

Nanocompositos magnéticos (biochar+magnetita y biochar+magnetita/ZnO) para remover contaminantes en agua: Caso de estudio con Cr(VI)

Magnetic nanocomposites (biochar+magnetite and biochar+magnetite/ZnO) for the removal of contaminants in water: A case study with Cr (VI)

Jovanna Zapien-Gómez¹, Elsy Vásquez-Reyez¹, Mauricio Pozuelo-Rivera¹, Andrés M. Zorrilla-Romo¹, Edith A. Flores-Bastida¹, Oscar D. Guzmán-García¹, Judith E. Gutiérrez-Arredondo¹, Edgar Vázquez-Núñez^{1,*}

¹ Grupo de Investigación sobre Aplicaciones Nano y Biotecnológicas para la Sostenibilidad (NanoBioTS). Departamento de Ingenierías Química, Electrónica y Biomédica, División de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Guanajuato, León, Guanajuato, México. Loma del Bosque 103, Lomas del Campestre, C.P. 37150.

j.zapiengomez@ugto.mx; e.vasquezreyes@ugto.mx; mpozuelosrivera@ugto.mx; zorrillara2021@licifuq.ugto.mx; ea.floresbastida@ugto.mx; od.guzmangarcia@ugto.mx; gutierrezjudith2013.ig@gmail.com; edgar.vazquez@ugto.mx

Resumen

El acceso a agua limpia y segura es esencial para la salud humana y el medio ambiente. Sin embargo, la contaminación del agua por metales pesados y otros contaminantes se ha convertido en un problema global significativo. Para abordar esta preocupante cuestión, los científicos han estado investigando materiales avanzados y tecnologías de remediación. En este contexto, los nanocompositos magnéticos han surgido como una prometedora solución debido a sus propiedades únicas y versatilidad en la eliminación de contaminantes en agua.

Este estudio se centra en los nanocompositos magnéticos a base de biochar y magnetita, así como la combinación de biochar y magnetita con ZnO. Estos nanomateriales tienen la capacidad de adsorber metales pesados y otros contaminantes, lo que los convierte en candidatos potenciales para la remoción eficiente de Cr(VI) del agua.

Además, la adición de ZnO a la mezcla de biochar y magnetita puede mejorar aún más la eficiencia de remoción de contaminantes debido a las propiedades fotocatalíticas del ZnO. La combinación de adsorción y fotocátalisis permite una eliminación más completa y rápida de los contaminantes, lo que aumenta la efectividad de los nanocompositos magnéticos en la purificación del agua.

Para evaluar la efectividad de estos nanocompositos en la remoción de Cr(VI) en agua, los investigadores realizaron un caso de estudio en el que se expusieron las muestras de agua contaminada con Cr(VI) a los nanocompositos magnéticos. Los resultados mostraron una alta capacidad de adsorción, lo que resultó en una rápida disminución de la concentración de Cr(VI) en el agua tratada.

Nuestro estudio destaca el potencial de los nanocompositos magnéticos a base de biochar y magnetita, así como su combinación con ZnO, como una solución prometedora para la eliminación de contaminantes en agua, especialmente en el caso de Cr(VI). Estos nanomateriales podrían ser una herramienta efectiva para abordar los desafíos relacionados con la contaminación del agua, contribuyendo así a proteger la salud pública y preservar el medio ambiente.

Es importante destacar que se necesitan más investigaciones para comprender completamente el comportamiento de estos nanocompositos en diferentes condiciones y para garantizar su seguridad ambiental y sanitaria a largo plazo. Además, la viabilidad a gran escala de esta tecnología debe ser evaluada para su posible implementación a nivel industrial y en sistemas de tratamiento de agua a gran escala. Con el continuo avance en la ciencia y la ingeniería de nanomateriales, es probable que los nanocompositos magnéticos desempeñen un papel crucial en la purificación y conservación del agua en el futuro.

Palabras clave: Residuos agrícolas no convencionales; *Ricinus communis*; biocarbón; nanocompositos

Introducción

El agua es un recurso vital para la supervivencia de todos los organismos en nuestro planeta. Desafortunadamente, la creciente actividad industrial ha llevado a la contaminación del agua, poniendo en riesgo la salud humana y la integridad de los ecosistemas acuáticos. Uno de los contaminantes más preocupantes es el cromo hexavalente (Cr(VI)), un compuesto químico altamente tóxico y carcinogénico. En León, Guanajuato, aún existen plantas curtidoras que emplean cantidades significativas de soluciones de Cr, que a menudo se descargan de manera irregular en los cuerpos de agua cercanos, generando un grave impacto ambiental (López, 2021).

