

# COMPARACIÓN DE LA CAPACIDAD DE REMOCIÓN DEL COLORANTE AZUL DE METILENO DE AGUAS CONTAMINADAS EMPLEANDO PROCESOS DE ADSORCIÓN Y SONOCATÁLISIS

Comparison of the removal capacity of methylene blue dye from contaminated water using  
adsorption and sonocatalysis process

Serafín Muñoz Alma Hortensia<sup>1\*</sup>; Gutiérrez Ortega Norma Leticia<sup>1\*</sup>; Collazo Alfaro Guadalupe<sup>2</sup>; Parra González José Silvestre<sup>2</sup>; Rivera Duarte Montserrat<sup>2</sup>; Núñez Vázquez Arely de Jesús<sup>2</sup>; Espinoza Rodríguez David Antonio<sup>2</sup>; Zúñiga Soto David Uriel<sup>3</sup>; Falcón García Cecilia Gabriela<sup>2</sup>; Luna García Dania Itzel<sup>2</sup>; Román Lomera Getsemani<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato; <sup>2</sup>Licenciatura en Ingeniería Ambiental, División de ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato; <sup>3</sup>Licenciatura en Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.

\* [sermuah@ugto.mx](mailto:sermuah@ugto.mx); [normaqt@ugt.mx](mailto:normaqt@ugt.mx)

## Resumen

En este estudio se evaluó la eliminación de azul de metileno en soluciones acuosas mediante los procesos de adsorción y sonocatálisis (degradación catalítica asistida por radiación ultrasónica), utilizando como materiales catalíticos y adsorbentes: el óxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), óxidos mixtos de Mg-Al calcinados a 450 °C, cascarón de huevo triturado y grafito (en barra y en polvo). Se realizaron ensayos de adsorción por lotes y mediciones cinéticas (monitoreadas mediante espectrofotometría UV-Vis a 664 nm) para la remoción del colorante azul de metileno, así como ensayos sonocatalíticos. Los resultados muestran que el  $\text{TiO}_2$  y los óxidos mixtos Mg-Al lograron las mayores eficiencias de remoción en 60 minutos, reduciendo de forma significativa la concentración del azul de metileno. La aplicación de procesos catalíticos asistidos mediante radiación ultrasónica potenció la eliminación del colorante empleando como catalizador el  $\text{TiO}_2$  (eliminando casi la totalidad). De manera general estos hallazgos demuestran que los materiales inorgánicos estudiados son eficaces para eliminar colorantes sintéticos persistentes del agua, y sugieren que la combinación de adsorción y sonocatálisis es prometedora para el tratamiento de efluentes contaminados con compuestos orgánicos.

**Palabras clave:** azul de metileno, adsorción, cinética, degradación, sonodegradación.

## Abstract

This study evaluated the removal of methylene blue in aqueous solutions through adsorption and sonocatalysis (ultrasound-assisted degradation), using titanium oxides ( $\text{TiO}_2$ ), calcined Mg-Al mixed oxides at 450 °C, eggshell, and graphite (bar and powder) as adsorbents. Batch adsorption tests and kinetic measurements (UV-Vis spectrophotometry at 664 nm) were performed to monitor dye concentration, as well as sonocatalytic experiments under the same conditions. The results show that  $\text{TiO}_2$  and Mg-Al oxides achieved the highest removal efficiencies within 60 minutes, significantly reducing the absorbance of methylene blue. The application of ultrasound enhanced the degradation with  $\text{TiO}_2$  (virtually eliminating the absorbance peak) and improved removal with the alternative adsorbents, although less effectively. Overall, these findings demonstrate that the studied inorganic adsorbents are highly effective in removing synthetic dyes from water and suggest that the combination of adsorption and sonocatalysis is a promising approach for treating effluents contaminated with organic compounds.

**Key words:** methylene blue, adsorption, kinetics, degradation, sonodegradation.

## Introducción

En los últimos años, la presencia de compuestos químicos persistentes en cuerpos de agua ha generado una creciente preocupación ambiental, particularmente aquellos provenientes de descargas industriales. Entre estos compuestos, los colorantes sintéticos destacan por su uso extendido en sectores como la industria textil, papelería, alimentaria, cosmética y farmacéutica. Estas sustancias se caracterizan por su alta estabilidad química, intensa coloración y resistencia a la degradación biológica, lo que dificulta significativamente su remoción mediante procesos convencionales de tratamiento de aguas (Rajeshwarisivaraj *et al.*, 2001).

La complejidad del problema se intensifica debido a la diversidad de fuentes contaminantes. Además de los efluentes industriales, las aguas residuales urbanas también aportan mezclas químicas complejas que incluyen productos domésticos como desinfectantes, limpiadores con amonio, blanqueadores, limpiadores de hornos e inodoros, aerosoles y pulidores de superficies. La interacción entre estos productos y los colorantes sintéticos puede generar combinaciones químicas difíciles de tratar, aumentando el reto en el diseño de tecnologías eficientes de tratamiento.

Uno de los colorantes más utilizados como modelo en estudios de laboratorio y en aplicaciones industriales es el azul de metileno (cloruro de 3,7-bis (dimetilamino) fenotiazina), también conocido como cloruro de tetrametilitionina. Este compuesto es altamente soluble en agua, de bajo costo y ampliamente disponible, lo que lo convierte en una molécula de referencia para evaluar procesos de remoción como la adsorción (Oladoye *et al.*, 2022). A nivel industrial, se emplea en el teñido de papel, lana, seda, algodón y otros materiales, siendo también común en productos farmacéuticos y cosméticos. Su amplia distribución y uso han llevado a su frecuente detección en cuerpos de agua contaminados, reflejando la necesidad urgente de desarrollar tecnologías efectivas para su eliminación.

