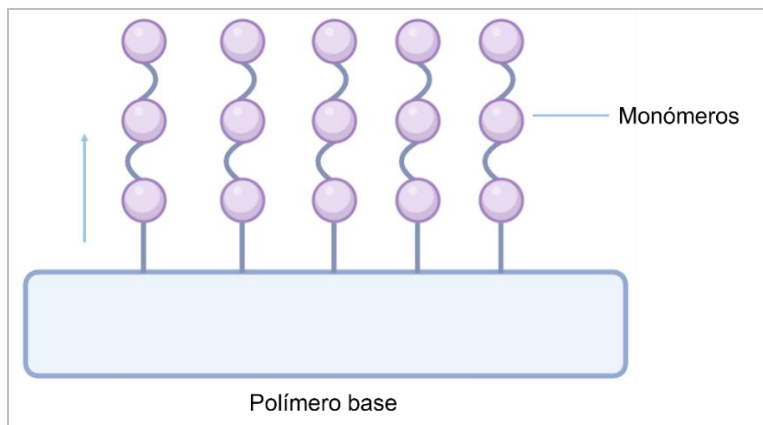


Figura 7. Polimerización por injerto (Bashir et al., 2020).

1.6.4 Polimerización por radiación

La polimerización por radiación utiliza radiaciones ionizantes, como rayos gamma, haces de electrones o microondas, para inducir la formación de hidrogeles sin la necesidad de indicadores químicos o agentes entrecruzantes (Figura 8). Este método permite obtener hidrogeles con estructuras homogéneas y propiedades ajustables, como la capacidad de hinchamiento. La principal ventaja que presenta la iniciación por radiación sobre la iniciación química es la producción de hidrogeles relativamente puros y sin iniciador (Ahmed, 2015).

La irradiación puede realizarse en soluciones acuosas de monómeros y polímeros, donde la radiólisis del agua genera radicales libres que inician la polimerización y el entrecruzamiento de las cadenas. Además, este proceso puede llevarse a cabo a temperatura ambiente lo que facilita su implementación en diversas aplicaciones (More & Chapekar, 2024)

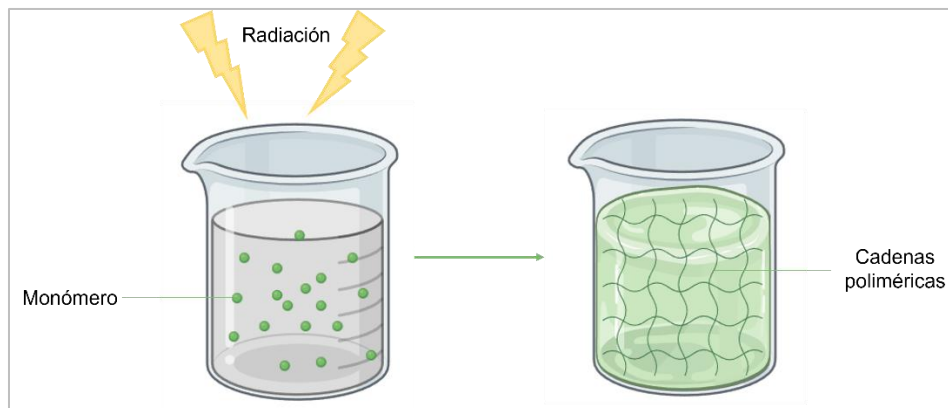


Figura 8. Polimerización por radiación (More & Chapekar, 2024)

1.6.5 Polimerización por radicales libres

Es una de las polimerizaciones más empleadas en la síntesis de hidrogeles, pueden emplearse diversos monómeros como los acrilatos y amidas debido a su simplicidad, versatilidad y facilidad de combinación. Este proceso implica la generación de radicales libres que inician la polimerización de monómeros insaturados formando una red tridimensional entrecruzada (Figura 9). Según Akhtar et al. (2016), la polimerización por radicales libres permite un control preciso sobre la estructura y las propiedades del hidrogel. Este tipo de polimerización implica tres etapas (El Sayed, 2023):

- 1) Iniciación: el iniciador se descompone a altas temperatura para dar paso a los radicales libres.
- 2) Propagación: los sitios activos atacan a los monómeros para poder llevar a cabo la copolimerización.
- 3) Terminación: se crea la red tridimensional en presencia de los agentes de reticulación.

La principal desventaja de esta polimerización es que el proceso puede verse afectado por fenómenos como la autoaceleración, donde la viscosidad creciente del sistema reduce la eficiencia de las reacciones de terminación, lo que puede alterar las características del material final (Akhtar et al., 2016).

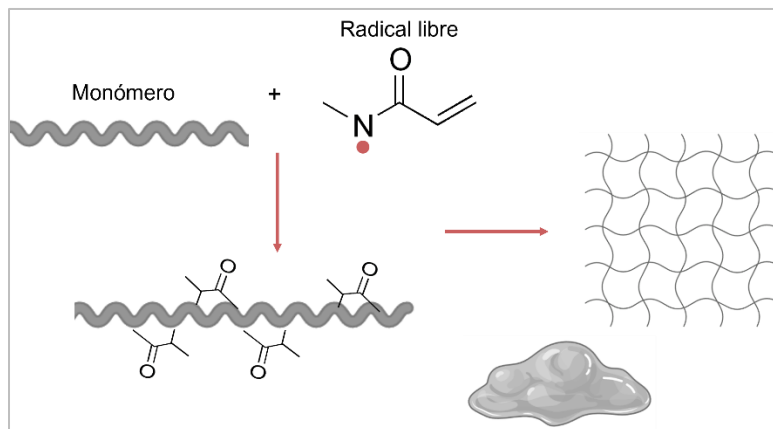


Figura 9. Polimerización por radicales libres (Akhtar et al., 2016).

1.6.6 Incrustación de partículas

Es importante mencionar que cuando se realiza una incorporación de nanopartículas a la matriz polimérica se desea que se realice de una manera uniforme por lo cual se han desarrollado diversas metodologías las cuales se mencionan a continuación (Thoniyot et al., 2015):

- 1) Formación del hidrogel en una suspensión de nanopartículas: este es uno de los métodos más sencillos para la formación de hidrogeles, aquí las nanopartículas elaboradas previamente se incorporan a una solución polimérica que contiene el monómero y el entrecruzante para posteriormente adicionar el iniciador. Esta metodología puede emplearse con materiales de diferentes tipos.
- 2) Incrustación física de las nanopartículas en el hidrogel después de la gelificación: aquí las nanopartículas se introducen al hidrogel por medio de un mecanismo de “inhalación” el cual consiste en que el hidrogel previamente colapsado por la expulsión del agua se pone en contacto con una solución que contiene las nanopartículas lo cual provoca su hinchamiento y a su vez la inmovilización de las nanopartículas las cuales permanecen adheridas posiblemente por interacción de estas con la superficie del polímero o bien por entrelazamiento físico.

- 3) Formación reactiva de las nanopartículas dentro del hidrogel preformado: para poder realizar este tipo de incrustación se colocan los precursores de las nanopartículas en lugar de estas en el momento de llevar a cabo la polimerización. Una vez que se tiene la matriz funcionalizada con los iones metálicos estos se hidrolizan con la finalidad de obtener las nanopartículas metálicas o bien se puede emplear un reductor como el borohidruro de sodio.
- 4) Reticulación empleando partículas para la formación del hidrogel: en este caso el grupo entrecruzante se encuentra en la superficie de la nanopartícula. La principal ventaja de esta metodología es la capacidad de formar enlaces múltiples en la estructura tridimensional del hidrogel.
- 5) Formación del gel empleando partículas, polímeros y moléculas gelificantes: el hidrogel es polimerizado in situ al poner en contacto nanopartículas metálicas con un monómero y un gelificante seguida de un oxidante (por ejemplo, el persulfato de amonio que permitan el entrecruzamiento).

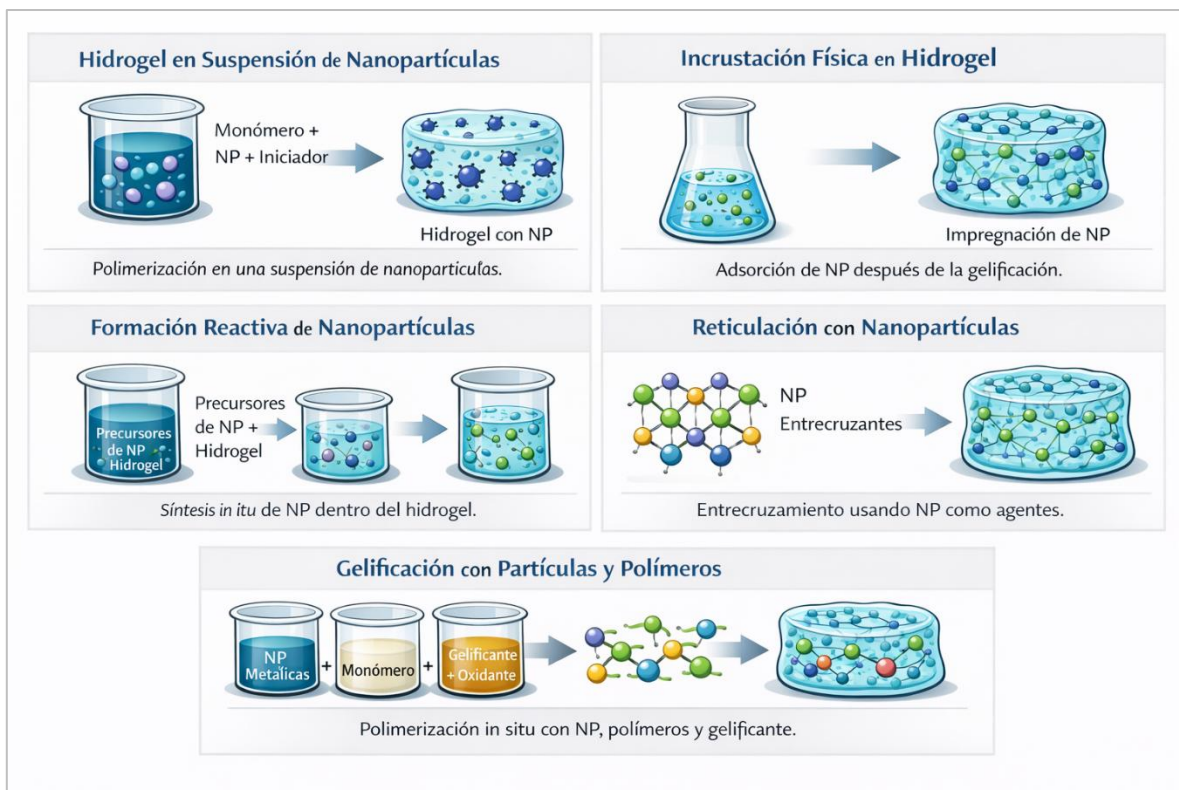


Figura 10. Incrustación de nanopartículas (Thoniyot et al., 2015).