La presencia de Cr(VI) en el agua potable y los cuerpos de agua cercanos a estas plantas curtidoras ha generado una creciente preocupación por los efectos negativos que puede tener en la salud humana y en los ecosistemas acuáticos. El Cr(VI) es conocido por su capacidad de causar daño genético, enfermedades respiratorias y cáncer en los seres humanos. Además, puede afectar a los organismos acuáticos, dañando su sistema respiratorio, afectando su reproducción y alterando el equilibrio ecológico de los ecosistemas (Zamora, s. f.).

En León, Guanajuato y otros sitios en México, a pesar de los esfuerzos para promover prácticas industriales más sostenibles, aún existen empresas que llevan a cabo procesos de curtiduría de piel utilizando sales de cromo (Cr), lo que representa una fuente significativa de contaminación del agua. Estas industrias liberan sus aguas residuales de manera descontrolada, lo que tiene graves consecuencias ambientales para los ecosistemas locales y sus componentes.

Por ejemplo, el proceso de curtido de piel con sales de cromo implica el uso de cromo hexavalente (Cr(VI)), un compuesto altamente tóxico y peligroso para el medio ambiente y la salud humana. Cuando estas empresas descargan sus aguas residuales sin un tratamiento adecuado, las altas concentraciones de Cr(VI) se liberan al medio ambiente y se infiltran en cuerpos de agua cercanos, como ríos y arroyos. Esto puede tener un impacto devastador en la calidad del agua y en los seres vivos que dependen de estos ecosistemas acuáticos.

Los efectos nocivos de la contaminación con Cr(VI) son bien conocidos. Este metal pesado puede bioacumularse en la cadena alimentaria, afectando a organismos acuáticos, como peces, crustáceos y otros animales acuáticos. Además, las aves y otros animales terrestres que dependen del agua contaminada también pueden sufrir las consecuencias de la contaminación a través del consumo de organismos afectados.

Los ecosistemas acuáticos son fundamentales para el equilibrio y la biodiversidad de la región. La contaminación por Cr(VI) puede alterar la flora y la fauna nativa, dañando hábitats y afectando la diversidad biológica. Además, los cuerpos de agua contaminados pueden afectar negativamente la calidad del agua para uso agrícola, industrial y doméstico, lo que tiene implicaciones directas para la salud y el bienestar de las comunidades locales (Perales Aguilar et al., 2020).

El trabajo titulado "Remoción eficiente de Cr(VI) en agua utilizando nanocompositos de biocarbón proveniente de residuos lignocelulósicos no convencionales (Biocarbón/Fe₃O₄+ZnO y Fe₃O₄)" cobra una relevancia particular en este contexto. La utilización de nanocompositos basados en biocarbón y óxidos metálicos, como Fe₃O₄ y ZnO, podría representar una alternativa sostenible para tratar las aguas residuales contaminadas con Cr(VI). Estos materiales podrían adsorber eficientemente el cromo hexavalente presente en el agua, permitiendo su remoción antes de que sea liberado al ambiente.

La aplicación de esta tecnología podría beneficiar no solo a las curtidurías, sino también a la comunidad en general, al reducir la contaminación del agua y preservar los ecosistemas acuáticos locales. Asimismo, el uso de residuos lignocelulósicos para producir biocarbón promovería prácticas más sostenibles y circulares, convirtiendo desechos en recursos valiosos.

En conclusión, es fundamental abordar la problemática de las descargas de aguas residuales de curtidurías en León, Guanajuato, y trabajar en conjunto para implementar alternativas sostenibles que minimicen los impactos ambientales negativos. La investigación y desarrollo de tecnologías de remoción de Cr(VI), como

los nanocompositos de biocarbón y óxidos metálicos, representa una vía prometedora para lograr este objetivo y construir un futuro más limpio y saludable para las generaciones presentes y futuras.

Materiales y métodos

A continuación, se explica el procedimiento empleado para la manufactura de los materiales probados en procesos adsorptivos por lote.

