Comparación de la degradación fotocatalítica del azul de metileno bajo diferentes tipos de radiación

Comparison of photocatalytic degradation of methylene blue under different types of radiation

Arias-Mateo, María Cruz * [a], Aguilar-Ucán, Claudia Alejandra [b], Vital-Ocampo, Angelica Gabriela [c] y Montoya Hernández, Daniel de Jesús [d]

[a] Universidad Autónoma del Carmen, NFP-7457-2025, 0000-0002-2040-5393, 849248
[b] Universidad Autónoma del Carmen, AAU-7723-2021, 0000-0002-1733-2867, 93717
[c] Universidad Autónoma del Carmen, q-3779-2019, 0000-0002-9767-6984, 94501
[d] Universidad Autónoma del Carmen, NBW-8911-2025, 0000-0002-6949-1907, 94496

Clasificación:

DOI: https://doi.org/10.35429/H.2025.1.47.55

Área: Ingeniería
Campo: Ingeniería
Disciplina: Ingeniería Química
Subdisciplina: Ciencia de los materiales

Key Handbooks

En este trabajo, se presenta una comparación de la degradación fotocatalítica del azul de metileno bajo luz UV y luz visible; el TiO_2 es altamente activo en el rango de luz UV, pero no en el visible, por lo que se buscan alternativas para generar su actividad en la región visible, una de ellas es el dopaje del catalizador; por lo cual se establecieron distintas degradaciones donde las variables fueron el tipo de radiación [luz UV y VIS] y el fotocatalizador [TiO_2 o TiO_2/Au]. Bajo estas condiciones y dado que la lámpara de Xe que se utilizó contiene una fracción de luz UV, fue necesario bloquearla para poder evaluar la degradación solo en el rango de luz visible. Para la comparación de los resultados fue necesario analizar los espectros UV-Vis. Para aplicar los resultados es importante comprender que los diferentes tipos de radiación pueden activar los catalizadores, lo que permite comparar su desempeño y eficiencia, con la finalidad de diseñar tecnologías fotocatalíticas cada vez más eficientes y sostenibles. Todos los autores tienen el perfil deseable PRODEP; los autores Aguilar-Ucán, Vital-Ocampo y Montoya-Hernández pertenecen al Sistema Nacional de Investigadores (SNI). Todos los autores son de la Universidad Autónoma del Carmen (Institución Pública Estatal). En el 2024 la autora Arias-Mateo tuvo 11 citas y las palabras claves más frecuentemente utilizadas son degradación fotocatalítica, catálisis y contaminantes orgánicos; Aguilar-Ucán tiene 192 citas, finalizó proyecto de CONAHCYT No. 169404 y las palabras claves más frecuentemente utilizadas son catálisis, reactores y mecanismos de reacción; los autores Vital-Ocampo y Montoya-Hernández han sido citados al menos por 30 artículos y/o tesis nacionales e internacionales, las palabras clave más utilizadas son modelo matemático, simulación, flujo multifásico y medio poroso.

Área: Impulso a la investigación de fronteras y la ciencia básica en todos los campos de conocimiento

Citación: Arias-Mateo, María Cruz, Aguilar-Ucán, Claudia Alejandra, Vital-Ocampo, Angelica Gabriela y Montoya Hernández, Daniel de Jesús. 2025. Comparación de la degradación fotocatalítica del azul de metileno bajo diferentes tipos de radiación. 47-55. ECORFAN.

* ✉ [marias@pampano.unacar.mx]

Handbook shelf URL: https://www.ecorfan.org/handbooks.php

ISBN 978-607-8948-59-8 /©2009 The Authors. Published by ECORFAN-Mexico, S.C. for its Holding Mexico on behalf of Handbook HCMPDS. This is an open access chapter under the CC BY-NC-ND license [http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/]