Es importante mencionar que las diversas propiedades de los hidrogeles compuestos que les confiere las diversas formas de síntesis han permitido que tengan un amplio campo de aplicaciones, algunas de las cuales se describen a continuación.

1.7 Aplicaciones de los hidrogeles composite

El desarrollo de los hidrogeles ha permitido su aplicación a productos higiénicos, por ejemplo, en lentes de contacto donde se han utilizado hidrogeles de silicio, debido a su alta permeabilidad al oxígeno, lo que permite un uso prolongado sin comprometer la salud ocular. Además, la incorporación de poliacrilamidas u otros monómeros hidrofílicos mejora la hidratación y la comodidad de los lentes. Por ejemplo, Zheng et al. (2022) investigó la liberación sostenida de un agente humectante polimérico desde un material de lente de contacto de hidrogel de silicio, dando como resultado que el agente humectante se liberaba de manera controlada, lo que mejoraba la comodidad durante el uso prolongado de lentes de contacto.

También han sido utilizados en la agricultura, empleando un hidrogel híbrido de quitosano con celulosa que permite reducir la resistencia a los ácidos y mejorar las características mecánicas del material. La aplicación de este hidrogel como acondicionador del suelo mostro una mejora en las condiciones de los agregados, en la reducción de la erosión del suelo y la prevención de la formación de costras, esto debido a que el hidrogel mejora la estabilización y solidificación del suelo al modificar sus características físicas y químicas debido a su capacidad de retención de agua. Por otro lado, permite incrementar el contenido de agua disponible en el suelo mejorando así el crecimiento de las plantas. De igual forma permiten controlar la erosión del suelo debida al viento y la lluvia ya que compacta el suelo mediante un tratamiento superficial y por tanto lo estabiliza en la fase inicial del crecimiento de cultivos (El Sayed, 2023).

De igual manera, en los últimos años se han empleado en el tratamiento de la contaminación del agua, realizando la eliminación de diversos contaminantes como

los iones metálicos debido a su naturaleza tóxica. Actualmente se encuentran reportados diversos hidrogeles que permiten la eliminación de este tipo de contaminantes muchos de los cuales se elaboran a partir de recursos renovables algunos de los cuales se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Usos de diversos hidrogeles composite para la remoción de especies metálicas.

Hidrogel composite	Metal pesado (MP)	C _i (MP) mg/L	pH	q _{max} mg/g	Referencia
Hidrogel 3D de grafeno-sílice	Hg (II)	10-50	4	289	(Lu et al., 2019)
Biochar/PVA/alginato	Cd (II)	20-200	5	232	(Du et al., 2023)
Hidrogel de gelatina- quitosano con haloisita modificada con tioles	Hg (II)	5-200	5	203	(Bulutcu et al., 2025)
Almidón-graft-acrílico (St-g-AAc) / montmorillonita (MMT)	Cu (II)	50-200	5	102	(Güçlü et al., 2010)
	Pb (II)	50-200	5	120	
Organobentonita / alginato (hidrogel en perlas)	Cr (VI)	20-200	2	94.8	(Muñoz - Martínez et al., 2024)
Poliacrilamida (PAAM)/Biochar	Cd (II)	50-800	-	63.58	(Li & Chen ., 2018)
Nanopartículas superparamagnéticas de óxido de Hierro/PVA	Cu (II)	100	6	47.6	(Dolgormaa et al., 2018)

Los hidrogeles composite han demostrado ser materiales altamente prometedores para la remoción de metales pesados gracias a su gran capacidad de hinchamiento, la presencia de múltiples sitios activos, entre otros. Sin embargo, muchos de los materiales reportados presentan algunas limitaciones como costos elevados, síntesis complejas o un desempeño que depende de condiciones muy controladas.

En este sentido, el presente trabajo muestra el desarrollo de un hidrogel composite empleando partículas de aluminio para la eliminación de plomo presente en sistemas acuosos con la finalidad de disminuir los daños que causa al ecosistema y a la salud debido a que han demostrado ser un excelente adsorbente debido a su gran capacidad para adsorber agua y estabilidad.



2

OBJETIVOS

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Sintetizar y evaluar un hidrogel composite de acrilamida/N,N'-metilenbisacrilamida con partículas de aluminio que permita la adsorción de iones Pb(II) presente en medios acuosos.

2.2 Objetivos específicos

- Elegir la mejor composición del hidrogel composite que permita la adsorción de plomo en medios acuosos.
- Determinar los parámetros químicos que permitan la mejor adsorción de plomo en disoluciones acuosas empleando el hidrogel composite sintetizado.
- Evaluar el hidrogel composite a una muestra acuosa sintética proveniente de una industria de baterías.



3

METODOLOGÍA

3. Metodología

3.1 Síntesis del hidrogel composite

Para la realización del hidrogel composite se llevaron a cabo dos etapas, las cuales se describen a continuación

3.1.1 Etapa 1: Síntesis de las partículas de aluminio (pAl)

Para llevar a cabo la síntesis de las partículas de aluminio se preparó un extracto de mejorana para lo cual se pesaron 1.5 g de mejorana y se colocaron en 12 mL de agua destilada por 30 min a 60° C. El extracto obtenido se filtró y reservó para pruebas posteriores (Yassin et al., 2022).

Una solución 25%^{m/v} de nitrato de aluminio ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3$, Meyer, 98%) en agua que se mezcló con el extracto de mejorana en proporción 1:1. La solución resultante se mantuvo en agitación por ≈ 3 minutos para posteriormente precipitar las partículas de aluminio a un pH impuesto de 10 con una solución de hidróxido de sodio 6 M (NaOH, Sigma-Aldrich, $\geq 98\%$), lo que condujo a la precipitación de especies insolubles de Al (III) hidroxilado, principalmente óxidos e hidróxidos de aluminio (Digne et al., 2002). El precipitado obtenido se lavó con agua desionizada, se filtró y se secó en una estufa a aproximadamente 65°C durante 120 minutos. Una vez secas, las partículas obtenidas se trituraron en un mortero y almacenaron para su posterior uso (pAl) (Figura 11) (Sabbagh & Muhamad, 2017; Susial et. al. 2016).

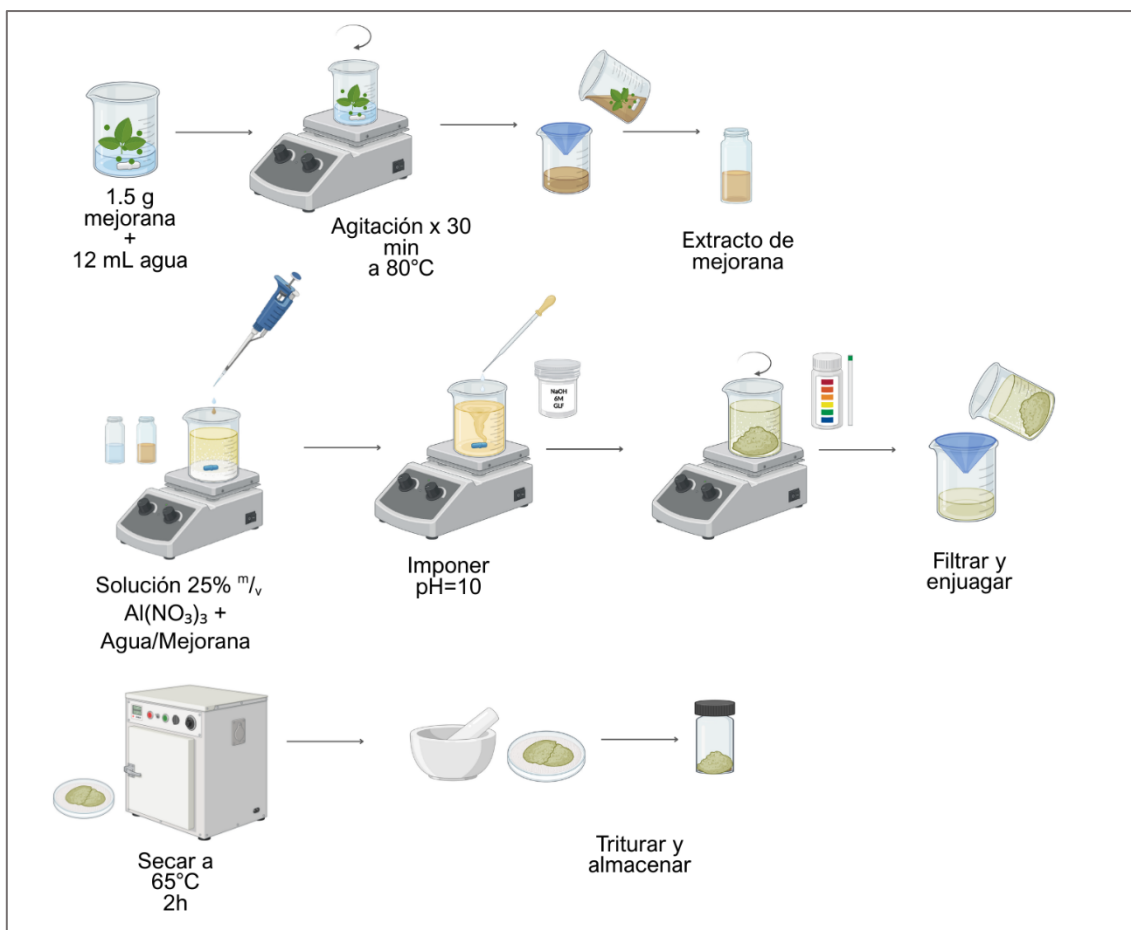


Figura 11. Síntesis de las partículas de aluminio (pAl) (Sabbagh & Muhamad, 2017).