Adecuación de los residuos:

Los residuos de higuera, incluyendo cascarrillas y vainas, se recolectaron y sometieron a un proceso de adecuación previo antes de la pirolisis. Inicialmente, se llevaron a cabo dos etapas: secado y reducción de tamaño. Los residuos se secaron al aire libre hasta alcanzar una humedad adecuada. Posteriormente, los residuos secos se redujeron de tamaño mediante un triturado empleando un mortero con pistilo, con el objetivo de obtener partículas de tamaño uniforme y facilitar el proceso de pirolisis.

Preparación del biocarbón:

El biocarbón se obtuvo a través de la pirolisis de los residuos de higuera adecuados. Para ello, los residuos triturados se sometieron a un proceso de calentamiento en un horno a una temperatura de 700°C en una atmósfera controlada con presencia limitada de oxígeno. La ausencia de oxígeno durante la pirolisis aseguró la carbonización de la materia orgánica, resultando en la formación de biocarbón. Después del proceso de pirolisis, el biocarbón resultante fue enjuagado para eliminar impurezas y almacenado adecuadamente hasta su uso posterior.

Activación del biocarbón:

Para mejorar las propiedades de adsorción del biocarbón, se procedió a su activación utilizando una solución de ácido nítrico al 15%. El biocarbón fue sumergido en la solución de ácido nítrico y se dejó en contacto durante un período de 4 horas. La activación con ácido nítrico permitió la apertura de poros en el biocarbón, incrementando así su área superficial y su capacidad de adsorción.

Preparación de nanocompuestos de biocarbón+Fe₃O₄

La preparación de los nanocompuestos de biocarbón+Fe₃O₄ se realizó según lo reportado por Yuan et al., (2021) siendo adecuada como sigue, pesar 5 gramos de residuo de higuera previamente activado y preparar una solución de 6.7 gramos de FeCl₃ disuelta en 20 ml solución de agua destilada. Todos los componentes fueron mezclados durante 30 minutos para obtener una pasta homogénea. Posteriormente, la pasta fue sometida a una calcinación en un horno a una temperatura de 500°C durante 2 horas. El proceso de calcinación permitió la formación de los nanocompuestos de biocarbón+magnetita, los cuales poseen propiedades magnéticas debido a la presencia de la magnetita.

Preparación de nanocompuestos de biocarbón+ZnO/Fe₃O₄

La preparación de los nanocompuestos de biocarbón+ZnO/Fe₃O₄ se hizo según lo reportado por Yuan et al., (2021) y consistió en pesar 5 gramos de residuo de higuera previamente activado, 2.8 gramos de ZnCl₂ y 6.7 gramos de FeCl₃ en 20 ml de agua destilada. Estos componentes fueron mezclados durante 30 minutos para obtener una pasta homogénea. Posteriormente, la pasta fue sometida a una calcinación en un horno a una temperatura de 500°C durante 2 horas. El proceso de calcinación permitió la formación de los nanocompositos de biocarbón+ZnO/Magnetita, los cuales poseen propiedades magnéticas debido a la presencia de la magnetita y potencialmente fotocatalíticos por presencia de ZnO.

Caracterización de las muestras:

La caracterización preliminar del material incluyó la determinación del pH, conductividad electrolítica y morfología empleando microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés).

Para la determinación de pH y conductividad electrolítica se tomaron 0.5 g de biocarbón o nanocomposito y se disolvió con 20 mL de agua destilada. La mezcla se agitó durante 5 h, se filtró y al líquido remanente se le determinaron los valores de parámetros correspondientes

Montaje de las unidades experimentales y evaluación de los parámetros de adsorción

Preparación de la solución de Cr(VI)

Se preparó una solución de Cr(VI) utilizando dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) de grado analítico. Para ello, se disolvieron 0.015 gramos de dicromato de potasio en 1 litro de agua destilada, obteniendo así una solución de Cr(VI) con una concentración de 15 ppm (partes por millón). La solución fue agitada vigorosamente hasta obtener una homogeneidad adecuada. La solución se almacenó bajo condiciones de obscuridad y se preparó el mismo día de montaje experimental.

Montaje de las unidades experimentales

Se montaron unidades experimentales para evaluar la eficiencia de remoción de Cr(VI) utilizando diferentes materiales adsorbentes, incluyendo el biocarbón y los nanocompuestos de biocarbón+ZnO y biocarbón+ZnO/Magnetita.