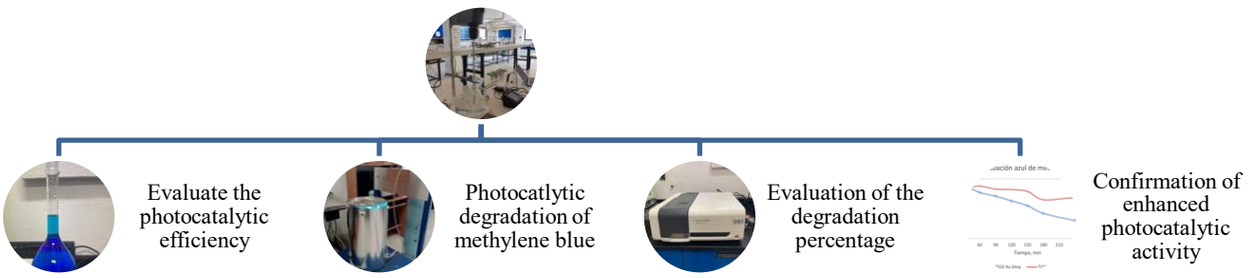
Peer Review under the responsibility of the Scientific Committee MARVID®- in contribution to the scientific, technological and innovation Peer Review Process by training Human Resources for the continuity in the Critical Analysis of International Research.

RENIECYT
Registro Nacional de Instituciones y Empresas Científicas y Tecnológicas
1702902 SECIHTI

Abstract

Heterogeneous photocatalysis has proven to be efficient in the degradation of organic contaminants, such as dyes and drugs; Within this group is methylene blue, which cannot be degraded by conventional treatment; therefore, a viable option is the heterogenous photocatalysis. In the present work, a comparison of the photocatalytic degradation of methylene blue under different types of radiation was carried out; For which a series of experiments were designed: UV bar light lamps, pen-type UV light and xenon lamps were used in the presence of TiO_2 and TiO_2-Au catalysts. 100 mL of a 10 ppm methylene blue solution with a ratio of 1 g/L of catalyst was used for each reaction and samples were taken at different times, filtered, and analyzed by UV-Vis Spectroscopy.

Comparison of photocatalytic degradation of methylene blue under different types of radiation.



Photocatalytic degradation, methylene blue, radiation

Resumen

La fotocatálisis heterogénea ha resultado ser eficiente en la degradación de contaminantes orgánicos, como los colorantes y fármacos; dentro de este grupo se ubica el azul de metileno, el cual no es posible degradarlo por métodos de tratamiento convencionales; por lo que una opción viable es este proceso de oxidación avanzada. En el presente trabajo se realizó una comparación de la degradación fotocatalítica del azul de metileno bajo diferentes tipos de radiación; para lo cual se diseñó una serie de experimentos donde se ocuparon: lámparas de luz UV de barra, luz UV tipo pluma y lámparas de xenón en presencia de los catalizadores de TiO_2 y TiO_2-Au. Se utilizaron 100 mL de una solución de azul de metileno de 10 ppm con una relación de 1 g/L de catalizador para cada reacción y se tomaron muestras a diferentes tiempos, se filtraron y se analizaron mediante Espectroscopía UV-Vis.

Comparación de la degradación fotocatalítica del azul de metileno bajo diferentes tipos de radiación.

Degradación fotocatalítica, Azul de metileno, Radiación

Introducción

En los últimos años se ha incrementado a un ritmo acelerado la población y con ello, un aumento en la demanda del recurso agua; por lo que se ha generado mucha preocupación en cuanto a la disponibilidad de tal recurso ya que en suma a los problemas de contaminación que prevalecen, el problema de la escasez de este vital líquido se acentúa.

Las actividades agrícolas e industriales han dado lugar a la liberación de diferentes contaminantes en los cuerpos de agua con impactos negativos en todo el mundo, lo que aumenta la necesidad de encontrar métodos de tratamiento seguros y factibles para las aguas residuales contaminadas [Rad et al., 2023].

Existen varios métodos en los que los contaminantes se eliminan mediante procesos de tratamientos convencionales; sin embargo, actualmente existe un particular interés sobre aquellos que son de tipo emergentes por su carácter recalcitrante, ya que ingresan a los cuerpos de agua a través de las descargas industriales [Peñas-Garzón et al., 2019]. Es aquí donde los procesos avanzados de oxidación se han empleado ampliamente para la eliminación de contaminantes orgánicos del agua.