3.1.2 Etapa 2: Elaboración del hidrogel composite

Para llevar a cabo la elaboración del hidrogel composite (HC) se realizó una síntesis por radicales libres y la incrustación de las pAl, las cuales fueron dispersas en 2 mL de agua desionizada a 80°C por 10 minutos. A la par, se prepararon 2 mL de una solución polimérica con el 20% m/v de monómero (acrilamida (AC), $\text{C}_3\text{H}_5\text{NO}$, Aldrich $\geq 99\%$) y 2% m/v de entrecruzante (N,N'-metilenbisacrilamida (MBA), $(\text{CH}_2\text{CHCONH})_2\text{CH}_2$, Aldrich $\geq 98\%$) la cual fue calentada a 80°C por 10 minutos. Una vez transcurrido el tiempo, la solución polimérica y las pAl se juntaron para su homogenización durante 2 minutos. Finalmente se agregó 1 mL de una solución al 1% m/v de persulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$, Meyer $\geq 98\%$) como iniciador (en total

5 mL de solución casting). La agitación y calentamiento se mantuvo por 30 minutos obteniéndose así el HC (Figura 12) (Sabbagh & Muhamad, 2017).

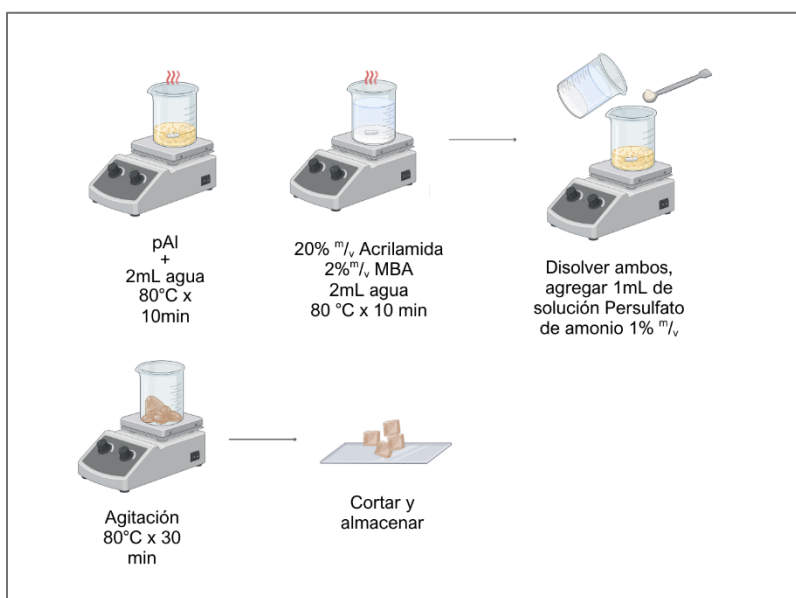


Figura 12. Síntesis del hidrogel composite (HC) (Sabbagh & Muhamad, 2017).

3.2 Caracterización del hidrogel composite

3.2.1 Análisis morfológico

Para conocer cómo es que se modifica la morfología de HC respecto a uno blanco (HB: sin pAI) se realizó un análisis mediante un microscopio óptico digital Keyence VHX-7000 a 500 X.

3.2.2 Análisis de Infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR)

Con el objeto de conocer si la modificación del HC se realizó de manera adecuada, se analizó mediante espectroscopia infrarroja con Transformada de Fourier (FT-IR) con un equipo PerkinElmer: Spectrum GX FT-IR System empleando pastillas de bromuro de potasio (KBr) en un intervalo de 4000 a 500 cm^{-1} .

3.2.3 Grado de hinchamiento

Para evaluar el grado de hinchamiento del HC se colocaron 0.01 g de hidrogel seco en 10 mL de agua desionizada por 14 días a temperatura ambiente. Una vez transcurrido ese tiempo, el hidrogel se retiró, se secó ligeramente con papel absorbente para obtener su peso final. El grado de hinchamiento se calculó utilizando la ecuación: (Sievers et al., 2020)

$$\text{Porcentaje de hinchamiento (\%)} = \frac{W_s - W_d}{W_d} \times 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde W_s es el peso del hidrogel después del proceso de hinchamiento, mientras que W_d representa el peso del hidrogel seco.

3.3 Evaluación del hidrogel para la adsorción de plomo

Con la finalidad de evaluar la capacidad de adsorción de los diversos HC sintetizados frente a diversos parámetros como contenido de pAl inmovilizadas, masa de HC, pH de la disolución acuosa y tiempo de contacto, se puso en agitación constante en un sistema *batch* con una solución acuosa que contenía 5 mg/L de Pb (II) con la finalidad de permitir la interacción entre el analito y el material adsorbente. La solución resultante fue separada para su análisis mediante absorción atómica acoplada a flama en un equipo Varian SpectrAA880 a fin de determinar el plomo remanente. El porcentaje de eliminación se calculó con la ecuación 2:

$$\text{Porcentaje de eliminación \%} = \frac{C_0 - C_f}{C_0} * 100\% \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde C_0 es la concentración inicial y C_f es la concentración final de Pb (II) en la solución acuosa antes y después del proceso de adsorción respectivamente. Es importante mencionar que, en todos los casos, los experimentos fueron realizados por triplicado.

Una vez encontradas las mejores condiciones de eliminación se evaluó el efecto de la concentración de plomo en la adsorción, en un intervalo de 3-1000 mg/L de plomo mediante los modelos no linealizados de Langmuir, Freundlich, Sips y Dubinin-

Radushkevich (Tabla 3), así como su cinética mediante el modelo de pseudo-primer orden y pseudo-segundo orden empleando los siguientes modelos matemáticos (Tabla 4) (Mashkooor & Nasar, 2020).

Tabla 3. Ecuaciones no linealizadas de los modelos de isothermas Langmuir, Freundlich, Sips y Dubinin-Radushkevich (Mashkooor & Nasar, 2020).

Modelo	Ecuación no linealizada	Parámetros
Langmuir	$q_e = \frac{q_o K_L C_e}{1 + K_L C_e}$	q_e = Equilibrio máximo alcanzado del adsorbato en el adsorbente (mg/g) q_o = Máxima capacidad de adsorción (mg/g) C_e =Adsorción en el equilibrio del adsorbato en solución (mg/L) K_L = Constante de Langmuir (l/mg)
Freundlich	$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}}$	K_F = Capacidad de adsorción (mg/g) C_e =Adsorción en el equilibrio del adsorbato en solución (mg/L) n = heterogeneidad
Sips	$q_e = \frac{Q_s (K_s C_e)^{n_s}}{1 + (K_s C_e)^{n_s}}$	Q_s =capacidad máxima (mg/g) K_s = Constante de Sips (l/mg) n_s = heterogeneidad
Dubinin-Radushkevich	$q_e = q_m \exp(-\beta \varepsilon^2)$ $\varepsilon = RT \ln \left(1 + \frac{1}{C_e} \right)$	q_m = capacidad máxima teórica (mg/g) β = Constante del modelo D-R mol^2/kJ^2

Tabla 4. Ecuaciones linealizadas de los modelos cinéticos de pseudo primer orden y pseudo segundo orden (Ray et al., 2020).

Modelo	Ecuación linealizada	Parámetros
Pseudo primer orden	$q_t = q_e(1 - e^{-tk_1})$	q_t = cantidad adsorbida a tiempo t (mg/g) q_e = cantidad adsorbida en equilibrio (mg/g) k_1 = Constante de velocidad de pseudo- primer orden (min^{-1}) t = tiempo (min)
Pseudo segundo orden	$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{q_e k_2 t + 1}$	q_t = cantidad adsorbida a tiempo t (mg/g) q_e = cantidad adsorbida en equilibrio (mg/g) k_1 = Constante de velocidad de pseudo- segundo orden (min^{-1}) t = tiempo (min)

3.4 Evaluación en una matriz compleja (agua sintética)

Para evaluar el comportamiento del HC en una matriz compleja se empleó una muestra de agua sintética residual proveniente de una industria manufacturera de baterías. Se preparó de acuerdo con lo reportado por Vergil et al 2017. El agua fue dopada con: Pb (II) 4.5 mg/L , Mn (II) 0.01 mg/L , Ni (II) 0.097 mg/L , Cu (II) 0.083 mg/L , Cr (III) 0.070 mg/L , Zn (II) 0.029 mg/L , Ag (I) 0.002 mg/L , Cd (II) 0.003 mg/L . Todos los metales se emplearon en forma de nitrato partiendo de una solución estándar al 2% de HNO_3 para evitar la formación de precipitados.



4

RESULTADOS

4. Resultados

4.1 Caracterización del hidrogel composite

4.1.1 Análisis mediante microscopía óptica.

En la caracterización morfológica del hidrogel se puede ver a simple vista la diferencia de color del HB (Figura 13a) y el HC (Figura 13b) debido a la presencia de las pAI. De igual manera, en las microfotografías se observa la formación de una red tridimensional heterogénea en el HB (Figura 13c), mientras que el HC (Figura 13d) muestra una superficie porosa con pequeños glóbulos, los cuales se pueden atribuir a la deposición de las pAI en la superficie con lo que se puede asegurar su modificación.

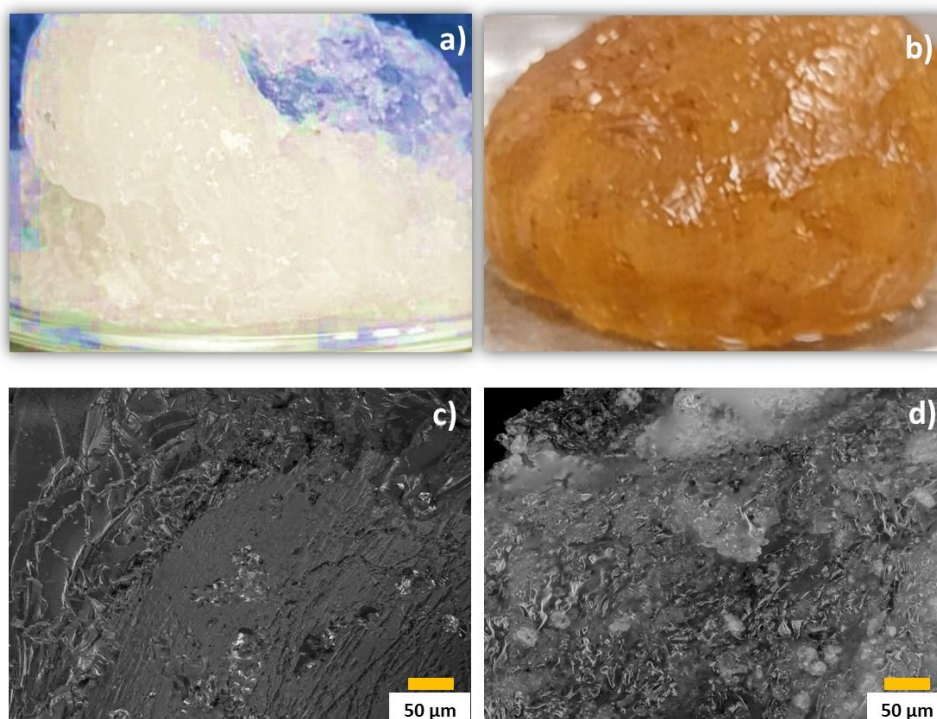


Figura 13. Morfología del hidrogel compuesto a) hidrogel de acrilamida y N,N'-metilenbisacrilamida (HB), b) hidrogel modificado con pAI incrustadas (HC), c) microfotografía HB, d) microfotografía HC

4.1.2 Análisis mediante espectroscopía infrarroja

Con la finalidad de observar si existe alguna modificación en el hidrogel debido a la inmovilización de las pAl se realizó un análisis mediante espectroscopía infrarroja del HB, HC y las pAl. En el espectro FT-IR de las pAl (Figura 14a) muestra una banda ancha en la región de $3800\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$, atribuida a las vibraciones O–H comunes por la hidratación del aluminio y una banda débil alrededor de $\sim 800\text{ cm}^{-1}$ atribuible a las vibraciones Al–O / Al–O–Al, típicas de las especies de aluminio (Giacomazzi et al., 2023; Gholizadeh et al., 2023), mientras que la banda que aparece alrededor de 1380 cm^{-1} puede atribuirse a la presencia de los nitratos correspondientes a la sal de la cual fueron preparadas las pAl (Mihaylov et al., 2020).

