

Residuos de Café como Solución Sustentable para Eliminar Metales Tóxicos del Agua

Sofia Vite-Velazquez¹, Arizbeth Amitzin Pérez-Martínez²

¹Universidad La Salle, Facultad de ciencias químicas. Ciudad de México, México.

²Universidad La Salle, Vicerrectoría de investigación. Ciudad de México, México.

sofiavite@lasallistas.org.mx, arizbeth.perez@lasalle.mx

Resumen. La presencia de metales pesados en cuerpos de agua es una problemática ambiental prioritaria debido a su toxicidad, persistencia y capacidad de bioacumulación. Cromo, cobre, níquel y zinc son algunos de los metales más comunes en descargas industriales y urbanas, representando un riesgo para la salud humana y los ecosistemas. Frente a este desafío, es necesario desarrollar soluciones de tratamiento de agua que sean eficaces, de bajo costo y ambientalmente responsables.

Este proyecto propone el uso de residuos de café como material adsorbente para remover metales pesados en soluciones acuosas. Los residuos, recolectados en una cadena comercial, fueron tratados químicamente con ácido nítrico (HNO_3) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2), y evaluados en sistemas por lotes durante 24 y 48 horas. La eficiencia de remoción se determinó por métodos espectrofotométricos.

Los resultados mostraron remociones de hasta 93.5 % de Cr^{6+} con tratamiento ácido, 89.9 % de Zn^{2+} y 80.6 % de Ni^{2+} . El Cu^{2+} alcanzó una eficiencia mayor de 90 % en 24 horas.

Esta investigación demuestra que los residuos de café, al ser modificados, pueden actuar como biosorbentes eficientes, representando una solución sustentable para el tratamiento de aguas contaminadas. El proyecto contribuye a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) y el ODS 12 (Producción y consumo responsables), al fomentar el aprovechamiento de residuos orgánicos bajo principios de economía circular.

Palabras Clave: Biorresiduos, metales pesados, adsorción

1 Descripción de la problemática prioritaria abordada

La contaminación del agua por metales pesados es una de las problemáticas ambientales más persistentes y complejas a nivel mundial. Elementos como cromo hexavalente (Cr^{6+}), cobre (Cu^{2+}), níquel (Ni^{2+}) y zinc (Zn^{2+}), provenientes principalmente de descargas industriales, actividades mineras, procesos de galvanoplastia, curtido de pieles y manufactura electrónica, representan un riesgo considerable para la salud humana y los ecosistemas acuáticos. Estos metales no son biodegradables, tienden a acumularse en tejidos vivos y pueden provocar efectos tóxicos crónicos como cáncer, daños renales, alteraciones neurológicas y trastornos endocrinos (Fu & Wang, 2011; Jaishankar et al., 2014).

Desde el área de la ingeniería ambiental y química, diversas estrategias han sido desarrolladas para la remoción de metales pesados, incluyendo procesos fisicoquímicos como precipitación, intercambio iónico, membranas, electrocoagulación y adsorción. De estas, la adsorción ha destacado por su eficiencia, bajo costo y versatilidad, especialmente cuando se emplean materiales de origen biológico (Gupta & Nayak, 2012).

En este contexto, los residuos orgánicos como el café, ricos en celulosa, hemicelulosa y lignina, han sido identificados como potenciales adsorbentes debido a la presencia de grupos funcionales activos ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{C=O}$) capaces de interactuar con iones metálicos (Rangabhashiyam et al., 2014). El uso de residuos de café como biosorbente no solo contribuye a la descontaminación del

agua, sino que también permite valorizar un desecho urbano altamente disponible, promoviendo la reducción de residuos sólidos y fomentando modelos de economía circular.

Este proyecto se alinea con el **Objetivo de Desarrollo Sostenible 6** de la Agenda 2030 de la ONU, que busca garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos. Además, contribuye al **ODS 12** (Producción y consumo responsables), al reutilizar residuos orgánicos para fines ambientales, y al **ODS 11** (Ciudades y comunidades sostenibles), al proponer soluciones accesibles y ecológicas para entornos urbanos. El enfoque interdisciplinario de esta investigación permite una respuesta sustentable e innovadora a un problema ambiental prioritario, vinculando el tratamiento de agua con la gestión responsable de residuos.

2 Objetivo

Desarrollar un adsorbente de bajo costo, sustentable y eficiente a partir de residuos de café modificados químicamente, para la remoción de metales pesados (Cr^{6+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} y Zn^{2+}) en soluciones acuosas, promoviendo alternativas basadas en economía circular para el tratamiento de aguas contaminadas.