Entre los métodos aplicados para la eliminación de colorantes en aguas residuales, los tratamientos físico-químicos convencionales, como la coagulación-floculación, y los procesos biológicos han sido ampliamente empleados. No obstante, la mayoría de estos métodos no logran eliminar completamente los colorantes sintéticos debido a su alta estabilidad y resistencia a la biodegradación (Arslan-Alaton *et al.*, 2007).

En este contexto, la adsorción ha emergido como una alternativa eficaz y económicamente viable. Este proceso se basa en la atracción de las moléculas del contaminante (adsorbato) hacia la superficie de un sólido (adsorbente), permitiendo su remoción del medio acuático. La adsorción puede ocurrir tanto en la superficie externa como en los poros del adsorbente, y se caracteriza por su simplicidad operativa, bajo costo y adaptabilidad a diversas condiciones de tratamiento (Eren & Afsin, 2007; Wang & Li, 2007; Wang & Zhu, 2007). En países como México, donde los vertidos de compuestos orgánicos persistentes siguen siendo una problemática ambiental seria, el desarrollo de tecnologías basadas en adsorción representa una estrategia prometedora para mitigar la contaminación del recurso hídrico y mejorar su calidad.

La adsorción de contaminantes orgánicos, como colorantes, en medios acuosos es un proceso altamente eficiente dependiente de las propiedades texturales y ópticas de los adsorbentes. En particular, la superficie específica y la porosidad juegan un rol determinante en la accesibilidad y eficiencia de los sitios activos para la retención de moléculas contaminantes, Li *et al.* (2022) destacan que la capacidad de adsorción de adsorbentes (como el biocarbón) está directamente relacionada con el número de sitios activos disponibles en la superficie, los cuales aumentan con una mayor área superficial y estructura porosa interna. Además, el seguimiento espectrofotométrico de la adsorción de azul de metileno un contaminante modelo común se realiza por medio de la disminución de su pico de absorbancia característico a 664 nm, cuya intensidad decrece conforme avanza el proceso de adsorción (por ejemplo, el pico inicial a 664 nm desaparece casi por completo tras el tratamiento con adsorbente) (Khataee *et al.*, 2021). En conjunto, estos hallazgos subrayan que, mientras una alta superficie específica favorece la adsorción física, el monitoreo preciso mediante espectroscopía UV-Vis ( $\lambda_{\text{max}} = 664 \text{ nm}$ ) permite cuantificar la eficiencia y cinética del proceso.

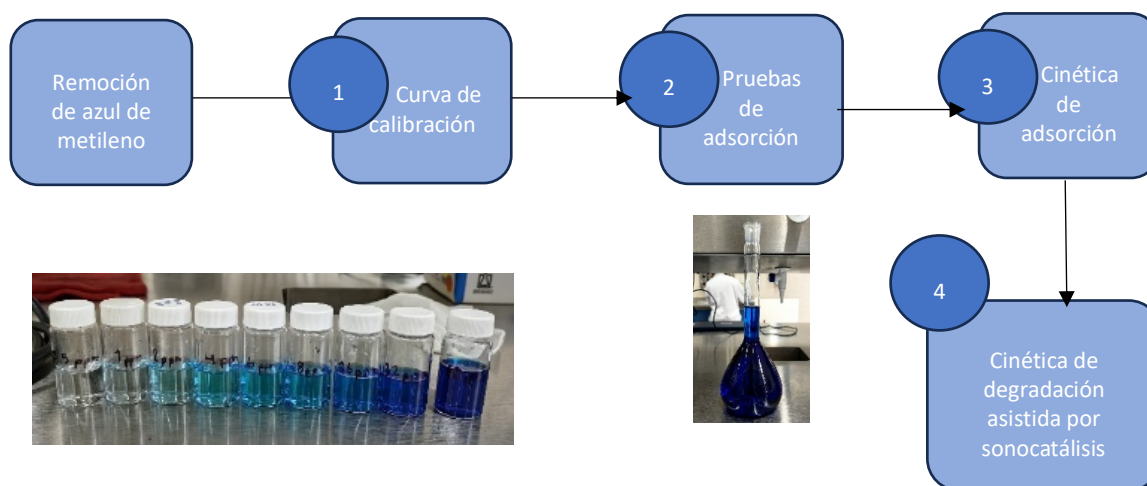
Los Procesos Avanzados de Oxidación (PAOs) se fundamentan en la generación de radicales hidroxilo ( $\cdot\text{OH}$ ), compuestos con alta capacidad oxidativa que permiten la degradación de contaminantes orgánicos resistentes en aguas residuales (Oturán & Aaron, 2014). Tecnologías como la oxidación con ozono combinada con luz ultravioleta y la reacción de Fenton han demostrado eficacia en la eliminación de sustancias persistentes, incluyendo productos farmacéuticos y colorantes industriales (Esplugas *et al.*, 2007; Malato *et al.*, 2009). Sin embargo, la adopción de estas técnicas en regiones con recursos limitados, como ciertos países latinoamericanos, se ve restringida por factores económicos y la carencia de infraestructura adecuada para su implementación y operación (Rodríguez *et al.*, 2020).