En cada unidad experimental, se tomaron 50 ml de la solución de Cr(VI) y se agregaron los pesos previamente determinados de los materiales adsorbentes (1 g/L, 5 g/L, 10 g/L).

Agitación y toma de muestras

Una vez montadas las unidades experimentales, cada una fue colocada en una agitadora orbital a una velocidad constante de 100 rpm durante 3 horas. Se tomaron muestras a intervalos de tiempo específicos, a las 1 y 3 horas, respectivamente, para analizar la eficiencia de remoción de Cr(VI) en función del tiempo de contacto entre el adsorbente y el adsorbato.

Determinación de Cr(VI) por espectrofotometría con 1,6 difenil carbazida (1,6 DFC)

La concentración de Cr(VI) en las muestras recolectadas se determinó utilizando la técnica de espectrofotometría con 1,6 DFC. Para ello, se utilizó un espectrofotómetro y se midió la absorbancia del complejo formado entre el Cr(VI) presente en la muestra y la 1,6 DFC a 520 nm. Esta reacción produce un complejo coloreado violáceo cuya intensidad de coloración es proporcional a la concentración de Cr(VI) en la solución. Se prepararon curvas de calibración utilizando soluciones de referencia de Cr(VI) a diferentes concentraciones conocidas para realizar una cuantificación precisa. El porcentaje de remoción se realizó según lo establecido por Wang et al., (2023).

Evaluación de parámetros de adsorción

Durante el proceso de adsorción, se evaluaron diversos parámetros para determinar su influencia en la eficiencia de remoción de Cr(VI):

Tipo de material adsorbente

Se comparó la eficiencia de adsorción entre el biocarbón y los nanocompuestos de biocarbón+ZnO y biocarbón+ZnO/Magnetita para determinar qué material presentaba una mayor capacidad de adsorción de Cr(VI).

Concentración del adsorbato

Se analizó cómo la concentración inicial de Cr(VI) en la solución afecta la capacidad de adsorción de los materiales, variando la concentración del adsorbato en el rango de estudio, i.e., 1 g/L, 5 g/L y 10 g/L.

Los resultados obtenidos de esta etapa experimental permitieron obtener información valiosa sobre la eficiencia de los materiales adsorbentes en la remoción de Cr(VI) y determinar las condiciones óptimas para su aplicación en futuros procesos de remediación de aguas contaminadas con Cr(VI). La valorización de los residuos de higuera mediante su transformación en biocarbón y nanocompuestos representa una solución sostenible y efectiva para el tratamiento de aguas contaminadas y contribuye a la gestión adecuada de los residuos agrícolas, en línea con los principios de la economía circular.

6.5.3. Fuerza iónica

Se evaluó el efecto de la concentración de iones en la solución de Cr(VI) afecta la adsorción del contaminante, variando la concentración de electrolitos para estudiar su influencia en la capacidad de adsorción. La solución empleada para esta prueba fue NaCl a concentraciones de 0.01 M, 0.1 M, 1 M y 5M, respectivamente.

Resultados y discusión

Caracterización de los materiales

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Los materiales sintetizados fueron analizados morfológicamente empleando técnicas de microscopía. El biocarbón manufacturado a 300 °C, 500 °C y 700 °C fue analizado observando que la temperatura tiene un efecto importante sobre la presencia de poros y rugosidad de los mismo. Se observa en la Fig. 1 que el biocarbón pirolizado a menor temperatura muestra poros de mayor tamaño; se observa que el material sintetizado a 700 °C (Fig. 1c) ofrece una superficie con poros de mayor tamaño en promedio y una superficie mas rugosa, lo que podría permitir una mejor adsorción del Cr(VI). La distribución del tamaño de poro entre el material manufacturado a 500 °C (Fig. 1b) y 700 °C no muestran diferencias importantes, por lo que se eligió el material hecho a 500 °C para las pruebas de adsorción posteriores.