De acuerdo con Nur y col [2022], la contaminación por colorantes ha atraído gran atención, ya que se usa ampliamente en industrias de textiles, teñidos, cosméticos, plásticos, farmacéutica, fotográfica y muchas otras. En el caso de las industrias textiles utilizan entre 100 y 150 litros de agua por kg de procesamiento de tejidos y contribuyen con el 17-20% de la contaminación mundial del agua reportada por el Banco Mundial. El colorante presente en los efluentes industriales consiste principalmente en sustancias tóxicas y cancerígenas que representan una grave amenaza para los seres humanos y el ecosistema marino; por lo tanto, es esencial tratar los efluentes coloreados antes de liberarlos en la corriente de agua natural para proteger el medio ambiente.

Para la eliminación de contaminantes orgánicos en las aguas residuales, se han utilizado un amplio número de técnicas, incluyendo la coagulación, la filtración con coagulación, la precipitación, la ozonización, la adsorción, el intercambio de iones, la ósmosis inversa y los procesos avanzados de oxidación [PAO] [Selim et al., 2023]. En el caso de la eliminación de tintes se han empleado métodos como la coagulación-floculación, la galvanoplastia, la precipitación, la sedimentación, la filtración [micro, ultra y nanofiltración], los cuales no han resultado ser tan efectivos, algunos suelen ser caros, requieren una gran cantidad de energía, generan productos peligrosos y residuos, y requieren períodos más largos para la remediación de los tintes; por lo que se ha recurrido a técnicas avanzadas de oxidación [Modi et al., 2023] y en donde, la fotocatálisis ha sido considerada para la degradación de los contaminantes orgánicos, incluidos dentro de ellos los colorantes sintéticos [Khan et al., 2024].

Dentro de este contexto, la fotocatálisis es uno de los procesos más investigados, donde la luz ultravioleta [UV]/visible se utiliza como fuente de energía para excitar los semiconductores, lo que conduce a la generación de radicales hidroxilos [*OH], que tienen el potencial de mineralizar los compuestos orgánicos. Además de generar radicales hidroxilo, esta tecnología promueve la formación de agujeros positivos en la superficie del catalizador, todo lo anterior contribuye a la degradación de los contaminantes [Kida & Ziembowicz, 2025].

La fotocatálisis heterogénea como tecnología avanzada de oxidación, se basa en la generación de radicales mediante las reacciones de óxido-reducción que suceden en la superficie del fotocatalizador debido a la acción de la luz UV y la presencia de un agente oxidante [Hincapié-Mejía et al., 2011]. El TiO_2 es el fotocatalizador más utilizado, ya que es un semiconductor estable, no tóxico y barato con un ancho de banda de energía de 3.2 eV. Esta brecha de banda de energía puede ser superada por la luz ultravioleta para que los electrones puedan obtener suficiente energía para salir de la banda de valencia y llegar a la banda de conducción, dejando agujeros que pueden reaccionar con el agua y producir *OH. La luz visible con alrededor del 3% de UV no proporciona suficiente energía para la excitación de TiO_2, por lo que se da una rápida recombinación de electrones y agujeros, lo que hace que el uso de la luz visible sea ineficiente [Rad et al., 2023]; sin embargo, para mejorar este inconveniente, los avances recientes han demostrado que la modificación por dopaje por elementos metálicos, mejora la absorción en el rango de luz visible [Huang et al., 2025].

Para una mejor eficiencia fotocatalítica, el rango de absorción de luz de los fotocatalizadores de TiO_2 debe ampliarse a la luz visible. Cabe señalar que las propiedades ópticas, eléctricas y catalíticas para las aplicaciones en fotocatálisis, así como la creación de nuevos estados y defectos de energía, dependen en gran medida del método de síntesis y de la elección del dopante [Slimani et al., 2023].

De acuerdo con lo anteriormente descrito, el catalizador TiO_2 empleado para el desarrollo de esta investigación ha sido dopado con nanopartículas de oro y se analiza su desempeño tanto en el rango de luz UV como en el de luz visible, con la finalidad de evaluar los efectos que genera en la degradación del contaminante azul de metileno. Cabe mencionar que el interés de evaluar la influencia en el tipo de radiación es que se pretende que proyectos como estos sean escalables y poder aprovechar así la energía solar, la cual tiene en mayor porcentaje la luz visible.