Ante estas limitaciones, se vuelve crucial explorar alternativas accesibles, sostenibles y eficientes para el tratamiento de aguas contaminadas. En este contexto, para el desarrollo del presente estudio se

seleccionaron diversos materiales con potencial adsorbente y/o catalítico, entre los que se incluyen cascarones de huevo, grafito (en barra y en polvo), dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), entre otros. La elección de estos materiales se basó en criterios de bajo costo, alta disponibilidad y propiedades fisicoquímicas variadas favorables (ser materiales porosos, semiconductores y/o conductores) para la remoción de contaminantes orgánicos, particularmente colorantes como el azul de metileno (como molécula modelo) en soluciones acuosas. Cada uno de estos compuestos presenta características específicas como alta área específica, presencia de grupos funcionales activos o capacidad fotocatalítica que pueden mejorar la eficiencia de procesos asistidos de adsorción o fotodegradación en tratamientos de aguas residuales.

## Metodología

La investigación se desarrolló de manera general por etapas, como se describe en el siguiente diagrama:



De manera específica, las etapas se basaron en la siguiente metodología para la remoción del colorante azul de metileno de agua contaminada:

1. Curva de calibración: Para la remoción de azul de metileno, se estableció una curva de calibración utilizando espectrofotometría UV-Vis, determinando inicialmente la longitud de onda máxima de adsorción a 664 nm. La solución estándar fue preparada con una concentración de  $60 \text{ mgL}^{-1}$  (o ppm). Para la curva de calibración se prepararon soluciones de azul de metileno con concentraciones de entre  $0.5$  y  $16 \text{ mgL}^{-1}$ .
2. Pruebas de adsorción: Para las pruebas de adsorción se emplearon los diferentes materiales adsorbentes incluyendo óxidos metálicos como  $\text{TiO}_2$ , óxidos mixtos Mg/Al calcinados a  $450^\circ\text{C}$ , así como materiales alternativos como cascarón de huevo triturado, grafito en polvo y grafito en barra. Las pruebas de adsorción se realizaron en Bach empleando  $500 \text{ mL}$  de sol de  $30 \text{ mgL}^{-1}$  de azul de metileno en contacto con  $0.5 \text{ g}$  de cada uno de los materiales.
3. Cinética de adsorción: Las pruebas cinéticas se realizaron empleando soluciones iniciales de  $30 \text{ mgL}^{-1}$ . Se llevaron a cabo muestreos en intervalos de tiempo determinados, realizando las diluciones correspondientes para asegurar que las concentraciones se mantuvieran dentro del rango de cuantificación establecido por la curva de calibración.
4. Cinética de degradación asistida por sonocatálisis: Se preparó una solución de azul de metileno a  $30 \text{ mgL}^{-1}$  para estudiar su degradación mediante irradiación ultrasónica. Se tomaron alícuotas de entre  $1$  a  $5 \text{ mL}$  a distintos tiempos de exposición ( $5, 10, 15, 30, 45$  y  $60 \text{ min}$ ), las cuales fueron

diluidas y analizadas por espectrofotometría UV-Vis a 664 nm para monitorear si había disminución en la concentración del colorante.

Para todas pruebas de medición del colorante azul de metileno se realizaron los escaneos en el intervalo de la luz visible de 400 a 760 nm, con la intención de identificar la modificación de los picos máximos de intensidad, así como la variación en el comportamiento de o los mismos por efecto de la adsorción versus la degradación.

## Resultados y discusión

La curva de calibración para la cuantificación el azul de metileno, empleando espectrofotometría UV-Vis: Las mediciones fueron realizadas mediante el escaneo de las longitudes de onda de 400 a 760nm (mostrados en la figura 1a), identificándose la máxima adsorción en 664 nm, característica del azul de metileno ( $C_{16}H_{18}ClN_3S$ ). Con los valores de la intensidad de la absorción en el pico máximo se construyó la curva de calibración como se muestra en la figura 1b).

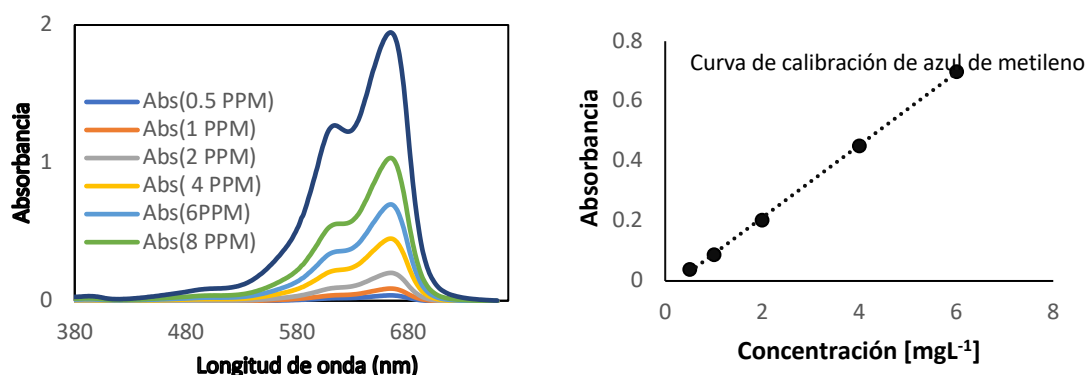


Figura 1. a) Espectros visibles de las distintas concentraciones aplicadas en la curva de calibración. b) Curva de calibración de azul de metileno. Elaboración propia.

La gráfica de espectros visibles (figura 1a) muestra la evolución de las curvas de absorbancia para diferentes concentraciones (de 0.5 a 8 ppm). Todas las curvas presentan su pico máximo en torno a los 664 nm, confirmando la identidad del compuesto y validando el uso de esta longitud de onda como referencia para el análisis cuantitativo.