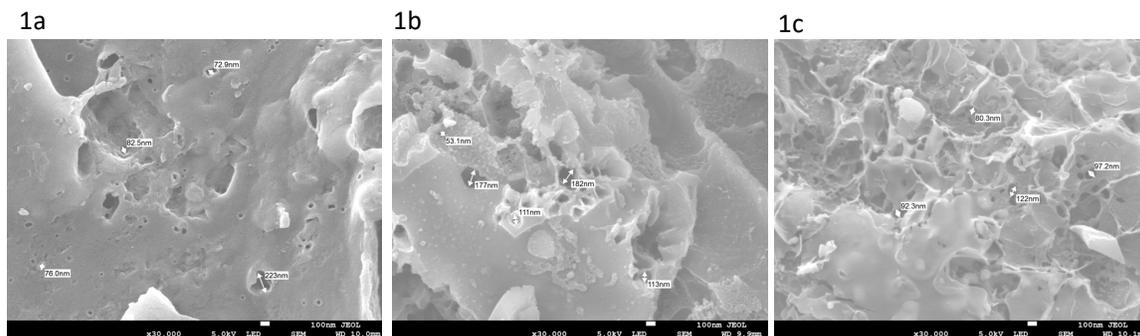


Figura 1. Morfología superficial de biocarbón sin activar a diferentes temperaturas de pirólisis, a) 300 °C, b) 500 °C y, c) 700 °C.

El biocarbón obtenido a 500 °C sometido a un proceso de activación química con ácido nítrico muestra mayor número de poros visibles y una superficie significativamente más limpia que el material sin activación. De esta manera se comprueba lo reportado en la literatura, donde se menciona que los procesos de activación química afectan positivamente la apariencia y estructura de la superficie. La Fig. 2 muestra la superficie de biocarbón manufacturado a 500 °C y sometido a un proceso de activación química

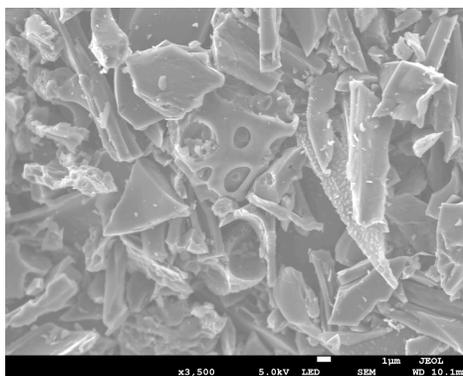


Figura 2. Morfología superficial de biocarbón activado con HNO_3 al 15%.

Con la intención de aumentar la eficiencia de recuperación del biocarbón posterior al uso de remoción, se sintetizaron composites de biocarbón+magnetita (Fig. 3a) y composites de biocarbón+magnetita/ZnO (Fig. 3b) para evaluar la contribución de procesos fotocatalíticos por efecto del ZnO.

Como puede observarse en las figuras, la distribución de los materiales metálicos sobre el biocarbón es homogénea. Es posible observar morfologías diferenciales entre las estructuras de Fe (forma de aguja) y Zn (formas esféricas), mismas que plantean la posibilidad de estudios posteriores para definir los parámetros de manufactura que han dirigido esta formación. La acción fotocatalítica de los materiales compositados no se determinó aún.

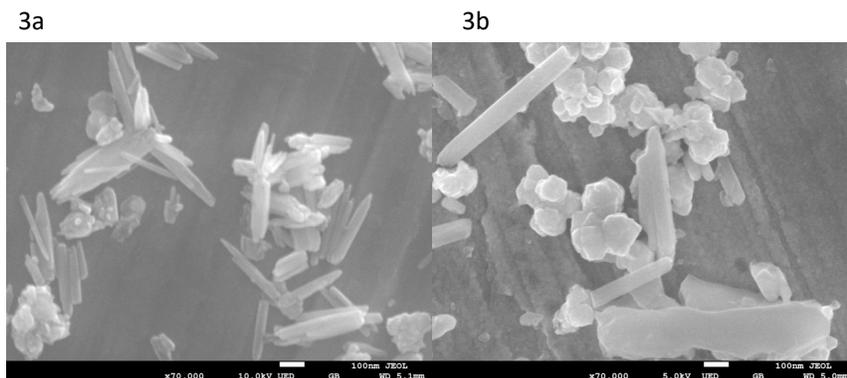


Figura 3. Micrografías de nanocompositos de 3a) biocarbón+magnetita y 3b) biocarbón+magnetita/ZnO

Determinación de pH y conductividad electrolítica de las muestras

En la Tabla 1 se mencionan los valores de pH y conductividad electrolítica de las muestras analizadas.