3 Propuesta teórico-metodológica

Se prepararon soluciones de CuSO_4 , NiSO_4 , ZnSO_4 y $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ a una concentración de 50 mg/L para evaluar la adsorción de metales pesados utilizando carbonos activados derivados de residuos de café proporcionados por la cadena Starbucks®. Los residuos fueron inicialmente secados y calcinados para obtener un carbón base, el cual fue sometido a dos tipos de tratamientos: activación ácida con ácido ortofosfórico (21% v/v) y oxidación con peróxido de hidrógeno (10%). En ambos casos, los tratamientos incluyeron etapas de agitación, secado y calcinación bajo rampas controladas de temperatura. Tras cada modificación, el carbón fue cuidadosamente lavado hasta eliminar residuos iónicos, verificando la conductividad del agua de lavado, y secado nuevamente. Como resultado, se obtuvieron dos tipos de carbón activado: **C1**, tratado únicamente con ácido ortofosfórico, y **C2**, que incluye un paso adicional de oxidación con peróxido de hidrógeno, los cuales fueron utilizados como adsorbentes para la remoción de metales en las soluciones modelo. La figura 1 muestra el sistema utilizado para la adsorción de los metales, en donde el carbón tratado fue puesto en contacto con la solución del metal por un periodo de 48 horas, se tomaron muestras cada 6 horas para determinar el porcentaje de adsorción del mismo.

El sistema se puso bajo una fuente de luz de 390–405 nm, teniendo como resultado un sistema foto catalítico.

Mediante el fotómetro Hanna HI83314-01 de Hanna Instruments ®, se determinaron por métodos colorimétricos las concentraciones de los iones respectivo.

4 Discusión de resultados

La tabla 1 muestra la evolución del porcentaje de adsorción de iones metálicos (Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} y Cr^{6+}) a lo largo del tiempo utilizando carbonos activados obtenidos a partir de residuos de café tratados químicamente mediante activación ácida (C1) y oxidación con peróxido de hidrógeno (C2). En todos los casos se observa un incremento progresivo de la adsorción conforme avanza el tiempo de contacto, alcanzando valores máximos a las 40 horas, lo que indica que el equilibrio de adsorción se alcanza de manera gradual, como ha sido reportado en diversos estudios sobre sistemas porosos con cinéticas de adsorción controladas tanto por difusión en película como por difusión intrapartícula (Foo & Hameed, 2010). Particularmente, el carbón oxidado con peróxido de hidrógeno (C2) mostró una mayor eficiencia en la remoción de todos los metales comparado con el carbón activado únicamente con ácido fosfórico (C1), lo cual puede atribuirse a la introducción de grupos funcionales oxigenados en la superficie del carbón, como grupos hidroxilo, carbonilo y carboxilo, los cuales aumentan la polaridad del material y su afinidad por cationes metálicos (Yin et al., 2007; Oliveira et al., 2020). En el caso del ion cobre, se alcanzaron porcentajes de adsorción superiores al 98% con ambos carbonos a las 40 horas, lo que sugiere una fuerte interacción con la superficie del adsorbente, consistente con la alta capacidad de formación de

complejos de Cu²⁺ con sitios oxigenados, como también se ha documentado en estudios similares usando residuos lignocelulósicos modificados (Babel & Kurniawan, 2003). Por su parte, el ion níquel presentó la menor eficiencia de adsorción, especialmente en los primeros tiempos, lo que podría deberse a su menor carga específica y a la competencia con otros metales por los sitios activos, situación ya observada en sistemas multicomponente (Lata et al., 2008). El zinc mostró un comportamiento intermedio, con una eficiencia final cercana al 90% con el carbón C2. Finalmente, el cromo, presente como Cr⁶⁺ en solución, exhibió una adsorción inicial baja en el carbón C1 (24.8%), pero alcanzó una remoción del 93.5% con el carbón C2 a las 40 horas, lo que sugiere un mecanismo dual de reducción-adsorción. Diversos autores han reportado que materiales con grupos oxigenados como los generados por oxidación con H₂O₂ pueden facilitar la reducción de Cr⁶⁺ a Cr³⁺, especie mucho más afín a los sitios de adsorción de la matriz carbonosa (Zhao et al., 2014; Saleh & Gupta, 2012). En conjunto, estos resultados demuestran que el tratamiento oxidativo con peróxido de hidrógeno mejora significativamente el desempeño del carbón activado derivado de residuos de café, haciéndolo una alternativa sostenible y efectiva para la remoción de metales pesados en soluciones acuosas.