La relación entre la concentración del colorante y su absorbancia se obtuvo con una ecuación de regresión de la curva de calibración (figura 1b) de la forma:

$$Absorbancia = 0.1208[Concentración] - 0.0305$$

El coeficiente de correlación lineal obtenido fue  $R^2 = 0.9994$ , lo que indica una muy buena linealidad y precisión del método analítico. Este ajuste permite determinar concentraciones desconocidas de azul de metileno en muestras tratadas, con alta confiabilidad.

En la figura 2 se muestra la adsorción del azul de metileno empleando el óxido de titanio ( $TiO_2$ ) el cual es un catalizador semiconductor empleado preferentemente en procesos de fotocatalisis. Al inicio se observó una baja absorbancia (0.008 a los 15 min), a los 30 minutos esta aumentó incluso por encima del valor inicial (0.140), lo que sugiere una desorción o redistribución del colorante. Posteriormente, la absorbancia se estabilizó en valores moderados, indicando una capacidad limitada y posiblemente reversible del  $TiO_2$  para retener el colorante azul de metileno. En contraste, la sonocatálisis mostró una disminución sostenida de la

absorbancia (de 0.133 a 0.030 en 30 min), evidenciando una degradación más efectiva gracias a las especies reactivas generadas por la cavitación ultrasónica. Aunque a los 60 minutos hubo un ligero repunte en la absorbancia (0.157), posiblemente por subproductos intermedios, el proceso resultó claramente más eficiente que la adsorción simple. En conjunto, los resultados destacan que el uso de ultrasonido potencia significativamente la acción del  $\text{TiO}_2$  como catalizador, promoviendo no solo la adsorción sino también la transformación química del contaminante.

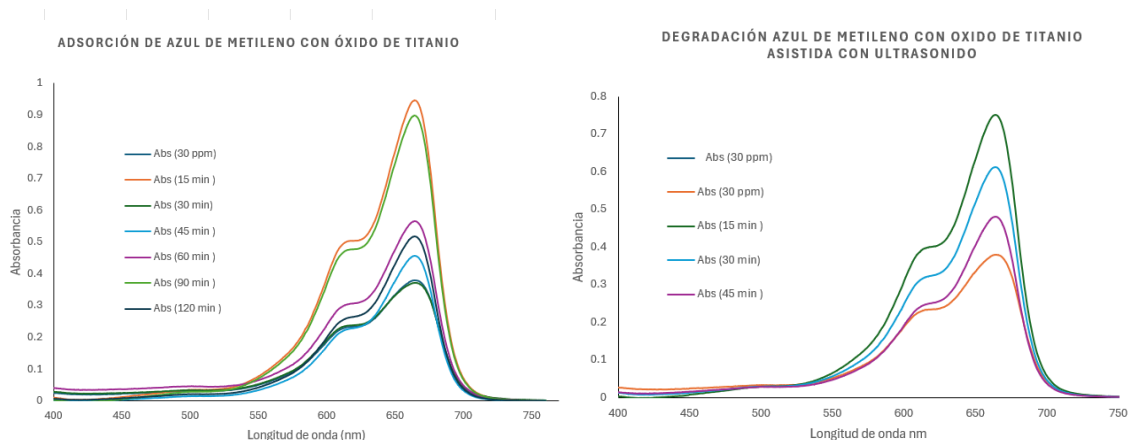


Figura 2. a) Adsorción y b) sonodegradación del azul de metileno mediante óxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ). Elaboración propia.

Con respecto del uso del cascarón de huevo triturado, considerado por su potencial como adsorbente, el cual está constituido principalmente por carbonato de calcio, se muestran los resultados de su empleo en ambos métodos, adsorción y sonodegradación en la figura 3, mostraron comportamientos que lograron diferenciarse en la evolución de la absorbancia a lo largo del tiempo. El proceso de adsorción presentó una disminución progresiva de la absorbancia del azul de metileno con el tiempo. La media de la absorbancia inicial (30 ppm) fue de 0.179 y esta se redujo hasta 0.152. Esto sugiere que, si hay adsorción, pero esta es baja y lenta del contaminante mediante mecanismos físicos y químicos sobre la superficie de la cáscara de huevo. La mayor eficiencia fue a los 15 minutos (0.161), lo cual es común en procesos donde sus sitios activos están disponibles al inicio. Sin embargo, la disminución se torna más lenta con el tiempo, sugiriendo un próximo equilibrio.

Por otro lado, la degradación asistida con irradiación ultrasónica empleando el cascarón de huevo triturado mostró una tendencia diferente, ya que, aunque las absorbancias iniciales fueron mayores (con un promedio de 1.041 para 30 ppm), se observa un aumento inicial en los primeros 30 minutos (0.987 a 0.976), seguido por una caída drástica a 0.150 a los 45 minutos. Esta diferencia puede deberse a la acción cavitacional del ultrasonido, que en un principio dispersa el contaminante, pero con el tiempo genera radicales libres de OH que inducen la ruptura de los enlaces del azul de metileno, promoviendo su degradación. La reducción significativa después de 30 minutos indica que el proceso de sonodegradación tiene un umbral de activación más tardío, pero mostrando capacidad para descomponer el contaminante una vez iniciado. Este fenómeno resalta el potencial del ultrasonido como un método avanzado de oxidación cuando se combina con un catalizador natural como el cascarón de huevo.

