

Cómo Transformar Lodos en Materiales Magnéticos para Eliminar Colorantes del Agua

Ana P. Melchor-Durán ¹, M. R. Moreno-Virgen ^{1,*}, Adrián Bonilla-Petriciolet ¹, Hilda E. Reynel-Ávila ^{1,2}, Didilia I. Mendoza-Castillo ^{1,2}, M. López-Guerrero ¹

¹ Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Aguascalientes, 20256, México.

² Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, Ciudad de México, 03940, México.

* Autor de correspondencia: ma_rosario.mv@aguascalientes.tecnm.mx; Tel.: +524499105002

Artículo de divulgación científica

Recibido: 15 de abril de 2026

Aceptado: 6 de julio de 2026

Publicado: 26 de julio de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i2.711>

Resumen: La contaminación del agua por colorantes industriales es un problema ambiental creciente debido a su persistencia y posibles efectos en la salud y los ecosistemas. En este trabajo se presenta una alternativa sostenible: el aprovechamiento de lodos provenientes de plantas de tratamiento de un proceso de anodizado para crear materiales capaces de limpiar el agua. Estos materiales, además de remover contaminantes de forma eficiente, pueden recuperarse fácilmente mediante imanes, lo que facilita su reutilización. Los resultados muestran que esta estrategia no solo es efectiva, sino también prometedora desde el punto de vista económico y ambiental, al convertir un residuo en una solución para el tratamiento de aguas.

Palabras clave: lodos residuales, adsorción, adsorbente magnético, remoción de colorantes

Introducción

Los colorantes son compuestos utilizados en industrias como la textil, papelera, de tintorería, producción de colorantes, curtido y pintura (Nart & Silah, 2025). Actualmente existen alrededor de 10 000 colorantes disponibles en el mercado, muchos de los cuales terminan siendo descargados en cuerpos de agua como parte de los residuos industriales (Díaz-Flores *et al.*, 2024). Esta situación representa un problema ambiental importante, ya que los colorantes pueden alterar la calidad del agua, afectar la penetración de la luz y generar impactos negativos sobre los ecosistemas acuáticos. Se ha identificado que sectores como el textil, el de papel y pulpa, el de tintorería, el de producción de colorantes y el de curtido y pintura son los principales responsables de la liberación de residuos de colorantes en el medio ambiente (Nart & Silah, 2025), generando graves problemas a los ecosistemas debido a su naturaleza recalcitrante y convirtiéndose en una fuente importante de contaminación (Díaz-Flores *et al.*, 2024).

La contaminación por colorantes es una preocupación de alcance mundial. Se estima que entre el 17 % y el 20 % de la contaminación hídrica está asociada a la industria textil, principalmente durante los procesos de teñido y acabado (Díaz-Flores *et al.*, 2024). Además, estas actividades liberan sustancias orgánicas potencialmente tóxicas al agua y al suelo. (Díaz-Flores *et al.*, 2024; Mzinyane *et al.*, 2026). Por ello, el tratamiento de las aguas residuales que contienen colorantes es una necesidad para proteger los recursos hídricos y cumplir con las regulaciones ambientales vigentes (Mzinyane *et al.*, 2026).

La eliminación de colorantes del agua no es sencilla. Muchos de estos compuestos presentan una elevada estabilidad química y resistencia a la degradación, lo que dificulta su remoción mediante procesos convencionales de tratamiento. Para enfrentar este problema se han desarrollado diferentes tecnologías físicas, químicas y biológicas. Entre las alternativas disponibles, la adsorción, ha despertado especial interés debido a su elevada eficiencia, facilidad de operación y bajo consumo energético (Bagherzadeh *et al.*, 2024; Shukla *et al.*, 2024; Kumar *et al.*, 2026). La adsorción es un proceso en el que las moléculas contaminantes se adhieren a la superficie de un material sólido, denominado adsorbente. Gracias a este mecanismo, es posible retirar diversos contaminantes presentes en el agua de manera efectiva.

A pesar de sus ventajas, la aplicación de la adsorción enfrenta un desafío importante: la separación del adsorbente una vez que ha capturado los contaminantes. Muchos materiales adsorbentes poseen tamaños de partícula pequeños para maximizar su área superficial, lo que dificulta su recuperación después del tratamiento (Li *et al.*, 2021). En este contexto, los adsorbentes magnéticos representan una alternativa prometedora, ya que pueden separarse fácilmente

del agua mediante la aplicación de un campo magnético externo, permitiendo su recuperación y posible reutilización (Zourou *et al.*, 2024).