Para los espectros IR del HB y HC (Figura 14b y 14c) se observan picos entre 3500 y 3400 cm^{-1} correspondientes a los enlaces N–H y C–H de la AC y MBA, mientras que entre 2800 y 2300 cm^{-1} se observa la vibración C–H. Las bandas observadas en 1636 , 1615 y 990 cm^{-1} se asocian a los enlaces C=C y C=O de la AC y MBA (Siddiqua et al., 2021). En el espectro del HC se observa adicionalmente una señal débil alrededor de 800 cm^{-1} , ausente en el HB, lo cual sugiere la presencia de interacciones entre la matriz polimérica y las pAl, esto complementa a los resultados obtenidos en la caracterización morfológica.

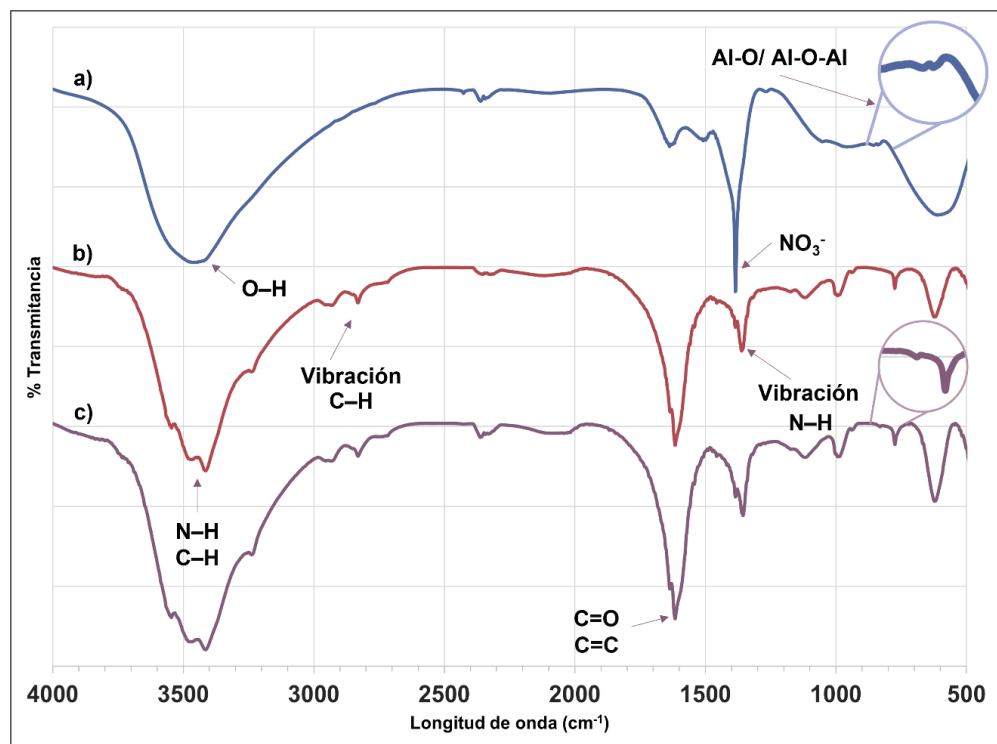


Figura 14. Espectro de infrarrojo de a) pAl, b) HB y c) HC.

4.1.3 Evaluación del grado de hinchamiento

Una de las formas más simples y económicas de conocer cómo es el grado de entrecruzamiento de un hidrogel es por su porcentaje de hinchamiento, el cual fue evaluado con los resultados que se muestran en la Figura 15. Se puede observar que cuando no se tienen pAl en el hidrogel se presenta un menor hinchamiento debido probablemente a una reticulación insuficiente que no permite la generación de espacios adecuados para la adsorción de agua mientras que a cantidades superiores al 1%^{m/v} de pAl en la solución casting la reticulación es excesiva lo que provoca tamaños demasiado pequeños dificultando así la adsorción de agua (Nnadi, & Brave 2011).

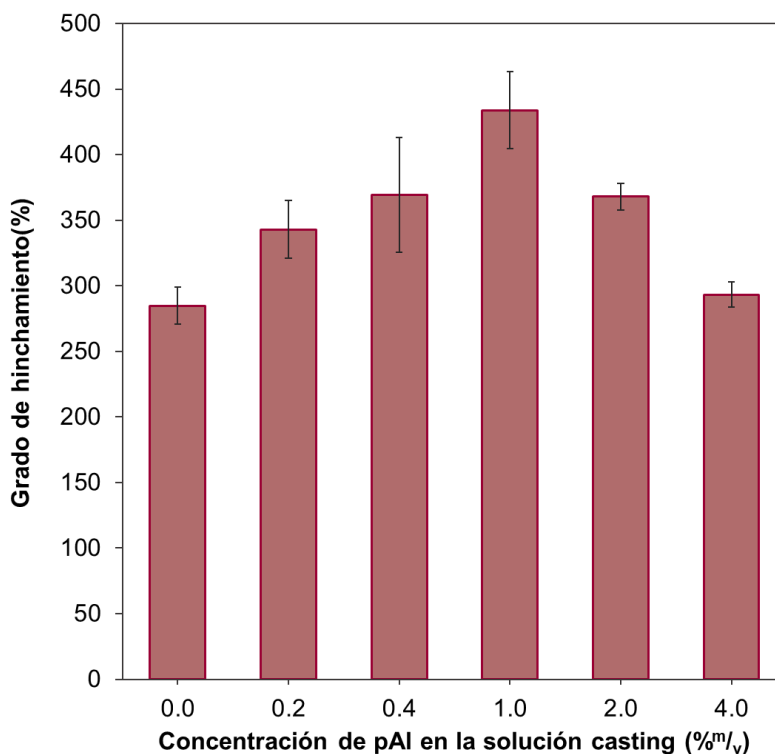


Figura 15. Grado de hinchamiento del HC después de 14 días.

4.2 Evaluación del hidrogel para la adsorción de plomo

4.2.1 Efecto de la concentración de aluminio en el hidrogel composite

El aluminio inmovilizado en el hidrogel puede modificar su morfología y por lo tanto la capacidad de adsorción, se evaluó el efecto de la concentración de pAl en la solución casting en un intervalo de 0-4%^m/_v. Acorde a la Figura 16, se observa que, al incrementar la concentración de las pAl dentro de la matriz del hidrogel, el porcentaje de adsorción aumenta de manera significativa (sin que se presente un porcentaje de adsorción favorable cuando no se tienen pAl en el hidrogel). Este comportamiento puede explicarse debido a que las partículas de aluminio pueden actuar como adsorbentes activos adicionales, incrementando el número total de sitios de captura disponibles para el metal y la superficie específica del material compuesto (Zhang et al., 2024)

Es importante mencionar que si bien, el HC elaborado con el 4%^{m/v} de pAI en la solución casting es el que presenta un menor grado de hinchamiento, esto no repercute significativamente en su capacidad de adsorción debido a la afinidad que presentan con el plomo (Wang et. al., 2015).

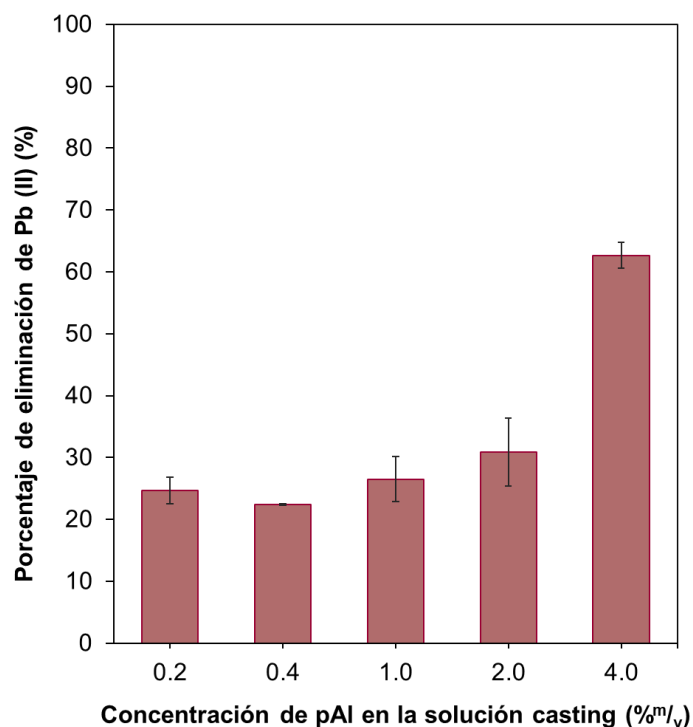


Figura 16. Porcentaje de eliminación de plomo frente a la concentración de pAI en la solución casting del HC. Condiciones experimentales: 5 mg/L Pb (II), pH= 7, tiempo de contacto 2 h, masa de HC = 0.1 g.

4.2.2 Efecto de la masa del hidrogel

Otro de los parámetros que influye en el proceso de adsorción es la cantidad de masa del HC empleada, por lo que masas entre 10 y 200 mg fueron evaluadas. De acuerdo a los resultados de la Tabla 5 se pudo observar que al emplear 10 mg de HC la adsorción es muy baja e irregular mientras que un incremento en la masa aumenta el porcentaje de adsorción de plomo, lo cual puede atribuirse a que con una mayor cantidad de adsorbente el área y la cantidad de sitios activos disponibles aumenta. Esta tendencia se pierde cuando se emplean 200 mg de HC, lo cual puede

ser ocasionado por la agregación del HC impidiendo el incremento del área superficial (Ching et al., 2011).