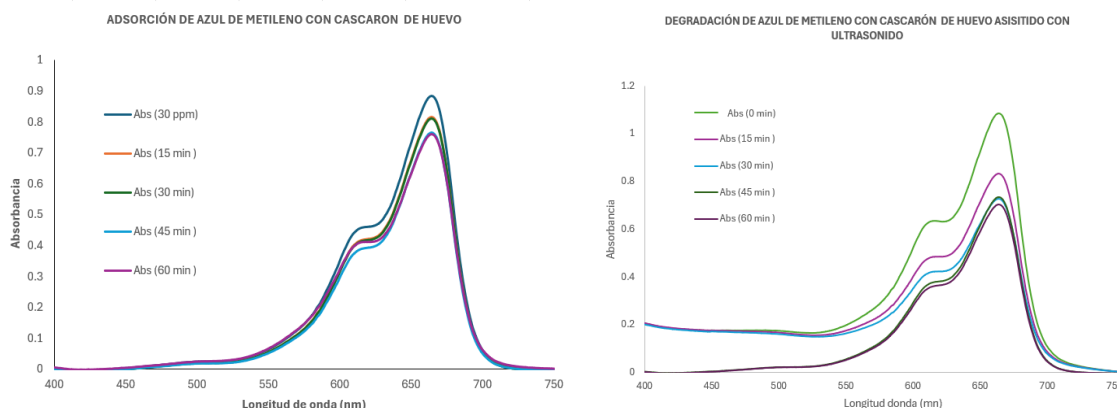


Figura 3. Adsorción y sonodegradación del azul de metileno empleando cascarón de huevo de huevo como catalizador. Elaboración propia.

Con respecto al empleo del catalizador de óxidos mixtos Mg/Al calcinados a  $450^{\circ}\text{C}$  (materiales con propiedades semiconductoras), los gráficos de la figura 4 muestran la evolución espectral del azul de metileno en función del tiempo tanto en procesos de adsorción como de degradación asistida con radiación ultrasónica. En el caso de la adsorción, se observa una disminución progresiva del pico de absorbancia a 664 nm, característico del azul de metileno, conforme avanza el tiempo. Desde los 30 ppm iniciales hasta los 120 minutos, la intensidad del pico disminuye de forma sostenida, lo que indica una remoción eficiente del colorante. La reducción más significativa ocurre en los primeros 30 minutos, lo que sugiere una alta afinidad del material por el colorante, posiblemente debido a su estructura porosa y la presencia de sitios activos en la superficie. En contraste, la sonodegradación también muestra una disminución del pico de absorbancia, pero esta es menos pronunciada y se estabiliza más rápidamente. Aunque hay una reducción inicial en los primeros 15 a 30 minutos, el proceso parece alcanzar un límite de eficiencia hacia los 60 minutos. Esto podría deberse a una menor generación de radicales oxidantes o a una limitada interacción entre el ultrasonido y el material catalítico bajo las condiciones aplicadas. En conjunto, los resultados indican que la sonodegradación con óxidos Mg/Al es más efectiva que la adsorción simple para la remoción del azul de metileno en solución acuosa. Esto refuerza el potencial de estos materiales como catalizadores económicos y eficientes para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes sintéticos.

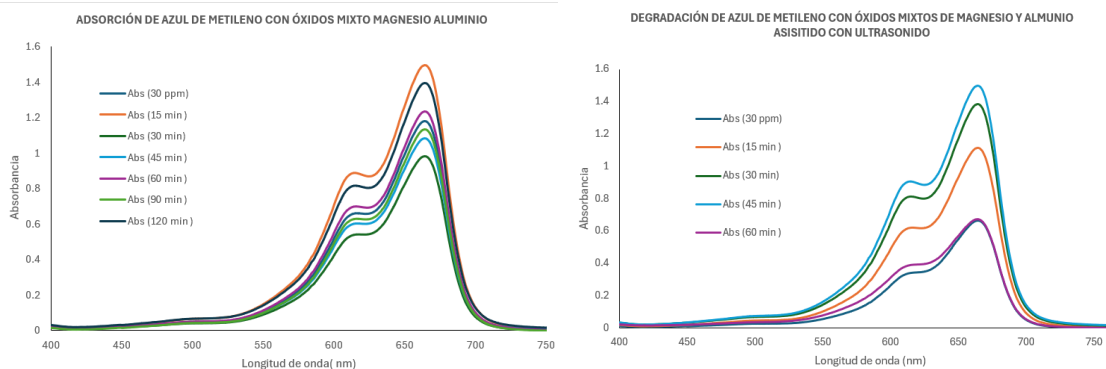


Figura 4. Adsorción y sonodegradación del azul de metileno mediante óxidos mixtos de magnesio y aluminio. Elaboración propia.

Por otro lado, en la figura 5 se muestra el empleo del polvo de grafito (el cual es un material conductor), en la curva de adsorción revela un aumento de la absorbancia en el intervalo de 0 a 30 minutos, alcanzando un promedio máximo de 0.988 a los 30 minutos, seguido de una disminución progresiva a los 60 minutos (abs promedio 0.160). Este comportamiento podría estar relacionado con interferencias espectroscópicas o desorción parcial del azul de metileno antes de estabilizarse el sistema. Sin embargo, tras 30 minutos, se observa una tendencia a la reducción de la concentración en solución, evidenciando una eficiencia de adsorción más marcada hacia los 60 minutos. En contraste, el proceso de sonodegradación muestra un comportamiento más lineal y creciente, ya que a partir de un valor inicial de absorbancia promedio de 0.273 (30 ppm), se observa un aumento continuo de la absorbancia hasta los 45 minutos (0.259), con una ligera disminución al minuto 60 (0.220). Este aumento progresivo de la absorbancia podría interpretarse como

resultado de la formación de productos intermedios de degradación del colorante, que también absorben en la misma longitud de onda, lo que dificulta una lectura directa del grado de mineralización. Comparando los métodos se aprecia que la adsorción tiene a una reducción más efectiva de la concentración de azul de metileno en solución en los primeros 60 minutos, mientras que la sonodegradación no muestra una remoción neta significativa en ese mismo intervalo, pero tiene el potencial de promover reacciones químicas que podrían conducir a la mineralización completa del contaminante a largo plazo.