Desarrollo

Los colorantes sintéticos utilizados en industrias como la textil, papelera y de teñido representan una de las principales fuentes de contaminación en aguas residuales. Debido a su elevada estructura química, muchos de estos compuestos permanecen en el ambiente durante largos periodos y son difíciles de eliminar mediante tratamientos convencionales. Por esta razón, existe un interés creciente en desarrollar materiales adsorbentes capaces de capturar estos contaminantes en forma eficiente y sostenible. Una de las tendencias actuales en el tratamiento de agua consiste en transformar residuos industriales en materiales de valor agregado. Este enfoque no solo contribuye a la economía circular, sino que también reduce la cantidad de residuos que requieren disposición final. En este contexto, los lodos generados por procesos industriales pueden convertirse en una materia prima útil para la fabricación de adsorbentes destinados a la remoción de contaminantes.

¿Cómo se preparó el material?

En este trabajo, se utilizaron lodos provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales asociada a un proceso de anodizado. Este tipo de residuos suele contener compuestos minerales y metálicos que pueden favorecer su aprovechamiento en aplicaciones ambientales. Sin embargo, su reutilización requiere un tratamiento previo que garantice condiciones adecuadas para su uso seguro y eficiente.

El primer paso consistió en secar los lodos para eliminar la humedad. Posteriormente, se aplicó un pretratamiento químico para acondicionar la superficie del material y favorecer la formación de sitios capaces de retener contaminantes durante el proceso de adsorción. Finalmente, se incorporaron sales de hierro que proporcionaron al material propiedades magnéticas. Como resultado, se obtuvo un material adsorbente magnético capaz de responder ante la presencia de un campo magnético externo. Esta propiedad representa una ventaja importante ya que es posible llevar a cabo la separación de las fases mediante el uso de imanes después del tratamiento del agua. La recuperación magnética es actualmente una de las estrategias más prometedoras para simplificar la operación de sistemas de adsorción, reducir pérdidas de material y favorecer su posible reutilización en ciclos posteriores de tratamiento.

¿Qué tan bien funciona?

Para evaluar el desempeño del material se seleccionaron dos colorantes con características químicas diferentes: Azul Básico 3 (AB3), y Azul Ácido 25 (AA25). Estos compuestos fueron elegidos porque representan dos familias de colorantes con características químicas diferentes. Mientras que AA25 corresponde a un colorante ácido, AB3 pertenece al grupo de los colorantes básicos. Evaluar ambos contaminantes permite determinar si el material es capaz de remover sustancias con distintos comportamientos químicos, proporcionando una visión más amplia de su potencial aplicación en el tratamiento de aguas residuales. Para asegurar la confiabilidad de los resultados, cada experimento se repitió tres veces bajo las mismas condiciones. Los experimentos se realizaron bajo condiciones controladas con el fin de comparar el comportamiento del adsorbente frente a ambos contaminantes, tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones principales de los experimentos de adsorción

Parámetro	Condición
Colorantes evaluados	AA25 y AB3
Temperatura	25 °C y 40 °C
pH	5
Tiempo de contacto	24 horas
Relación masa/volumen	2 g/L
Reproducibilidad	Todos los experimentos fueron llevados a cabo por triplicado

Además de evaluar la capacidad de remoción de colorantes, se verificó la recuperación del material mediante la aplicación de un campo magnético externo. Como se observa en la Figura 1, al colocar imanes cerca de los recipientes del ensayo, el adsorbente se desplazó rápidamente hacia la fuente magnética y demostró la facilidad con la que el material puede separarse del agua una vez concluido el tratamiento. Este comportamiento confirmó que el material adquirido presenta una respuesta magnética, permitiendo su recuperación después del tratamiento del agua.

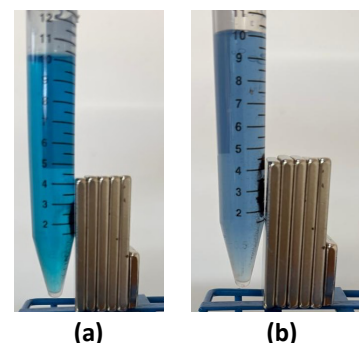


Figura 1. Recuperación del material adsorbente mediante la aplicación de un campo magnético externo después del contacto con soluciones de colorante.

Resultados obtenidos

Los resultados mostraron que el material fue capaz de remover ambos colorantes y que su desempeño mejoró significativamente al aumentar la temperatura de operación.

Los valores máximos de adsorción obtenidos representan la cantidad máxima de colorante removida por gramo de material adsorbente, los resultados son presentados en la Tabla 2. Para el colorante AA25, la capacidad de adsorción aumentó de 26 mg/g a 158 mg/g al incrementar la temperatura de 25 °C a 40 °C. En el caso del colorante AB3, el incremento fue aún mayor, pasando de 10 mg/g a 186 mg/g. Los valores reportados corresponden al promedio de estas mediciones, lo que permitió reducir la influencia de variaciones experimentales y obtener valores más representativos. Estos resultados indican que el material puede retener cantidades considerablemente mayores de contaminante cuando opera a temperaturas más elevadas.