Tabla 5. Efecto de la masa del HC en el proceso de eliminación de Pb(II). Condiciones experimentales: 5 mg/L Pb (II), pH= 7, tiempo de contacto 2 h, HC con 4 %^{m/v} de pAl en la solución casting.

Masa de HC (mg)	Porcentaje de eliminación de Pb (II) (%) *
10	11.03 (17.53)
50	62.68 (3.40)
100	85.83 (1.97)
200	86.23 (2.31)

*CV entre paréntesis

4.2.3 Efecto del pH de la solución de plomo en su adsorción por HC

Dado que el pH influye directamente en las propiedades superficiales del HC y las especies de Pb (II) presentes en el sistema, se evaluó su efecto sobre el proceso de eliminación. La Tabla 5 muestra que a pH bajos el porcentaje de eliminación de Pb (II) disminuye, esto puede atribuirse a la repulsión que existe entre el analito y la superficie del HC ya que a pH inferiores de ~6.1 (pH_{PZC}, Figura 17) el adsorbente adquiere una carga positiva (Zaidi, et. al. 2021).

Es importante mencionar que el mejor porcentaje de eliminación se tiene a un pH de 8 en donde aún se encuentra el plomo libre (Figura 18), por lo que este aumento se puede deber al incremento de la densidad de carga negativa en la superficie (Naidu, et. al. 1994).

Tabla 6. Efecto del pH en el proceso de adsorción. Condiciones experimentales: 0.1 g de HC con 4 %^{m/v} de pAl en la solución casting, 5 mg/L Pb (II), tiempo de contacto 2 h.

pH	Porcentaje de eliminación de Pb (II) (%) *
2	13.97 (5.77)
3	17.78 (9.58)
5	77.96 (1.69)
≈7	84.68 (2.35)
8	92.96 (2.17)

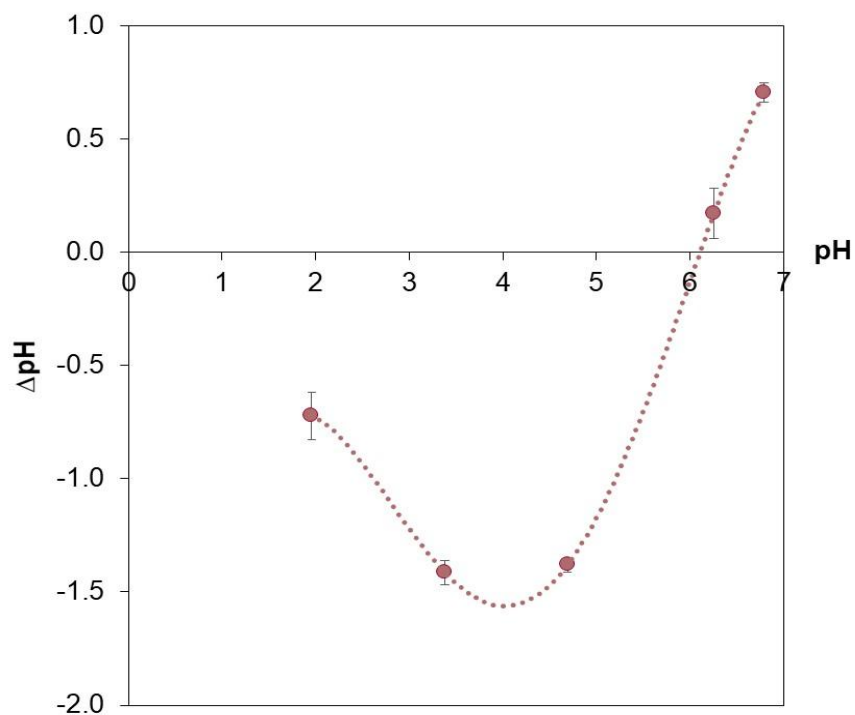


Figura 17. Determinación del punto de carga cero del HC con 4 %^{m/v} de pAl en la solución casting.

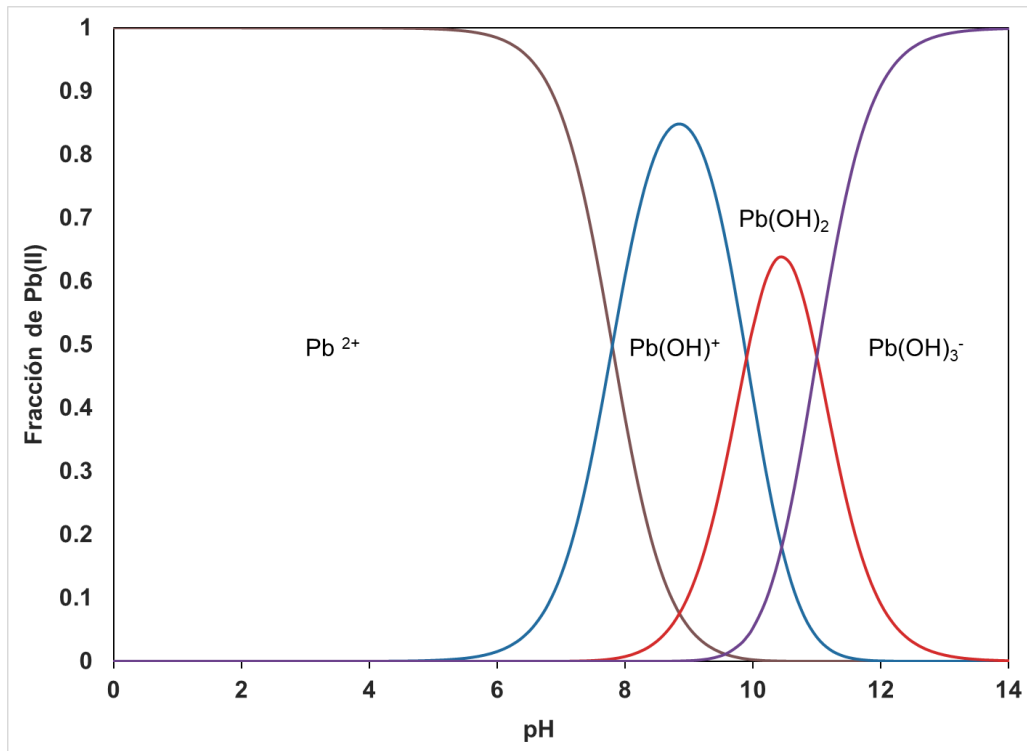


Figura 18. Diagrama de distribución de especies pPb frente a pH (Ringbom, 1963).

4.2.4 Efecto de la concentración de plomo en el sistema

Para conocer el efecto que tiene la concentración en el proceso de adsorción del Pb (II) en el HC fue necesario conocer el tiempo en el que el sistema llega al equilibrio. Acorde a la Tabla 7 se puede observar que a partir de los 60 minutos ya no existe cambio en el porcentaje de adsorción por lo que, a partir de ese punto, puede llevarse a cabo el análisis.

Tabla 7. Análisis del tiempo en que la eliminación llega al equilibrio. Condiciones experimentales: 0.1 g de HC con 4 %^{m/v} de pAl en la solución casting, 5 mg/L Pb (II), pH= 7.

Tiempo (min)	Porcentaje de eliminación de Pb (II) (%) *
15	29.91 (2.79)
30	37.23 (4.35)
60	85.66 (0.22)
120	85.83 (2.31)

Una vez determinado el tiempo en el cual el sistema llega al equilibrio, se prosiguió a evaluar las diferentes isotermas de adsorción tal y como se observa en la Figura 19.

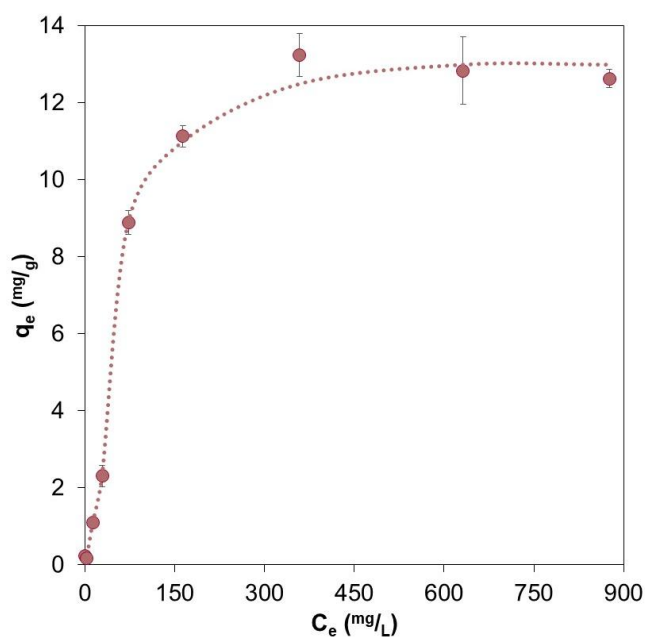


Figura 19. Isotherma de adsorción del Pb (II) en el HC. Condiciones experimentales: 0.1 g de HC 4 %^{m/v} de pAl en la solución casting, 3-1000 mg/L Pb (II), tiempo de contacto 1h, pH= 7.

Es importante recordar que el modelo de Langmuir permite conocer si la adsorción de las moléculas adsorbidas en la superficie del adsorbente se presenta en forma de monocapa saturada con una energía de adsorción constante, mientras que la isoterma de Freundlich considera un sistema heterogéneo con adsorción en múltiples capas, diferentes sitios de unión y diversas afinidades de adsorción asociadas a ellos (Pereira et al., 2022).

Por otro lado, la isoterma de Sips es una combinación entre la isoterma de Langmuir y Freundlich la cual asume que la adsorción se lleva a cabo en superficies heterogéneas con una distribución de la energía de adsorción a lo largo de la superficie del adsorbente sin necesidad de medir de manera independiente el número de sitios de unión (Pereira et al., 2022).

La isoterma de Dubinin Radushkevich permite describir el mecanismo de adsorción en superficies heterogéneas cuando se trabaja con concentraciones intermedias de adsorbato. El proceso de adsorción está controlado por un mecanismo de llenado de poros dependiente de la temperatura lo que permite distinguir entre una adsorción física ($E < 8 \text{ KJ/mol}$) o química ($8 \text{ KJ/mol} < E < 16 \text{ KJ/mol}$) (Alharby et al., 2021).