Metodología

La presente investigación parte del interés en la degradación de contaminantes orgánicos que requieren un proceso de oxidación avanzada para ser degradado; por lo que se seleccionó el contaminante azul de metileno, el cual es muy utilizado en distintos sectores de la vida cotidiana y que ha logrado mineralizarse con el proceso de fotocatálisis heterogénea. Se sintetizó el TiO_2 siguiendo el método de sol-gel y para mejorar las propiedades del material se dopó con nanopartículas de oro, con una relación de 5% en masa; por lo que se evalúa cómo influye el tipo de radiación que se irradia en el porcentaje de degradación del azul de metileno.

Síntesis y dopaje del catalizador TiO_2.

En un reactor de vidrio de 500 mL se mezclaron 24.34 g de butóxido de titanio marca Sigma -Aldrich con 29.6 g de 1- butanol marca J.T. Baker, dicha mezcla se mantiene en agitación a 250 rpm, después de haber transcurrido una hora, se adiciona por goteo lento 9.87 g de 1-butanol, así como 7.8 g de agua desionizada. Posteriormente, el sistema se coloca en un baño María con una temperatura constante de 65°C por espacio de 2 horas. Durante este tiempo, el reactor debe estar cerrado y conectado a un sistema de reflujo para condensar y recircular los solventes que se evaporan. Transcurridas las 2 horas, el reactor se deja en reposo durante 24 horas, a temperatura ambiente. El material obtenido se seca dentro de una mufla a 100°C durante 24 horas. Finalmente el sólido se calcina a 550°C durante 3 horas.

Dopaje del semiconductor con partículas de Au.

Para el proceso de fotodepositación se utilizó como precursor el ácido tetracloroáurico trihidratado [$HAuCl_4 \cdot 3H_2O$] y la cantidad a emplear se estimó mediante la siguiente fórmula:

$$W_{HAuCl_4 \cdot 3H_2O} = \frac{(W_{Au})(MW_{HAuCl_4 \cdot 3H_2O})}{MW_{Au}} \quad [1]$$

Donde $W_{HAuCl_4 \cdot 3H_2O}$ corresponde al peso del ácido tetracloroáurico trihidratado que se utilizó para depositar 5% en peso de las partículas de oro en el semiconductor.

Una vez calculada la cantidad requerida del precursor, en un reactor de vidrio se depositaron 1 g de TiO_2, la cantidad requerida de $HAuCl_4 \cdot 3H_2O$, 100 mL de agua desionizada y 8 mL de etanol y se mantuvo en agitación continua por una hora en fase oscura y posteriormente 5 horas bajo la irradiación de 4 lámparas UV de 365 nm y 15 W, al término del período de reacción se retiró el agua por filtración al vacío, se dejó secar a temperatura ambiente durante la noche y posteriormente se calcinó a 550°C durante 3 horas.

Degradación fotocatalítica

Para evaluar la influencia del tipo de luz irradiada en la degradación del colorante azul de metileno, se realizaron experimentos con lámparas de luz UV en forma de barra, luz UV tipo pluma y lámparas de xenón. Se prepararon soluciones de azul de metileno a una concentración de 10 ppm, la cual se mantuvo constante para todas las reacciones y se les adicionó catalizador en una relación de 1g de catalizador/L de solución.

Cada reacción inició dejando la solución 1 hora en fase oscura para la adsorción-desorción, acto seguido se encendió la lámpara. Se tomaron muestras de las soluciones en reacción cada 30 minutos las primeras 3 horas y después, cada hora hasta completar las 5 horas de reacción. Posteriormente, las muestras tomadas se filtraron con una membrana de celulosa Millipore GV [diámetro de poro 0.22 μm] y se analizaron mediante espectroscopía UV-Vis.

Cabe mencionar que para las reacciones 5 y 6 se utiliza la lámpara de Xenón que contiene una cantidad de luz UV, por lo que fue necesario bloquearla con una solución de $NaNO_2$, para evitar degradación en este rango de luz donde el TiO_2 es muy activo.

Las pruebas que se realizaron se resumen en la Tabla 1

Box 1

Tabla 1

Experimentos realizados para la degradación del azul de metileno

No. de reacción	Catalizador empleado	Tipo de lámpara
1	TiO_2-Au	UV Tipo pluma
2	TiO_2	UV Tipo pluma
3	TiO_2-Au	Xenón
4	TiO_2	Xenón
5	TiO_2-Au	Xenón bloqueando luz UV
6	TiO_2	Xenón bloqueando luz UV

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de degradación de las soluciones de colorantes se determinó a partir de la ecuación 2.

$$\%\ \text{degradación} = \left(1 - \frac{A_t}{A_0}\right) * 100 \qquad [2]$$

Donde A_0 es la absorbancia inicial de la solución de colorante antes de la degradación y A_t es la absorbancia de la solución de colorante a cualquier tiempo t.