Tabla 2. Capacidades máximas de adsorción del material adsorbente magnético

Contaminante	Material adsorbente	Capacidad de adsorción
AA25	Material adsorbente magnético a 25 °C	26 mg/g
	Material adsorbente magnético a 40 °C	158 mg/g
AB3	Material adsorbente magnético a 25 °C	10 mg/g
	Material adsorbente magnético a 40 °C	186 mg/g

Nota: La capacidad de adsorbente corresponde a la cantidad máxima de colorante removida por gramo de material adsorbente magnético.

La Figura 2 muestra las isotermas de adsorción obtenidas para ambos colorantes. Estas curvas permiten visualizar cuánta cantidad de contaminante puede retener el material cuando cambia la concentración del colorante presente en el agua. La concentración en equilibrio corresponde a la cantidad de colorante que permanece en el agua una vez que el proceso de adsorción ha finalizado. En general, una mayor capacidad de adsorción indica un mejor desempeño del adsorbente para capturar contaminantes.

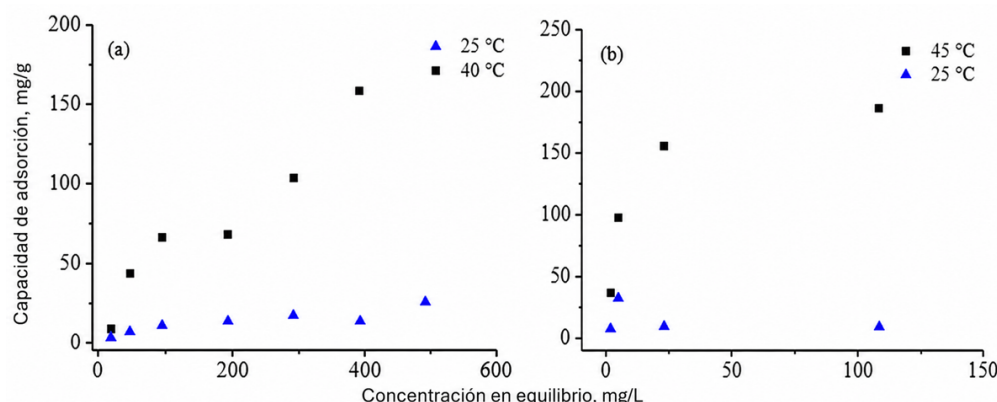


Figura 2. Isotermas de adsorción de (a) AA25 y (b) AB3 a 25 °C y 40 °C, empleando un pH de 5 y una masa de 2 g del material adsorbente por cada litro de solución de colorante.

Los resultados cuantitativos también se comprobaron visualmente. Como se observa en la Figura 3, después del tratamiento se produjo una disminución notable en la intensidad del color de las soluciones. Aunque esta evidencia visual facilita la comprensión del proceso, la efectividad del material se sustenta principalmente en las capacidades de adsorción obtenidas experimentalmente.

¿Es económicamente competitivo?

Además de su capacidad de remover contaminantes, el material desarrollado mostró un potencial económico favorable. El análisis preliminar realizado indicó que, al operar a 40 °C, la cantidad de adsorbente necesario para remover una misma cantidad de colorante disminuye considerablemente debido al aumento en la capacidad de adsorción. Bajo las condiciones evaluadas, se estimó que el costo asociado a la remoción de un gramo de contaminante podría reducirse de más de 900 pesos a cerca de 150 pesos en el caso de uno de los colorantes estudiados, y de más de 2400 pesos a aproximadamente 130 pesos para el otro. Esta estimación se realizó considerando el costo total de preparación del material adsorbente magnético, el cual incluye reactivos empleados en la síntesis, agua desionizada, consumo de electricidad y materiales de laboratorio menores. A partir de este costo se calculó el precio por gramo de adsorbente y, utilizando las capacidades máximas de adsorción obtenidas experimentalmente, se estimó la cantidad de material necesaria para remover un gramo de colorante. Estos valores corresponden a una estimación preliminar y no incluyen costos asociados a infraestructura, mano de obra o escalamiento del proceso. Adicionalmente, el uso de un adsorbente obtenido a partir de residuos industriales fortalece su atractivo desde la perspectiva de la sustentabilidad, al combinar valorización de residuos, recuperación magnética y remoción eficiente de contaminantes en un mismo sistema.