Tabla 1. Valores de pH y conductividad electrolítica de los materiales sintetizados

	pH	Conductividad electrolítica (dS m^{-1})
Biocarbón	10	1.5
Biocarbón activado	3.0	2
Nanocomposito biocarbón+Fe 3O_4	9	2.3
Nanocomposito biocarbón+Fe 3O_4 /ZnO	9	2.5

Es importante mencionar que los valores de pH obtenidos podrían influencias fuertemente sobre la eficiencia de adsorción del Cr(VI) en la solución acuosa. Se ha reportado que, a valores de solución ácidos, el proceso de adsorción es significativamente mayor que aquel observado a pH de neutro a básico.

Determinación de la eficiencia de remoción de Cr(VI) en medio líquido

Las unidades experimentales establecidas para el análisis de remoción de Cr(VI) fueron las siguientes:

BC: Consiste en la adición de biocarbón sin activar a la solución de Cr(VI)

BCA: Consiste en la adición de biocarbón químicamente activado con una solución diluida de ácido. Nítrico al 15% adicionado a la solución de Cr(VI)

BCM: Consiste en la adición del composito biocarbón+magnetita a la solución de Cr(VI)

BCMZn: Consiste en la adición del composito biocarbón+magnetita/ZnO a la solución de Cr(VI)

Las unidades experimentales fueron hechas por triplicado y los experimentos se realizaron a 25 °C, con toma de muestra a 1 y 3 horas. Las soluciones fueron ajustadas a pH 3 dado que a pH ácido se observa la mejor remoción del Cr(VI) según experimentos previamente ejecutados (Huang et al., 2019; Islam et al., 2019)

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada parámetro evaluado:

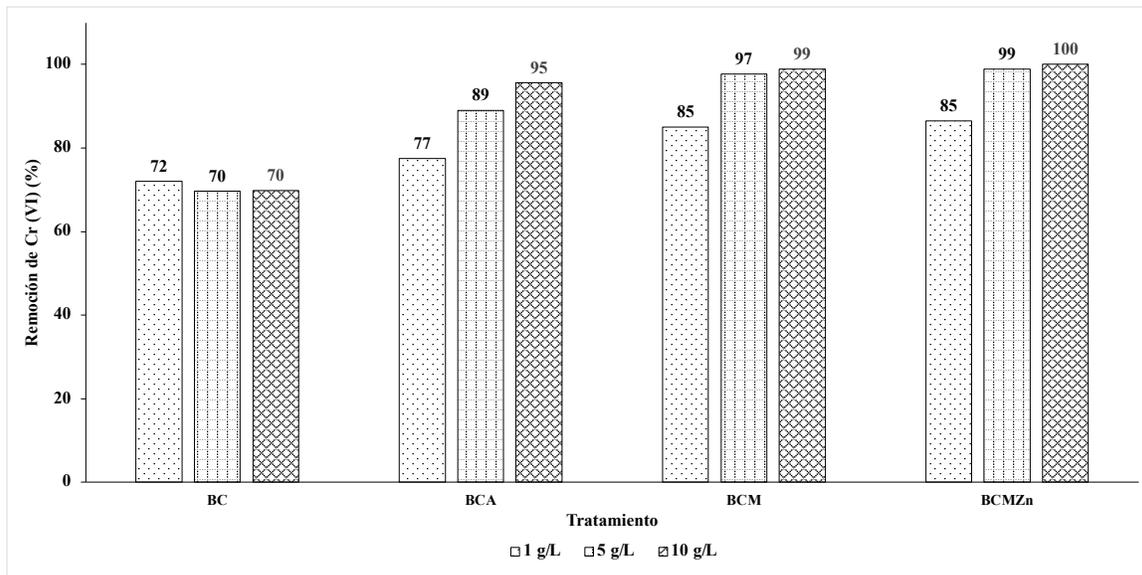
Efecto de la concentración inicial de adsorbente

En la Gráfica 1 se observa que la remoción de Cr(VI) es dependiente de la carga inicial de adsorbente i.e., 1 g/L, 5 g/L y 10 g/L. Se observa que el material adsorbente con mejor eficiencia de remoción empleando 10 g/L es el composito BCMZn, obteniendo el 100 % al final del tiempo de experimentación, seguido por BCM, BCA y BC, respectivamente. Esto nos hace pensar que la presencia de ZnO y magnetita podrían tener un efecto sinérgico sobre la adsorción y probablemente se lleven a cabo reacciones de reducción de Cr(VI) a Cr(III). La reducción es una reacción química en la cual un átomo, ion o molécula gana electrones. En este caso específico, el cromo hexavalente (Cr(VI)) tiene seis electrones en su capa de valencia, mientras que el cromo trivalente (Cr(III)) tiene tres electrones en su capa de valencia (Jiang et al., 2019; Li et al., 2023).