Resultados

Los resultados obtenidos de las reacciones propuestas se analizan a continuación. La Figura 1 muestra la trayectoria de la degradación del azul de metileno de la solución de 10 ppm utilizando una lámpara UV tipo pluma de 365 nm y los catalizadores TiO_2-Au y TiO_2, que corresponden a las reacciones 1 y 2 mostradas en la Tabla 1. Los porcentajes de degradación fueron de 92.4 y 98.8 % respectivamente; como se sabe, el TiO_2 es muy activo en presencia de luz UV, por lo que ambos catalizadores muestran un desempeño favorable en la reacción; sin embargo, en estas reacciones no puede apreciarse un efecto positivo del dopaje del catalizador.

Box 2

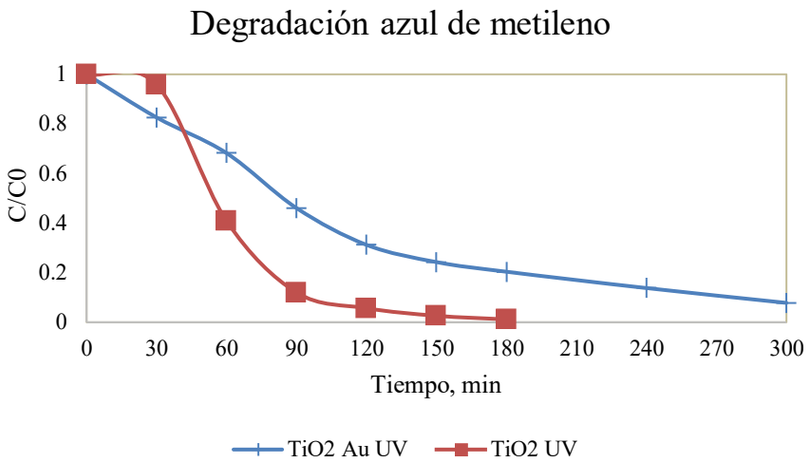


Figura 1

Degradación fotocatalítica de una solución de azul de metileno la solución de 10 ppm con lámpara UV tipo pluma y catalizadores TiO_2-Au y TiO_2.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2 se muestra la trayectoria que siguió la degradación de la solución de azul de metileno de 10 ppm bajo la irradiación de luz visible obtenida a partir de una lámpara de xenón y en presencia de ambos catalizadores; los porcentajes de degradación son de 99.6% para el TiO_2-Au y 98.87 % para el TiO_2. Aunque el cambio de tipo de radiación ha permitido un mayor porcentaje de degradación si comparamos la reacción 3 respecto a la reacción 1; la diferencia no es significativa pues la diferencia en los porcentajes de degradación entre los tipos de catalizadores es apenas menor al 1%.

Box 3

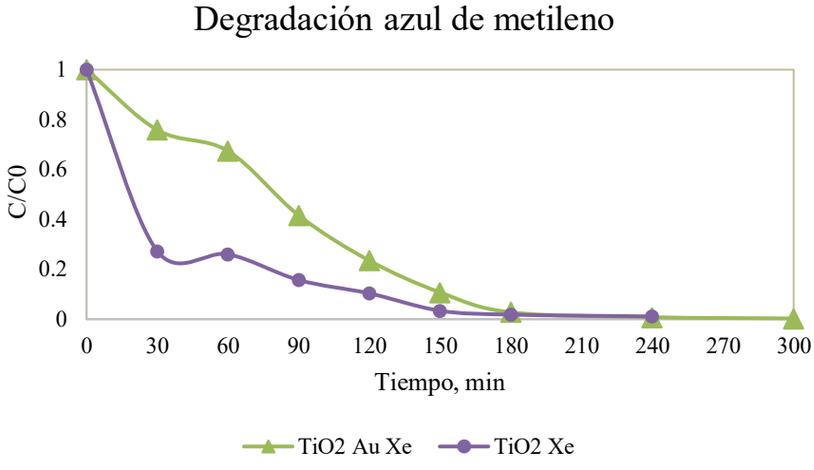


Figura 2

Degradación fotocatalítica de una solución de azul de metileno de 10 ppm con lámpara de Xe y catalizadores TiO_2-Au y TiO_2.