Conclusiones

El material adsorbente magnético obtenido a partir de lodos provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales asociada a un proceso de anodizado demostró una capacidad de adsorción competitiva para remover los colorantes Azul ácido 25 (AA25) y Azul básico 3 (AB3). Los resultados mostraron que la temperatura influye significativamente en el desempeño del material, observándose una mayor capacidad de remoción a 40 °C. En estas condiciones, se alcanzaron capacidades máximas de adsorción de 158 mg/g para AA25 y 186 mg/g para AB3, valores considerablemente superiores a los obtenidos a 25 °C.

La incorporación de propiedades magnéticas permitió recuperar fácilmente el material adsorbente magnético mediante la aplicación de un campo magnético externo, facilitando su separación del agua tratada y superando una de las principales limitantes de los procesos de adsorción convencionales.

Los resultados obtenidos también muestran el potencial del aprovechamiento de lodos industriales como materia prima para la producción de materiales adsorbentes, contribuyendo a estrategias de economía circular mediante la valorización de residuos y su aplicación en el tratamiento de aguas contaminadas. Finalmente, el análisis preliminar realizado sugiere que operar a temperaturas más elevadas puede reducir la cantidad de materiales requerida para la remoción de colorantes, lo que representa un potencial económico favorable para futuras aplicaciones de este material adsorbente magnético. No obstante, el presente trabajo no incluyó una caracterización detallada de los lodos antes de su transformación en material adsorbente magnético, por lo que futuros estudios deberán evaluar la influencia de su composición sobre el desempeño del material. Asimismo, será necesario analizar su reutilización, comportamiento en aguas residuales reales y viabilidad en condiciones de operación a mayor escala.

Bibliografía

Bagherzadeh, M., Salehi, G., & Rabiee, N. (2024). Rapid and efficient removal of methylene blue dye from aqueous solutions using extract-modified Zn–Al LDH. *Chemosphere*, 350, 141011. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.141011>

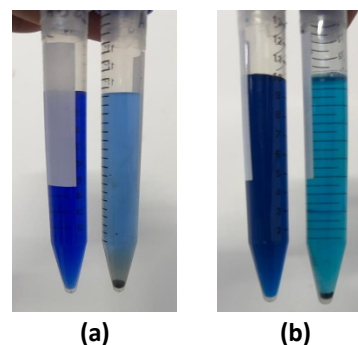


Figura 3. Comparación visual de la soluciones antes y después del tratamiento con el material adsorbente: (a) AA25 y (b) AB3.

- Díaz-Flores, P. E., Flores-Rojas, A. I., Medellín-Castillo, N. A., Cisneros-Ontiveros, H. G., Cruz-Briano, S. A., Gallegos-Almanza, A. V., Cruz-Labana, J. D., & Espinosa-Martínez, I. A. (2024). Chitosan and zeolite-based composites: Characterization and removal of methylene blue dye from aqueous solution. *MRS Advances*, 9(22), 1713–1719. <https://doi.org/10.1557/s43580-024-00959-1>
- Kumar, B., Uttam, A., Agrahari, G. K., & Sistla, V. S. (2026). Effect of distinct carboxylic acid modulators on Ni-Zn MOF synthesis and their application in hydroxy naphthol blue dye removal from aqueous solutions. *Materials Science and Engineering: B*, 325, 119074. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2025.119074>
- Li, M., Li, J., Peng, X., Hu, T., Zhang, L., Rong, X., Xue, C., & Xu, L. (2021). Coal-fly-ash magnetic sphere based magnetic adsorbent for multiple-dye adsorption. *Materials Research Express*, 8(1). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/abd6a2>
- Mzinyane, N. N., Makenda, A. K., & Mtshatsheni, K. G. (2026). Grafting bulrush with acrylic acid using Fenton's redox initiator for the removal of methylene blue dye from an aqueous solution. *Water, Air, & Soil Pollution*, 237(3). <https://doi.org/10.1007/s11270-025-08875-2>
- Nart, A. S., & Silah, H. (2025). Polymeric styrene-divinylbenzene resin Amberlyst-15: A novel, smart and alternative adsorbent for the removal of cationic methylene blue dye from aqueous solution. *Materials Science and Engineering: B*, 317, 118174. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2025.118174>
- Shukla, S., Khan, R., Srivastava, M. M., & Zahmatkesh, S. (2024). Valorization of waste watermelon rinds as a bio-adsorbent for efficient removal of methylene blue dye from aqueous solutions. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 196(5), 2534–2548. <https://doi.org/10.1007/s12010-023-04448-3>
- Zourou, A., Ntziouni, A., Roman, T., Tampaxis, C., Steriotis, T., Gkouzia, G., Alff, L., Sanchez, D. E., Terrones, M., & Kordatos, K. V. (2024). Synthesis and characterization of magnetic carbon dots (CDs)-based hybrid material as an adsorbent for the removal of organic dye from water. *Carbon*, 230, 119612. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2024.119612>