De acuerdo con los resultados obtenidos se observa que el modelo de Sips presenta un mejor ajuste que los otros dos modelos (Langmuir y Freundlich). El valor de $n < 1$ indica que el HG presenta una superficie heterogénea involucrando diferentes cavidades y dominios de la red polimérica con una adsorción no lineal y una distribución de la energía de adsorción a través del material tal y como se presenta en materiales tridimensionales (Ab Aziz et al., 2025.; Vieira et al., 2020). La capacidad máxima del adsorbente obtenida fue de 12.97 mg/g , la cual es equiparable a otro tipo de materiales de esta naturaleza tal y como se muestra en la Tabla 8. Esto lo convierte en una alternativa para llevar a cabo la adsorción de plomo en sistemas acuosos.

Tabla 8. Capacidades de adsorción de plomo de diversos adsorbentes

Material	Capacidad máxima de adsorción mg/g
Hidrogel a base de hemicelulosa	5.88 (Lian et al.,2018)
Microgeles termosensibles inmovilizados en grafeno magnético (MGO-PNB)	11.76 (Pan et al., 2019)
Hidrogel de acrilamida/MBA modificado con pAl	12.97 (este trabajo)
Perlas de hidrogel de carboximetilcelulosa/quitosano/Fe ₃ O ₄	18.26 (Sarbani et al., 2023)
Nanoiones de hidrogel de Fe ₃ O ₄ / quitosano/acrilamida (CMC-CS- Fe ₃ O ₄)	31.74 (Mamaghani et al., 2023)
Aerogel de carbon	34.72 (Kadirvelu et al., 2008)

Por otra parte, el ajuste del modelo de Dubinin-Radushkevich presentó un coeficiente de correlación elevado ($R^2=0.999$), lo cual confirma que la adsorción ocurre en sitios internos de la matriz, mientras que el valor de energía calculado ($E=8.27 \text{ kJ/mol}$) indica que se realiza una adsorción química entre el analito y la superficie del HG lo cual concuerda con lo obtenido en el punto de carga cero.

Tabla 9. Constantes de las diferentes isotermas de adsorción (Langmuir, Freundlich, Sips y Dubinin Radushkevich) del proceso de adsorción de Pb (II) empleando el HC.

Isoterma	Parámetro
Langmuir	q_o 14.32 mg/g
	K_L 0.02 L/mg
	R^2 0.995
Freundlich	K_F 5.33 L/g
	n_o 3.13
	R^2 0.997
Sips	Q_s 12.97 mg/g
	K_s 0.001 L/mg
	n_s 0.56
	R^2 0.999
Dubinin Radushkevich	β -0.0073 mol ² /J ²
	E 8.27 KJ/mol
	R^2 0.999

4.2.5 Modelado cinético de adsorción

Los modelos cinéticos permiten conocer cómo se lleva a cabo el proceso de adsorción siendo los más comunes el modelo de pseudoprimer orden, PFO (de Lagergren), el modelo de pseudosegundo orden PSO (de Ho), el modelo de difusión intrapartícula y el modelo de Weber-Morris. Es importante considerar que la adsorción se puede llevar a cabo en las siguientes etapas (Krstić, 2021).

- *Transferencia de masa externa (teoría de la película)*: transporte del analito desde el líquido hasta la superficie del adsorbente.
- *Difusión interna*: paso del analito a través del adsorbente.
- *Unión*: interacción entre el analito y el adsorbente debido a la formación de enlaces físicos o químicos.

Tanto el modelo de PFO como el de PSO asumen que la velocidad global de adsorción depende de la velocidad de unión (Krstić, 2021). Específicamente el PFO describe que la velocidad de adsorción depende de la relación que existe entre la adsorción del adsorbato y el adsorbente en el equilibrio, la cual permite relacionar los sitios activos libres del adsorbente sin que se identifique normalmente a la velocidad real como el paso limitante por lo que se considera al PSO como una herramienta empírica en la representación de la cinética de adsorción (Ezzati et al., 2024; Chu et al., 2025; Pooresmaeil & Namazi, 2019).

El PFO describe una ecuación no reversible donde el intercambio entre el adsorbente y el adsorbato es un paso limitante de la velocidad de adsorción (Pooresmaeil & Namazi, 2019). Algunos de los supuestos considerados en este modelo son (Largitte & Pasquier, 2016):

- La adsorción se da solo en los sitios activos sin que exista interacción entre el analito.
- La energía de adsorción no depende de la “cobertura” de la superficie.
- La adsorción máxima corresponde a una monocapa saturada por el analito
- La concentración del analito se considera constante

La evaluación de ambos modelos (Tabla 9) muestra que el proceso de adsorción se ajusta a un modelo de pseudo primer orden, lo cual indicaría que la velocidad de adsorción depende de los sitios libres disponibles en el adsorbente lo que permite la formación de una monocapa o multicapa del metal anclado, lo que corresponde a un proceso de fisisorción. Lo anterior podría ser contradictorio con lo obtenido en la isoterma de Dubinin Radushkevich, sin embargo, esto sería un indicativo de que la adsorción también se puede dar por las interacciones intermoleculares que se presentan entre el plomo y el adsorbente debido al hinchamiento del HC (Vieira et al., 2020).

Tabla 10. Parámetros cinéticos del proceso de adsorción de Pb (II) empleando el HC.

Modelo	Parámetro
Pseudo-primer orden	q_e 0.16 mg/g
	K_1 $1.83 \times 10^{-5} \text{ min}^{-1}$
	R^2 0.909
Pseudo-segundo orden	q_e 63.29 mg/g
	K_L $1.20 \times 10^{-5} \text{ g} / \text{mg} \cdot \text{min}$
	R^2 0.723

Por otro lado, el modelo de difusión intrapartícula de Weber y Morris (IPD) permite evaluar la competencia que existe en el proceso de adsorción. Los modelos de difusión se basan en tres pasos consecutivos (Qiu, et. al., 2009):

- La difusión externa o pelicular la cual consiste en la difusión a través de la película de líquido que rodea las partículas adsorbentes
- La difusión interna o intrapartícula la cual consiste en la difusión en los poros o a lo largo de sus paredes del adsorbente
- La adsorción y desorción entre el adsorbato y los sitios activos

Los resultados del IPD (Figura 18) mostraron tres secciones lineales las cuales muestran los tres pasos de la adsorción del Pb (II) en el HC, siendo la transferencia del analito a los sitios activos que se encuentran más accesibles en la superficie y en las cavidades de mayor diámetro que se encuentran cerca (difusión externa) la más rápida (Markovski et al., 2013)

Por otro lado, la difusión intrapartícula es el paso limitante debido probablemente a la heterogeneidad de la superficie. Es importante mencionar que al no partir del origen es probable que también exista una limitación debida a la difusión en la película después de cierto tiempo (Markovski et al., 2013).

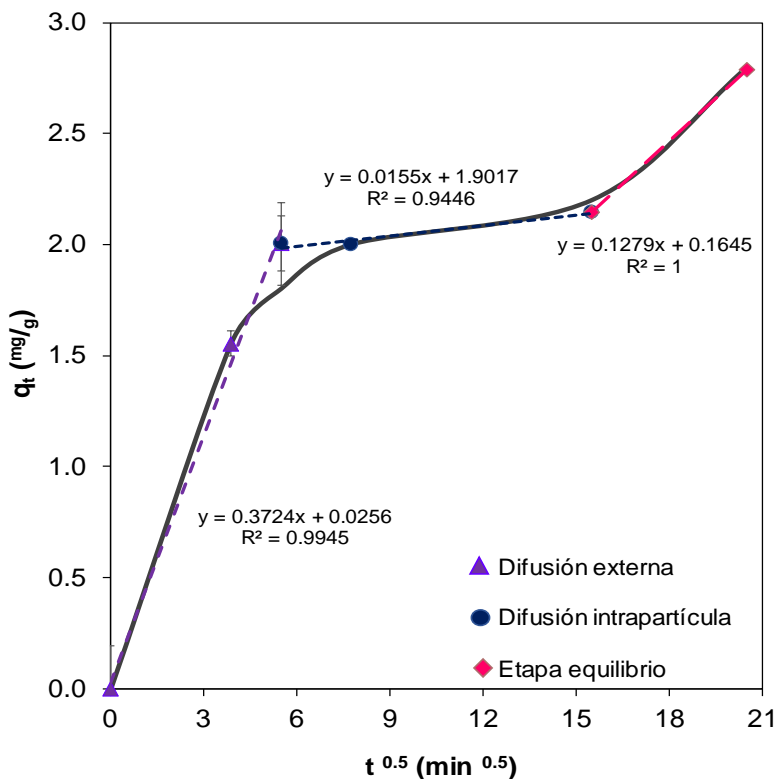


Figura 20. Modelo IPD del proceso de adsorción de Pb (II) empleando el HC. Condiciones experimentales: 0.1 g de HC, pH= 7, tiempo de contacto 1h.

4.3 Muestra sintética

Ya que uno de los objetivos de este trabajo es la implementación del HC para la adsorción de plomo en matrices complejas se evaluó su capacidad de adsorción frente a una muestra sintética proveniente de la industria de baterías. Lo anterior debido a que las baterías de ácido-plomo son de las más utilizadas debido a su bajo costo y alto rendimiento (Blumbergs et al., 2021). Los resultados arrojaron un porcentaje de adsorción del $41.79\% \pm 2.14$ del Pb (II) en la muestra, mientras que en un sistema ideal el porcentaje de adsorción fue del $85.83 \pm 2.31\%$. La disminución en el porcentaje de adsorción puede atribuirse a que existe una competencia entre los diversos metales presentes en la muestra por los sitios activos del HC ya que las pAI han sido empleadas para la eliminación de cromo (Zaidi et. al., 2021), cadmio, cobre (Wang et. al., 2015), níquel (Sharma et. al., 2008).

Lo anterior representa una ventaja desde el punto de vista del tratamiento de aguas residuales reales, ya que indica la posibilidad de remover simultáneamente diversos metales pesados presentes en el efluente.