Fuente: Elaboración propia

La Figura 3 muestra los resultados obtenidos de la degradación de solución de 10 ppm de azul de metileno, bajo la influencia de lámpara de xenón utilizando los dos tipos de catalizadores mencionados, la diferencia con las reacciones 3 y 4, es que para estas reacciones se bloqueó la luz UV presente en la lámpara con $NaNO_2$, dado que la lámpara de Xe contiene una fracción de luz UV, los porcentajes de degradación obtenidos fueron de 75.1 % para TiO2-Au y 35.78 % para el TiO_2, dichos resultados muestran la efectividad del dopaje del catalizador, ya que al disminuir el ancho de banda lo hace activo a la luz visible de la lámpara.

Box 4

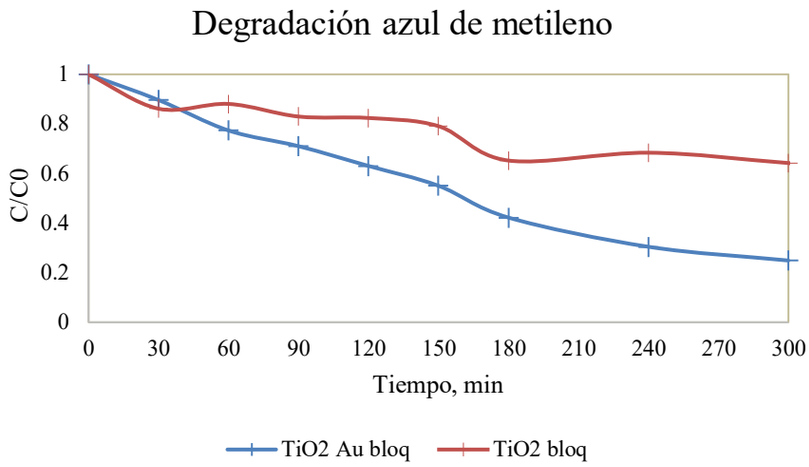


Figura 3

Degradación fotocatalítica de una solución de azul de metileno de 10 ppm con lámpara de Xe y catalizadores TiO_2-Au y TiO_2 bloqueando la luz UV

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 2 se concentran los porcentajes de degradación obtenidos para cada una de las reacciones que se llevaron a cabo.

Box 5

Tabla 2.

Porcentajes de degradación de las muestras de 10 ppm con lámpara UV tipo pluma y de xenón.

No. de reacción	% de degradación
1	92.4
2	98.8
3	99.6
4	98.87
5	75.1
6	35.78

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 2 muestra que se obtuvo un mayor porcentaje de degradación utilizando TiO_2 con la lámpara UV tipo pluma en comparación con el TiO_2-Au [reacción 1 y 2], mientras que con la lámpara de Xe se obtuvo lo contrario [reacción 3 y 4], esto se atribuye a que la lámpara tiene luz visible; de tal forma que el dopaje que se le realizó al catalizador lo mejoró en ese rango de longitud de onda; sin embargo, no es significativa la diferencia ya que, el TiO_2 es muy activo a la luz UV y la lámpara de Xe contiene una fracción de ésta. Tomando en cuenta este último aspecto se analizan las reacciones 5 y 6, para las cuales se bloqueó la luz UV, obteniendo resultados muy favorables para el catalizador dopado ya que degrada 75.1% del colorante vs. el catalizador sin dopar que solo degradó el 35.78%.

Finalmente se obtienen resultados similares entre la reacción 1 y reacción 7 que corresponden a sistemas irradiados bajo luz UV, el primero con lámparas tipo pluma y el segundo en forma de barra.

Conclusiones

En este estudio se evaluó la actividad fotocatalítica de los catalizadores de TiO_2 y TiO_2-Au en la degradación del colorante azul de metileno, empleando distintas fuentes de irradiación: luz ultravioleta [UV] proveniente de una lámpara tipo pluma [365 nm] y luz visible generada por una lámpara de xenón.