Durante el proceso de reducción, el cromo hexavalente pierde tres electrones y se convierte en cromo trivalente. Esta reacción generalmente se lleva a cabo mediante la transferencia de electrones de una especie química reductora (donadora de electrones) al cromo hexavalente, lo que resulta en la formación de cromo trivalente y una especie oxidada (que ha perdido electrones).

Se observa de igual manera que la activación con HNO₃ mejora significativamente (ca. 30%) la adsorción del Cr(VI) comparado con el biocarbón sin activación, el cual alcanza una saturación de su superficie con el 70% de remoción del adsorbato (Sun et al., 2023).

Serán necesarios desarrollar más experimentos con el fin de diferenciar el efecto de la presencia de nanopartículas de ZnO sobre el proceso de reducción del Cr(VI), así como del rol de la magnetita sobre el proceso global de adsorción.

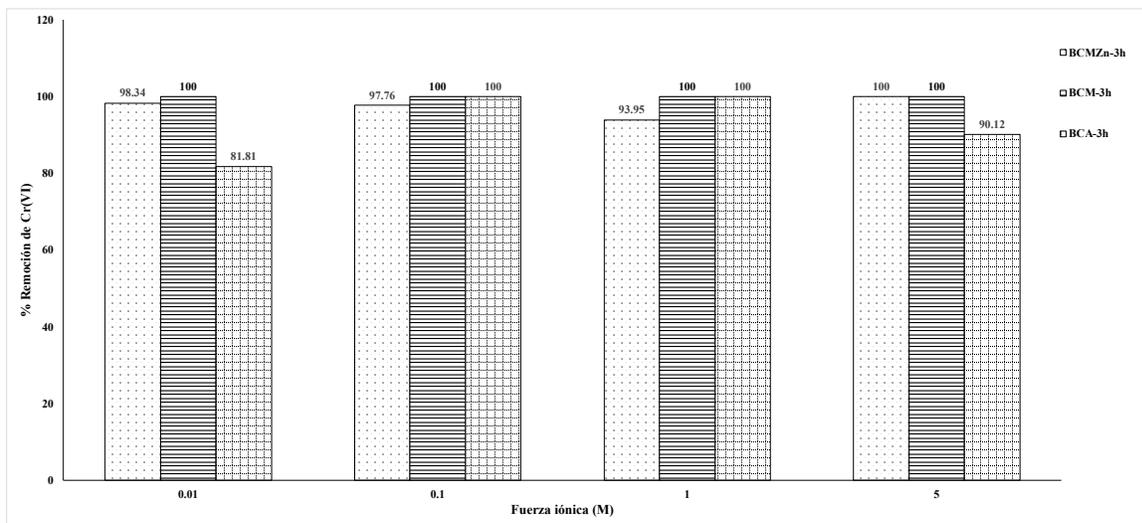


Gráfica 1. Remoción de Cr(VI) en función de la carga inicial de adsorbente posterior a 3 horas de contacto

Efecto de la fuerza iónica sobre la remoción de Cr(VI)

Se seleccionó la carga de 5 g/L de material adsorbente para ejecutar la prueba del efecto de la fuerza iónica sobre el proceso de adsorción. En la gráfica 2 no se observa un efecto de reducción de la remoción del Cr, aunque en diversos artículos se ha observado dicho efecto (Zhang et al., 2023).

Se esperaba una reducción en la adsorción debida al llenado de los espacios activos para tal efecto, sin embargo, dada la naturaleza de nuestro experimento se hipotetiza que la presencia de iones metálicos (Na) podría favorecer el establecimiento de enlaces iónicos entre el Cr(VI) en la suspensión y el Na adherido en la superficie del nanocomposito o biocarbón. Este hallazgo resulta importante dada las implicaciones que pudiera tener el buen desempeño de materiales adsorbtivos bajo condiciones próximas a las que se encontraría el agua de descarga de procesos industriales, p.e., agua de proceso de curtido.