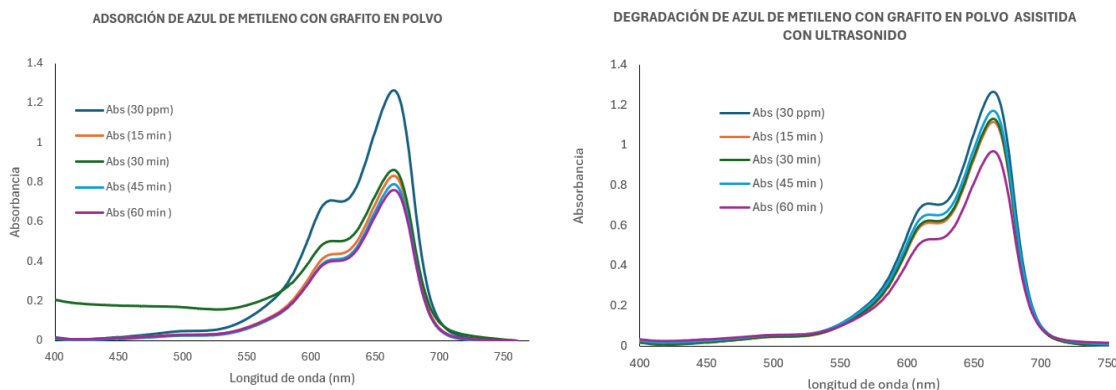


Figura 5. Adsorción y sonodegradación del azul de metileno mediante el uso de grafito en polvo como catalizador. Elaboración propia.

para identificar el efecto que tiene el área específica sobre las propiedades de los materiales, se empleó el grafito, pero en forma de barra compacta. En la adsorción se observó un ligero incremento de la absorbancia desde los 30 ppm iniciales (0.345) hasta un máximo a los 30 minutos (0.368), seguido de una disminución moderada a los 60 minutos (0.341), lo que nos sugiere una interacción superficial limitada entre el colorante y el grafito en barra, probablemente debido a una menor área específica disponible activa en comparación con el grafito en polvo.

En el caso de sonodegradación, parte de una absorbancia inicial ligeramente superior (0.390), con un descenso progresivo hasta 0.353 al minuto 60. Esto sugiere que la aplicación de ultrasonido favorece una degradación parcial del colorante, a pesar de no alcanzar una remoción completa.

Ambos métodos presentan eficiencias moderadas con diferencias poco marcadas entre ellos. Sin embargo, la sonodegradación mostró una tendencia más clara hacia la reducción de absorbancia a lo largo del tiempo, a diferencia de la adsorción, que presenta un aumento inicial y solo una baja leve al final del proceso. Los datos sugieren que el grafito en barra no es tan eficiente como el grafito en polvo en ningún proceso. Su menor superficie activa limita tanto la adsorción directa como su acción como soporte en procesos avanzados de oxidación.

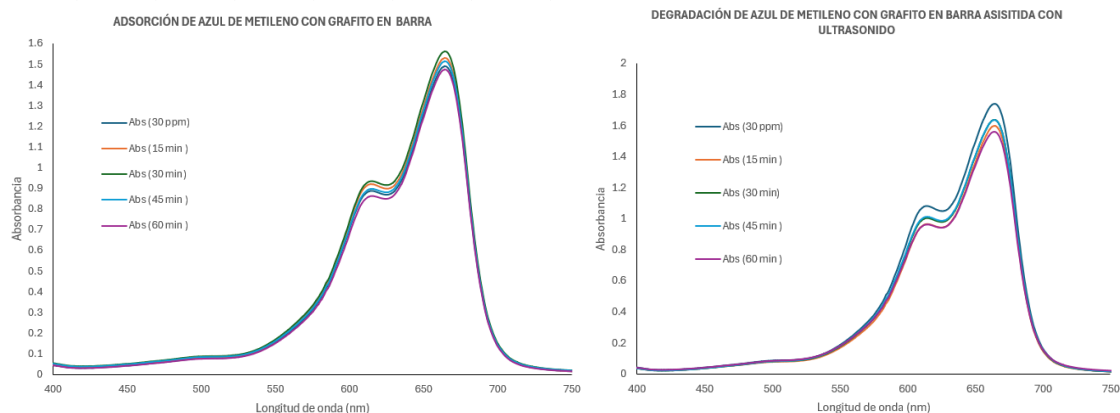


Figura 6. Adsorción y sonodegradación del azul de metileno mediante grafito en barra. Elaboración propia.

Finalmente, las figuras 7 y 8 muestra el compilado con las cinéticas de remoción del colorante azul de metileno empleando los diversos materiales a lo largo de 60 minutos sometidos, así como los dos procesos empleados de remoción (adsorción y sonodegradación).