5

CONCLUSIONES

5. Conclusiones

- Fue posible sintetizar un hidrogel composite de acrilamida/N,N'-metilenbisacrilamida con partículas de aluminio que permite la adsorción de plomo presente en una muestra de agua proveniente de una industria de baterías.
- La composición del HC desarrollado que permitió la mayor adsorción de Pb (II) fue 20% m/v de AC y 2% m/v MBA con el 4% m/v de pAl en la solución casting.
- El HC fue caracterizado por microscopía óptica e IR, demostrando la correcta inmovilización de las partículas de aluminio dentro de este.
- Las mejores condiciones que permitieron la adsorción de plomo en muestras acuosas fueron: 0.1 g de HC, 60 min de tiempo de contacto y pH \approx 7.
- El proceso de adsorción fue descrito por el modelo de isoterma de Sips indicando la presencia de una superficie heterogénea y una capacidad de adsorción máxima de 12.97 mg/g mediante una adsorción química.
- El HC desarrollado permite la eliminación de plomo y otros metales presentes en el agua de la industria de baterías lo cual abre una ventana de oportunidad para el tratamiento de este tipo de efluentes.



6

REFERENCIAS

6. Referencias

- Ab Aziz, M. S., Shoparwe, N. F., & Yusoff, A. H. (2025). Comparative Evaluation of Strong Base Anion Exchange Resin and Activated Carbon for Gold Cyanide Recovery Using Isotherm Modelling. *Malaysian Journal of Bioengineering and Technology*, 2(2), 79–88. <https://doi.org/10.70464/mjbet.v2i2.1613>
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). (2007, agosto). Perfil toxicológico del plomo (Pb) [Ficha en español]. U.S. Department of Health and Human Services. https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs13.html
- Ahmed, E. M. (2015). Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of Advanced Research*, 6(2), 105–121. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.07.006>
- Akhtar, M. F., et al. (2016). Methods of synthesis of hydrogels: A review. *Journal of King Saud University-Science*, 28(3), 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2015.06.005>
- Alaqarbeh, M. (2021). Adsorption Phenomena: Definition, Mechanisms, and Adsorption Types: Short Review. *RHAZES: Green and Applied Chemistry*, 13, 43–51. <https://doi.org/10.48419/imist.prsm/rhazes-v13.28283>
- Alharby, N. F., Almutairi, R. S., & Mohamed, N. A. (2021). Adsorption Behavior of Methylene Blue Dye by Novel CrossLinked O-CM-Chitosan Hydrogel in Aqueous Solution: Kinetics, Isotherm and Thermodynamics. *Polymers*, 13(21), 3659. <https://doi.org/10.3390/polym13213659>
- Alraddadi, H. M., Fagieh, T. M., Bakhsh, E. M., Akhtar, K., Khan, S. B., Khan, S. A., Bahaidarah, E., & Homdi, T. A. (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>
- Bharskar, G. (2020). A review on hydrogel. *World Journal of Pharmaceutical and Pharmaceutical Sciences*, 9(7), 1288-1298. DOI: 10.20959/wjpps20207-16602
- Bashir, S., Hina, M., Iqbal, J., Rajpar, A. H., Mujtaba, M. A., Alghamdi, N. A., Wageh, S., Ramesh, K., & Ramesh, S. (2020). Fundamental Concepts of Hydrogels: Synthesis, Properties, and Their Applications. *Polymers*, 12(11), 2702. <https://doi.org/10.3390/polym12112702>
- Benalia, M. C., Youcef, L., Bouaziz, M. G., Achour, S., & Menasra, H. (2021). Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewater by Chemical Precipitation:

- Mechanisms and Sludge Characterization. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(5), 5587–5599. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-05525-7>
- Blumbergs, E., Serga, V., Platacis, E., Maiorov, M., & Shishkin, A. (2021). Cadmium Recovery from Spent Ni-Cd Batteries: A Brief Review. *Metals*, 11(11), 1714. <https://doi.org/10.3390/met11111714>
- Bulutcu, H., Urucu, O. A., Birtane, H., & Çakmakçı, E. (2025). Thiol-Modified Halloysite-Containing Gelatin/Chitosan Composite Hydrogel Adsorbent for Mercury Removal From Aqueous Solutions. *Journal of Applied Polymer Science*, 142(47). <https://doi.org/10.1002/app.57818>
- Butun, S., & Sahiner, N. (2011). A versatile hydrogel template for metal nanoparticle preparation and their use in catalysis. *Polymer*, 52(21), 4834–4840. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2011.08.021>
- Ching, S. L., Yusoff, M. S., Aziz, H. A., & Umar, M. (2011). Influence of impregnation ratio on coffee ground activated carbon as landfill leachate adsorbent for removal of total iron and orthophosphate. *Desalination*, 279(1-3), 225-234. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.06.011>
- Chu, K. H., Bollinger, J., & Kierczak, J. (2025). Pseudo-first-order kinetics in environmental adsorption: Why are there two distinct equations? *Environmental Surfaces and Interfaces*, 3, 191–195. <https://doi.org/10.1016/j.esi.2025.07.001>
- Covaliu-Mierlă, C. I., Păunescu, O., & Iovu, H. (2023). Recent Advances in Membranes Used for Nanofiltration to Remove Heavy Metals from Wastewater: A Review. *Membranes*, 13(7), 643. <https://doi.org/10.3390/membranes13070643>
- 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>
- Derashri, A., Pandey, R. V., Palav, V. S., Bhandari, D. D., & Sharma, R. B. (2024). Hydrogels: A review. *En Futuristic trends in pharmacy and nursing* (Vol. 3, Book 19, Part 1, Chap. 8).
- Digne, M., Sautet, P., Raybaud, P., Toulhoat, H., & Artacho, E. (2002). Structure and Stability of Aluminum Hydroxides: A Theoretical Study. *The Journal Of Physical Chemistry B*, 106(20), 5155-5162. <https://doi.org/10.1021/jp014182a>
- Dolgormaa, A., Lv, C. J., Li, Y., Yang, J., Yang, J. X., Chen, P., Wang, H. P., & Huang, J. (2018). Adsorption of Cu(II) and Zn(II) Ions from Aqueous Solution by Gel/PVA-Modified Super-Paramagnetic Iron Oxide Nanoparticles. *Molecules*, 23(11), 2982. <https://doi.org/10.3390/molecules23112982>

- Du, F., Liu, L., Pan, Y., et al. (2023). A novel biochar-based composite hydrogel for removing heavy metals in water and alleviating cadmium stress in tobacco seedlings. *Scientific Reports*, 13, 15656. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41946-0>
- El Sayed, M. M. (2023). Producción de compuestos de hidrogel polimérico y sus aplicaciones. *Journal of Polymers and the Environment*, 31, 2855–2879. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02796-z>
- Ezzati, R., Azizi, M., & Ezzati, S. (2024). A theoretical approach for evaluating the contributions of pseudo-first-order and pseudo-second-order kinetics models in the Langmuir rate equation. *Vacuum*, 222, 113018. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2024.113018>
- Gholizadeh, Z., Aliannezhadi, M., Ghominejad, M., et al. (2023). Nanopartículas de γ - Al_2O_3 de alta superficie específica sintetizadas mediante un método de coprecipitación sencillo y económico. *Scientific Reports*, 13, 6131. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33266-0>
- Giacomazzi, L., Shcheblanov, N. S., Povarnitsyn, M. E., et al. (2023). Infrared spectra in amorphous alumina: a combined ab initio and experimental study. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2304.14090>
- Güçlü, G., Al, E., Emik, S., et al. (2010). Removal of Cu^{2+} and Pb^{2+} ions from aqueous solutions by starch-graft-acrylic acid/montmorillonite superabsorbent nanocomposite hydrogels. *Polymer Bulletin*, 65, 333–346. <https://doi.org/10.1007/s00289-009-0217-x>
- Gusain, R., Kumar, N., & Ray, S. S. (2019). Recent advances in carbon nanomaterial-based adsorbents for water purification. *Coordination Chemistry Reviews*, 405, 213111. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2019.213111>
- Iizawa, T., Taketa, H., Maruta, M., Ishido, T., Gotoh, T., & Sakohara, S. (2007). Synthesis of porous poly(N-isopropylacrylamide) gel beads by sedimentation polymerization and their morphology. *Journal of Applied Polymer Science*, 104(2), 842–850. <https://doi.org/10.1002/app.25605>
- Jadaa, W., & Mohammed, H. K. (2023). Toxic Heavy Metals Elimination from Contaminated Effluents Utilizing Various Adsorbents: Critical Mini-Review. *JBR Science*, 4(2), 281–296. <https://doi.org/10.37871/jbres1673>
- Kadirvelu, K., Goel, J., & Rajagopal, C. (2008). Sorption of lead, mercury and cadmium ions in multi-component system using carbon aerogel as adsorbent. *Journal of Hazardous Materials*, 153(1-2), 502-507. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.08.082>
- Krstić, V. (2021). Role of zeolite adsorbent in water treatment. En Elsevier eBooks (pp. 417–481). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821496-1.00024-6>

- Kyzas, G. Z., & Matis, K. A. (2018). Flotation in Water and Wastewater Treatment. *Processes*, 6(8), 116. <https://doi.org/10.3390/pr6080116>
- Largitte, L., & Pasquier, R. (2016). A review of the kinetics adsorption models and their application to the adsorption of lead by an activated carbon. *Process Safety and Environmental Protection*, 109, 495–504. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.02.006>
- Li, S., & Chen, G. (2018). Using hydrogel-biochar composites for enhanced cadmium removal from aqueous media. *Material Science & Engineering International Journal*, 2(6). <https://doi.org/10.15406/mseij.2018.02.00073>
- Lian, Y., Zhang, J., Li, N. & Ping, Q. (2018). Preparation of hemicellulose-based hydrogel and its application as an adsorbent towards heavy metal ions. *BioResources*, 13(2), 3208–3218. <https://doi.org/10.15376/biores.13.2.3208-3218>
- Lucas, M. S., Teixeira, A. R., Jorge, N., & Peres, J. A. (2025). Industrial Wastewater Treatment by Coagulation–Flocculation and Advanced Oxidation Processes: A Review. *Water*, 17(13), 1934. <https://doi.org/10.3390/w17131934>
- Lu, J., Wu, X., Li, Y., Liang, Y., & Cui, W. (2019). Facile Fabrication of 3D Graphene–Silica Hydrogel Composite for Enhanced Removal of Mercury Ions. *Nanomaterials*, 9(3), 314. <https://doi.org/10.3390/nano9030314>
- Maji, S., & Lee, H. (2022). Engineering Hydrogels for the Development of Three-Dimensional In Vitro Models. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(5), 2662. <https://doi.org/10.3390/ijms23052662>
- Mamaghani, A. S., Manafi, M., & Hojjati, M. (2023). Pb²⁺ recovery from real water samples by adsorption onto nano Fe₃O₄/chitosan-acrylamide hydrogel. *IET Nanobiotechnology*, 17(4), 337–351. <https://doi.org/10.1049/nbt2.12126>
- Markovski, J. S., Marković, D. D., Đokić, V. R., et al. (2013). Arsenate adsorption on waste eggshell modified by goethite, α-MnO₂ and goethite/α-MnO₂. *Chemical Engineering Journal*, 237, 430–442. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.10.031>
- Mashkoo, F., & Nasar, A. (2020). Magsorbents: Potential candidates in wastewater treatment technology – A review on the removal of methylene blue dye. *Journal Of Magnetism And Magnetic Materials*, 500, 166408. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166408>
- Mihaylov, M., Zdravkova, V., Ivanova, E., et al. (2020). Infrared spectra of surface nitrates: Revision of the current opinions based on the case study of ceria. *Journal of Catalysis*, 394, 245–258. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2020.06.015>