Gráfica 2. Efecto de la fuerza iónica (NaCl) sobre la eficiencia de remoción de Cr(VI)

Conclusiones

Se manufacturaron materiales carbonosos empleando residuos de cápsulas de higuera (*Ricinus communis*) que se emplearon para sintetizar nanocompuestos con magnetita y ZnO con la intención de evaluar la capacidad adsorptiva con soluciones de Cr(VI). Los materiales sintetizados mostraron buena capacidad adsorptiva en condiciones de pH ácidas, con desempeño óptimo a 5 g/L y 10 g/L.

Se observó buen desempeño adsorptivo a altas concentraciones de NaCl (1M y 5M), permitiendo ampliar el rango de aplicaciones de los nanocompuestos a condiciones de descarga de agua residual reales, considerando que tienen potencial de aplicación en aguas de descarga de procesos de curtido de piel.

Se demostró que las cápsulas de higuera resultan convenientes para ser empleadas como materia prima para la manufactura de biocarbón y nanocompuestos, los cuales se desempeñaron satisfactoriamente en procesos de remoción de Cr(VI).

Bibliografía/Referencias

- Huang, D., Liu, C., Zhang, C., Deng, R., Wang, R., Xue, W., Luo, H., Zeng, G., Zhang, Q., & Guo, X. (2019). Cr (VI) removal from aqueous solution using biochar modified with Mg/Al-layered double hydroxide intercalated with ethylenediaminetetraacetic acid. *Bioresource Technology*, 276, 127-132.
- Islam, M. A., Angove, M. J., & Morton, D. W. (2019). Recent innovative research on chromium (VI) adsorption mechanism. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 12, 100267.
- Jiang, B., Gong, Y., Gao, J., Sun, T., Liu, Y., Oturan, N., & Oturan, M. A. (2019). The reduction of Cr (VI) to Cr (III) mediated by environmentally relevant carboxylic acids: State-of-the-art and perspectives. *Journal of Hazardous Materials*, 365, 205-226.
- Li, Y., Huang, T., Liu, X., Chen, Z., Yang, H., & Wang, X. (2023). Sorption-catalytic reduction/extraction of hexavalent Cr (VI) and U (VI) by porous frameworks materials. *Separation and Purification Technology*, 123615.
- LÓPEZ, B. V. H. (2021). *Extracción del cromo de virutas de cuero provenientes de la industria del curtido mediante hidrólisis alcalina en un tambor de curtido*.
- Perales Aguilar, L., Santos Díaz, M. del S., Gómez Aguirre, Y. A., Ramos Gómez, M. S., & Pérez Molphe Balch, E. (2020). Análisis in vitro de la acumulación de metales pesados en plantas de la familia Asparagaceae tolerantes a la baja disponibilidad de agua. *Nova scientia*, 12(24), 0-0.
- Sun, Y., Wang, T., Han, C., Bai, L., & Sun, X. (2023). One-step preparation of lignin-based magnetic biochar as bifunctional material for the efficient removal of Cr (VI) and Congo red: Performance and practical application. *Bioresource Technology*, 369, 128373.
- Wang, Y., Liu, Z., Huang, W., Lu, J., Luo, S., Czech, B., Li, T., & Wang, H. (2023). Capture-reduction mechanism for promoting Cr (VI) removal by sulfidated microscale zerovalent iron/sulfur-doped graphene-like biochar composite. *Carbon Research*, 2(1), 11.
- Yuan, Y., Huang, L., Zhang, T. C., Ouyang, L., & Yuan, S. (2021). One-step synthesis of ZnFe₂O₄-loaded biochar derived from leftover rice for high-performance H₂S removal. *Separation and Purification Technology*, 279, 119686.
- ZAMORA, D. T., ORTEGA, A. C., & GONZÁLEZ, J. A. R. (s. f.). Los sitios de disposición final: Una narrativa de los avances y las asignaturas pendientes en León, Guanajuato. *Expresión Económica*, 5.
- Zhang, D., Zhou, D., Lu, L., Zhang, M., Lü, T., Huang, J., Zhao, H., Zhou, J., & Rinklebe, J. (2023). Preferential, synergistic sorption and reduction of Cr (VI) from chromium–rhodamine B mixed wastewater by magnetic porous biochar derived from wasted *Myriophyllum aquaticum* biomass. *Environmental Pollution*, 327, 121593.