En la técnica de adsorción (figura 7), el comportamiento de los materiales fue heterogéneo. El dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) mostró una disminución sostenida de la concentración de azul de metileno a lo largo del tiempo, indicando una capacidad adsorbente significativa. Aunque  $\text{TiO}_2$  es ampliamente reconocido por su actividad fotocatalítica, diversos estudios han demostrado su eficacia como adsorbente debido a su alta área específica y a la presencia de grupos hidroxilo superficiales que favorecen la interacción con colorantes catiónicos como el azul de metileno (Kumari *et al.*, 2023). De manera similar, los óxidos metálicos mixtos tratados térmicamente a  $450^\circ\text{C}$  mostraron un desempeño comparable al de  $\text{TiO}_2$ , lo que puede atribuirse a la sinergia entre los distintos óxidos presentes en su estructura, que generan una superficie heterogénea con mayor densidad de sitios activos (Khalaf *et al.*, 2024).

Por otro lado, el cascarón de huevo, compuesta mayoritariamente por carbonato de calcio, presentó una capacidad de adsorción limitada. A pesar de su bajo costo y abundancia, su eficacia como adsorbente requiere procesos de activación térmica o química para mejorar su porosidad y funcionalidad superficial (Ramírez-Rodríguez *et al.*, 2023). El grafito en polvo presentó una respuesta irregular; si bien su estructura laminar puede facilitar interacciones con el azul de metileno, la falta de funcionalización superficial y la posible reagrupación de partículas reducen su eficiencia (Fu *et al.*, 2022). Por otro lado, el grafito en barra no mostró capacidad significativa de adsorción, lo cual era previsible debido a su baja área específica y a la ausencia de grupos funcionales disponibles para interacción química.

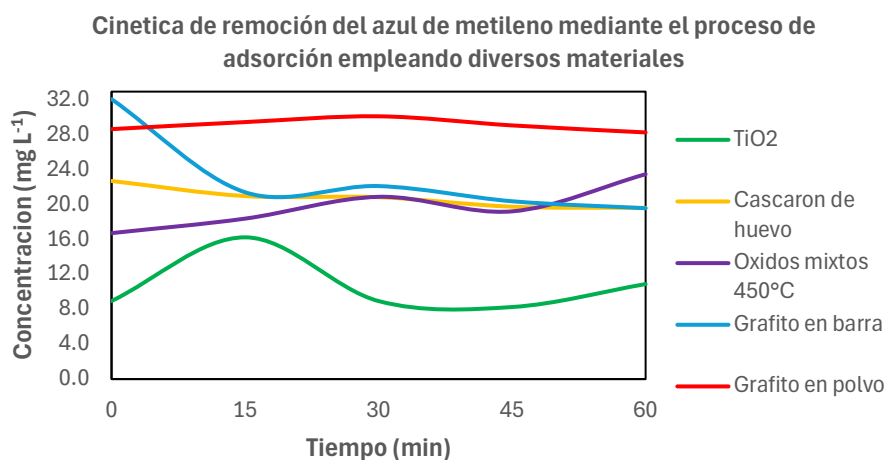


Figura 7. Cinética de adsorción mediante adsorción del azul de metileno con distintos materiales. Elaboración propia.

En el caso de la sonodegradación (figura 8), los resultados indican una mejora generalizada en la eliminación del colorante, especialmente con  $\text{TiO}_2$  y los óxidos mixtos. La aplicación de ultrasonido favorece la formación de cavitaciones acústicas que generan radicales altamente reactivos, como el  $\cdot\text{OH}$ , capaces de oxidar compuestos orgánicos presentes en solución.  $\text{TiO}_2$  mostró una disminución más acentuada que en adsorción, se encontró que la combinación de  $\text{TiO}_2$  con ultrasonido incrementa la formación de especies reactivas y mejora significativamente la velocidad de degradación del azul de metileno (Aziz *et al.*, 2023). El cascarón de huevo, aunque limitada en adsorción, mostró una ligera mejora bajo sonodegradación. Esto puede explicarse por el aumento de la turbulencia y la exposición superficial inducidas por las ondas ultrasónicas, que favorecen la interacción entre el contaminante y el material. El grafito en polvo también mostró mayor actividad bajo esta técnica, aunque su rendimiento fue inferior al de los materiales inorgánicos. En contraste, el grafito en barra no presentó ningún efecto significativo, confirmando su ineficiencia en ambos mecanismos.

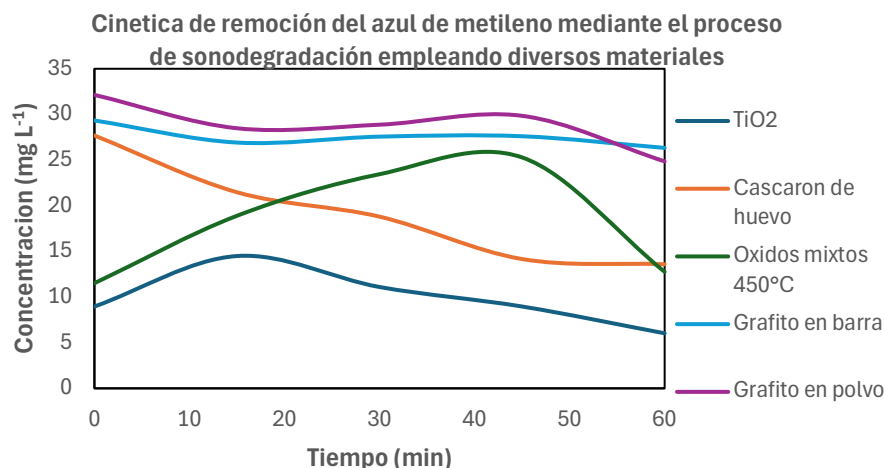


Figura 8. Cinética de degradación mediante sonodegradación del azul de metileno con distintos materiales. Elaboración propia.