- More, A. P., & Chapekar, S. (2023). Irradiation assisted synthesis of hydrogel: A Review. *Polymer Bulletin*, 81(7), 5839-5908. <https://doi.org/10.1007/s00289-023-05020-z>
- Muñoz-Martinez, M. X., Macías-Quiroga, I. F., & Sanabria-González, N. R. (2024). Adsorption of Cr(VI) Using Organoclay/Alginate Hydrogel Beads and Their Application to Tannery Effluent. *Gels*, 10(12), 779. <https://doi.org/10.3390/gels10120779>
- Naidu, R., Bolan, N. S., Kookana, R. S., & Tiller, K. G. (1994). Ionic-strength and pH effects on the sorption of cadmium and the surface charge of soils. *European journal of soil science*, 45(4), 419-429.
- Nnadi, F., & Brave, C. (2011). Environmentally friendly superabsorbent polymers for water conservation in agricultural lands. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 2(7), 206-211.
- Pan, L., Zhai, G., Yang, X., Yu, H., & Cheng, C. (2019). Thermosensitive Microgels-Decorated Magnetic Graphene Oxides for Specific Recognition and Adsorption of Pb(II) from Aqueous Solution. *ACS Omega*, 4(2), 3933-3945. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b03539>
- Peppas, N. A., & Hoffman, A. S. (2013). Classes of materials used in medicine. En B. D. Ratner et al. (Eds.), *Biomaterials science: An introduction to materials in medicine* (3rd ed., pp. 1–9). Academic Press.
- Pereira, A. G., Rodrigues, F. H., Paulino, A. T., Martins, A. F., & Fajardo, A. R. (2020). Recent advances on composite hydrogels designed for the remediation of dye-contaminated water and wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 284, 124703. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124703>
- Pereira, S. K., Kini, S., Prabhu, B., & Jeppu, G. P. (2022). A simplified modeling procedure for adsorption at varying pH conditions using the modified Langmuir–Freundlich isotherm. *Applied Water Science*, 13(1). <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01800-6>
- Ponnaiah, G. P., Lakshmi, S., Sivalingam, A. B. L. S., & Sivalingam, S. (2024). A review of current practices on lead ions removal from different aqueous streams. *Brazilian Journal of Development*, 10(3), e68334. <https://doi.org/10.34117/bjdv10n3-062>
- Pooresmaeil, M., & Namazi, H. (2019). Application of polysaccharide-based hydrogels for water treatments. En Elsevier eBooks (pp. 411–455). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816421-1.00014-8>
- Pourret, O., Bollinger, J.-C., & Hursthouse, A. (2021). Heavy metal: a misused term? *Acta Geochimica*, 40, 466–471. <https://doi.org/10.1007/s11631-021-00468-0>

- Qasem, N. A. A., Mohammed, R. H., & Lawal, D. U. (2021). Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review. *npj Clean Water*, 4(1). <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0>
- Qiu, H., Lv, L., Pan, B. C., Zhang, Q. J., Zhang, W. M., & Zhang, Q. X. (2009). Critical review in adsorption kinetic models. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 10(5), 716-724. <https://doi.org/10.1631/jzus.A0820524>
- Ray, S. S., Gusain, R., & Kumar, N. (2020). Adsorption in the context of water purification. En *Water purification* (pp. 67–100). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821959-1.00004-0>
- Ramirez, A., Benítez, J. L., Rojas de Astudillo, L., & Rojas de Gáscue, B. (2016). Materiales polimeros de tipo hidrogeles: revisión sobre su caracterización mediante ftir, dsc, meb y met. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 36(2), 108-130. Recuperado en 20 de febrero de 2026, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0255-69522016000200002&lng=es&tlng=es.
- Ringbom, A. (1963). *Formación de complejos en química analítica*. Madrid, España: Editorial Alhambra.
- Rodríguez, D. (2017). Intoxicación ocupacional por metales pesados. *MEDISAN*, 21(12), 3372-3385. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1029-30192017001200012&lng=es&tlng=es.Herrera
- Sabbagh, F., & Muhamad, I. I. (2017). Physical and Chemical Characterisation of Acrylamide-Based Hydrogels. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 27(5), 1439–1449. <https://doi.org/10.1007/s10904-017-0599-4>
- Sarbani, N. M. M., Hidayat, E., Naito, K., Mitoma, Y., & Harada, H. (2023). Cr(VI) and Pb(II) Removal Using Crosslinking Magnetite-CMC-Chitosan Hydrogel Beads. *Gels*, 9(8), 612. <https://doi.org/10.3390/gels9080612>
- Santoni, N., Matos Ruiz, M., Muller-Karger, C., et al. (2008). Caracterización de hidrogeles de quitosano entrecruzados covalentemente con genipina. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 9(3), 326–330.
- Sharma, Y. C., Srivastava, V., Upadhyay, S. N., & Weng, C. H. (2008). Alumina nanoparticles for the removal of Ni (II) from aqueous solutions. *Industrial & engineering chemistry research*, 47(21), 8095-8100. <https://doi.org/10.1021/ie800831v>
- Şenol, Z. M., & Arslanoğlu, H. (2024). Influential biosorption of lead ions using sand leek biomass. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(6), 8809–8819. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05539-9>

- Siddiqua, A., Ranjha, N. M., Rehman, S., et al. (2021). Preparation and characterization of MBA-crosslinked pectin/acrylamide hydrogels. *Polymer Bulletin*, 79(9), 7655–7677. <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03870-z>
- Sievers, J., Sperlich, K., Stahnke, T., Kreiner, C., Eickner, T., Martin, H., Guthoff, R. F., Schünemann, M., Bohn, S., & Stachs, O. (2020). Determination of hydrogel swelling factors by two established and a novel non-contact continuous method. *Journal Of Applied Polymer Science*, 138(18). <https://doi.org/10.1002/app.50326>
- Sikdar, P., Uddin, M. M., Dip, T. M., et al. (2021). Recent advances in the synthesis of smart hydrogels. *Materials Advances*, 2(14), 4532–4573. <https://doi.org/10.1039/d1ma00193k>
- Soto, D., & Oliva, H. (2012). Métodos para preparar hidrogeles químicos y físicos basados en almidón: Una revisión. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 32(2), 154-175. Recuperado en 21 de febrero de 2026, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0255-69522012000200002&lng=es&tlng=es.
- Susial, A. B., Wardani, N. F., Mohar, R. S., Yudasari, N., Arkundato, A., Suhendar, H., Nasbey, H., Basori, I., Tiam, T.S. & Sugihartono, I. (2026). The Influence of pH on Structural, Morphological, and Optical Properties of Al₂O₃ Nanoparticles Synthesized by Syzygium aromaticum Leaf Extract. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 27(2). <https://doi.org/10.55981/jsmi.2026.10067>
- Thoniyot, P., Tan, M. J., Karim, A. A., Young, D. J., & Loh, X. J. (2015). Nanoparticle–Hydrogel Composites. *Advanced Science*, 2(1–2), 1400010. <https://doi.org/10.1002/advs.201400010>
- Vergili, I., Gönder, Z.B., Kaya, Y., Gürdağ, G. & Çavuş. S. (2017). Sorption of Pb (II) from battery industry wastewater using a weak acid cation exchange resin. *Process Safety And Environmental Protection*, 107, 498-507. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.03.018>
- Vieira, T., Artifon, S. E. S., Cesco, C. T., et al. (2020). Chitosan-based hydrogels for the sorption of metals and dyes. *Colloid & Polymer Science*, 299(4), 649–662. <https://doi.org/10.1007/s00396-020-04786-2>
- Vo, T. S., Hossain, M. M., Jeong, H. M., et al. (2020). Heavy metal removal applications using adsorptive membranes. *Nano Convergence*, 7, 36. <https://doi.org/10.1186/s40580-020-00245-4>
- World Health Organization. (2024). Intoxicación por plomo y salud. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>
- World Health Organization. (2025). Chemical safety and health. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240112384>

- Wang, W., Qiao, Z., Zhou, L., Ding, Z., Wang, H., Wang, X., Sun, X., & Hua, Y. (2015). Study of the adsorption of Cu^{2+} , Cd^{2+} and Pb^{2+} on amorphous $\text{Al}(\text{OH})_3$ in drinking water supply networks. *Environmental Engineering and Management Journal*, 14(12), 2829-2835.
- Xiang, Y., & Chen, D. (2007). Preparation of a novel pH-responsive silver nanoparticle composite hydrogel. *European Polymer Journal*, 43(10), 4178–4187. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2007.08.005>
- Yassin, M. T., Mostafa, A. A., Al-Askar, A. A., & Al-Otibi, F. O. (2022). Facile Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using Aqueous Leaf Extract of *Origanum majorana* with Potential Bioactivity against Multidrug Resistant Bacterial Strains. *Crystals*, 12(5), 603. <https://doi.org/10.3390/cryst12050603>
- Zaidi, R., Khan, S. U., Farooqi, I. H., & Azam, A. (2021). Rapid adsorption of Pb (II) and Cr (VI) from aqueous solution by Aluminum hydroxide nanoparticles: Equilibrium and kinetic evaluation. *Materials Today: Proceedings*, 47, 1430-1437. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.224>
- Zhang, Y., Wang, Y., Guo, L., et al. (2024). Lithium-Ion-Sieve Hydrogel Based on Aluminum Doping. *Gels*, 10(11), 710. <https://doi.org/10.3390/gels10110710>
- Zhang, Y., Zhou, Y., & Li, M. (2021). Functional group modified hydrogels for heavy metal removal: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105458. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105458>
- Zheng, Y., Dou, J., Wang, Y., Zhu, L., Yao, G., Kim, Y. H., & Wu, J. Y. (2022). Sustained release of a polymeric wetting agent from a silicone-hydrogel contact lens material. *ACS Omega*, 7(33), 29223–29230. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03310>