5 Conclusiones y perspectivas futuras

El estudio demuestra que los residuos de café tratados químicamente pueden transformarse en carbones activados altamente eficaces para la adsorción de metales pesados en soluciones acuosas. Entre los dos materiales evaluados, el carbón oxidado con peróxido de hidrógeno (C2) presentó un desempeño superior en la remoción de Cu²⁺, Ni²⁺, Zn²⁺ y Cr⁶⁺ en comparación con el carbón activado únicamente con ácido ortofosfórico (C1), alcanzando eficiencias de adsorción cercanas al 99% en algunos casos. Este incremento en la capacidad adsorbente puede atribuirse a la mayor cantidad de grupos funcionales oxigenados generados por la oxidación con H₂O₂, los cuales favorecen las interacciones electrostáticas y la formación de complejos con los iones metálicos. La cinética de adsorción observada sugiere que el sistema requiere períodos prolongados de contacto para alcanzar el equilibrio, siendo relevante considerar esto en aplicaciones prácticas. En conjunto, los resultados evidencian que los residuos agroindustriales, como los del café, representan una alternativa sustentable, de bajo costo y con alto valor agregado para el tratamiento de aguas contaminadas.

Para consolidar el uso de estos materiales en aplicaciones reales, es necesario profundizar en la caracterización fisicoquímica de los carbones obtenidos mediante técnicas como FTIR, BET, SEM-EDS y XPS, lo que permitiría correlacionar la funcionalización superficial con la eficiencia adsorbente. Asimismo, sería pertinente estudiar la capacidad de regeneración y reuso de los carbones en ciclos sucesivos de adsorción-desorción, con el fin de evaluar su viabilidad económica y ambiental a largo plazo. También se recomienda probar su desempeño en matrices más complejas, como efluentes industriales reales, donde podrían estar presentes múltiples contaminantes orgánicos e inorgánicos. Finalmente, el escalamiento del proceso de producción de los carbones y su integración en sistemas de tratamiento continuo abrirían nuevas oportunidades para su aplicación en plantas de tratamiento de aguas residuales, aportando a los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con el agua limpia, la innovación tecnológica y el consumo responsable.

6 Agradecimientos

Los autores agradecen a la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad La Salle México por su apoyo en el préstamo de equipo de laboratorio e instalaciones para el desarrollo de este proyecto”.

7 Referencias

1. Babel, S., & Kurniawan, T. A. (2003). Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review. *Journal of Hazardous Materials*, **B97**, 219–243.

2. Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, **156**, 2–10.
3. Lata, S., Singh, P. K., & Samadder, S. R. (2008). Removal of heavy metals using rice husk: a review. *Journal of Environmental Research and Development*, **2**, 165–174.
4. Oliveira, L. C. A., et al. (2020). Activated carbon modified with transition metals for removal of pollutants from aqueous media: A review. *Environmental Chemistry Letters*, **18**, 283–309.
5. Saleh, T. A., & Gupta, V. K. (2012). Column with CNT/magnesium oxide composite for lead(II) removal from water. *Environmental Science and Pollution Research*, **19**, 1224–1228.
6. Yin, C. Y., Aroua, M. K., & Daud, W. M. A. W. (2007). Review of modifications of activated carbon for enhancing contaminant uptakes from aqueous solutions. *Separation and Purification Technology*, **52**, 403–415.
7. Zhao, X., et al. (2014). A review of recent advances in adsorptive removal of hexavalent chromium from aqueous solutions by activated carbon-based adsorbents. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **22**, 1–10.
Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*, **92**(3), 407–418. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>
8. Gupta, V. K., & Nayak, A. (2012). Cadmium removal and recovery from aqueous solutions by novel adsorbents prepared from orange peel and Fe2O3 nanoparticles. *Chemical Engineering Journal*, **180**, 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.11.006>
9. Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, **7**(2), 60–72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>
10. Rangabhashiyam, S., Anu, N., Nandagopal, M. S., & Selvaraju, N. (2014). Relevance of isotherm models in biosorption of pollutants by agricultural byproducts. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **2**(1), 398–414. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.12.014>
11. United Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. <https://sdgs.un.org/2030agenda>



Figura 1. Esquema de experimentación a nivel laboratorio

Tabla 1. Dinámicas de adsorción de los diferentes metales.

TIEMPO (H)	% ADSORCIÓN DE COBRE		% ADSORCIÓN DE NÍQUEL		% ADSORCIÓN DE ZINC		% ADSORCIÓN DE CROMO HX	
	% Ads C1	% Ads C2	% Ads C1	% Ads C2	% Ads C1	% Ads C2	% Ads C1	% Ads C2
0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	77.4	75.4	52.7	65.6	50.2	58.1	24.8	71.3
16	96.8	80	65.6	68.8	73.1	71.8	47.1	89.5
24	97.2	93.6	67.7	72.0	75.3	77.1	60.6	91.8
32	97.6	96.6	71.0	74.2	81.1	79.3	79.2	92.1
40	98.2	99.8	76.3	80.6	84.6	89.9	89.7	93.5