## Conclusiones

Los resultados experimentales indican que el objetivo de esta investigación fue alcanzado con éxito. En particular, los materiales inorgánicos puros evaluados del tipo óxidos, óxido de titanio y óxidos mixtos de Mg/Al calcinados a 450 °C, mostraron la mayor capacidad de adsorción del azul de metileno, reduciendo significativamente su concentración en solución. La adsorción con TiO<sub>2</sub> y con óxidos Mg/Al permitió remociones sustanciales en 60 minutos, superando el desempeño de los materiales alternativos (cáscara de huevo, grafito en polvo). La aplicación catálisis asistida por radiación ultrasónica (sonocatálisis) potenció la degradación del colorante, especialmente en presencia de TiO<sub>2</sub>, alcanzando niveles de remoción casi totales en el tiempo experimental. En los adsorbentes de menor actividad, la sonicación mejoró moderadamente la eliminación del contaminante, mientras que el grafito en barra fue ineficaz en ambos procesos. En conjunto, estos hallazgos evidencian que los adsorbentes seleccionados (de bajo costo y alta superficie) son efectivos para la remoción de colorantes sintéticos. La integración de la sonocatálisis resultó en una remoción significativamente mayor del azul de metileno, lo que sugiere su utilidad en el tratamiento de aguas residuales industriales.

## Referencias

- Rajeshwarisivaraj, Sivakumar, S., Senthilkumar, P., & Subburam, V. (2001). Carbon from Cassava peel, an agricultural waste, as an adsorbent in the removal of dyes and metal ions from aqueous solution. *Bioresource Technology*, 80(3). [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00179-6](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00179-6)
- Oladoye, P. O., Ajiboye, T. O., Omotola, E. O., & Oyewola, O. J. (2022). Methylene blue dye: Toxicity and potential elimination technology from wastewater. In *Results in Engineering* (Vol. 16). <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100678>
- Vijayaraghavan, K., & Yun, Y. S. (2008). Biosorption of C.I. Reactive Black 5 from aqueous solution using acid-treated biomass of brown seaweed *Laminaria* sp. *Dyes and Pigments*, 76(3). <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2007.01.013>
- Arslan-Alaton, I., Gursoy, B. H., & Schmidt, J. E. (2007). Advanced oxidation of acid and reactive dyes: Effect of Fenton treatment on aerobic, anoxic and anaerobic processes. *Dyes and Pigments*, 78(2), 117–130. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2007.01.013>
- Eren, E., & Afsin, B. (2007). Investigation of a basic dye adsorption from aqueous solution onto raw and pre-treated sepiolite surfaces. *Dyes and Pigments*, 73(2), 162–167. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2005.10.005>
- Wang, S., & Li, H. (2007). Kinetic modelling and mechanism of dye adsorption on unburned carbon. *Dyes and Pigments*, 72(3), 308–314. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2006.10.005>

Wang, S., & Zhu, Z. H. (2007). Effects of acidic treatment of activated carbons on dye adsorption. *Dyes and Pigments*, 75(2), 306–314. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2006.07.014>

Esplugas, S., Bila, D. M., Krause, L. G. T., & Dezotti, M. (2007). Ozonation and advanced oxidation technologies to remove endocrine disrupting chemicals (EDCs) and pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in water effluents. *Journal of Hazardous Materials*, 149(3), 631–642. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.073>

Malato, S., Fernández-Ibáñez, P., Maldonado, M. I., Blanco, J., & Gernjak, W. (2009). Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: Recent overview and trends. *Catalysis Today*, 147(1), 1–59. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2009.06.018>

Oturan, M. A., & Aaron, J. J. (2014). Advanced oxidation processes in water/wastewater treatment: Principles and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(23), 2577–2641. <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.829765>

Rodríguez, E., Sordo, A., Rosal, R., & Perdigón-Melón, J. A. (2020). Aplicación de procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes emergentes en aguas residuales. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Química*, 19(1), 43–60.

Aziz, H. A., Zaini, M. A. A., & Bashir, M. J. K. (2023). Ultrasonic-assisted photocatalytic degradation of methylene blue using TiO<sub>2</sub>-based nanocomposites: Performance and mechanisms. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(1), 110351. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.110351>

El-Gamal, M. I., Said, N. M., & Barakat, M. A. (2024). Enhanced degradation of organic dyes using mixed metal oxide catalysts under ultrasonic irradiation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 105, 106658. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.106658>

Fu, H., Zhang, Y., & Xie, W. (2022). Adsorption of methylene blue by functionalized graphite:  $\pi$ - $\pi$  interactions and adsorption mechanisms. *Materials Chemistry and Physics*, 290, 126648. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126648>

Khalaf, M. M., Mahmoud, G. A., & Ali, A. E. (2024). Design of eco-friendly mixed oxides for adsorption of methylene blue dye from aqueous solutions. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 23, 100854. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2023.100854>

Kumari, S., Singh, A., & Choudhary, V. (2023). Adsorption and photodegradation of methylene blue dye using TiO<sub>2</sub> nanomaterials: A comprehensive study. *Materials Today: Proceedings*, 79, 323–330. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.048>

Khataee, A., Zarei, M., Esfandiyari Baygi, M., & Zarei, M. (2021). Removal of methylene blue from aqueous solutions by adsorption on biochar: kinetics and equilibrium study. *Water*, 14(2), 242. <https://doi.org/10.3390/w14020242>  
<https://www.mdpi.com/2073-4441/14/2/242>

Li, Y., Shao, J., Wang, X., Deng, Y., & Yang, H. (2022). Novel insights into the adsorption of organic contaminants by biochar: A review. *Chemosphere*, 287, 132275. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132275>  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653521025856>