Los resultados mostraron que ambos catalizadores exhiben una elevada eficiencia bajo irradiación UV, con porcentajes de degradación de 98.8 % para TiO_2 y 92.4 % para TiO_2-Au, sin observarse un efecto positivo que pueda atribuirse al dopaje en estas condiciones, dado que el TiO_2 puro posee una alta actividad bajo este tipo de radiación.

Bajo irradiación de la lámpara de xenón sin filtrado de la luz UV, ambos catalizadores también lograron altos porcentajes de degradación [99.6 % para TiO_2-Au y 98.87 % para TiO_2], evidenciando una leve ventaja para el catalizador dopado, aunque la diferencia no resultó ser significativa y se atribuye a que la lámpara contiene una fracción UV a la cual es altamente activo el TiO_2.

Al bloquear la luz UV de la lámpara de xenón mediante $NaNO_2$, se observó una marcada diferencia en el comportamiento de los catalizadores: TiO_2-Au alcanzó un porcentaje de degradación de 75.1 %, mientras que TiO_2 degradó únicamente el 35.78 % del azul de metileno. Estos resultados confirman que el dopaje con oro mejora la respuesta del TiO_2 en el rango de la luz visible, disminuyendo la energía de banda prohibida y favoreciendo la generación de pares electrón-hueco bajo irradiación de luz visible.

En conclusión, los resultados obtenidos ponen en evidencia que, aunque el TiO_2 presenta una alta eficiencia bajo radiación UV, el dopaje con metales como el oro constituye una estrategia efectiva para extender su actividad fotocatalítica hacia el espectro de luz visible, lo que resulta relevante para aplicaciones donde se busca un mayor aprovechamiento de la radiación solar natural.

Declaraciones

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses. No tienen intereses financieros o relaciones personales que pudieran haber influido en este libro.

Contribución de los autores

Arias-Mateo, María Cruz y Aguilar-Ucán, Claudia Alejandra: Contribuyeron en la idea del proyecto;

Arias-Mateo, María Cruz: La realización de pruebas de laboratorio y redacción; todos los autores participaron en la interpretación de resultados y conclusiones.

Agradecimientos

A la Dra. Elvira Zarazúa Morín^{+} por las facilidades para la realización de los experimentos y a la beca CONACYT No. 634679.

Abreviaturas

PAO	Procesos avanzados de oxidación
UV	Luz ultravioleta
Xe	Xenón

Referencias

Antecedentes

Khan, S., Noor, T., Iqbal, N., & Yaqoob, L. [2024]. Photocatalytic Dye Degradation from Textile Wastewater: A Review. *In ACS Omega. American Chemical Society*. 9 [20], 21751-21767.

Modi, S., Yadav, V. K., Ali, D., Choudhary, N., Alarifi, S., Sahoo, D. K., Patel, A., & Fulekar, M. H. [2023]. Photocatalytic Degradation of Methylene Blue from Aqueous Solutions by Using Nano-ZnO/Kaolin-Clay-Based Nanocomposite. *Water*. *15*[22], 3915.

Nur, A., Sultana, M., Mondal, A., Islam, S., Nur Robel, F., Islam, A., & Aktar Sumi, M. [2022]. A review on the development of elemental and codoped TiO_2 photocatalysts for enhanced dye degradation under UV–vis irradiation. *Journal of Water Process Engineering.*

Peñas-Garzón, M., Gómez-Avilés, A., Bedia, J., Rodriguez, J. J., & Belver, C. [2019]. Effect of activating agent on the properties of TiO_2 /activated carbon heterostructures for solar photocatalytic degradation of acetaminophen. *Materials*. *12*[3], 378.

Selim, H., Sheha, E. R., Elshypany, R., Raynaud, P., El-Maghrabi, H. H., & Nada, A. A. [2023]. Superior Photocatalytic Activity of BaO@Ag_3PO_4 Nanocomposite for Dual Function Degradation of Methylene Blue and Hydrogen Production under Visible Light Irradiation. *Catalysts*. 13[2], 363.

Básicos

Hincapié-Mejía, G. M., Ocampo, D., Restrepo, G. M., & Marín, J. M. [2011]. Fotocatálisis heterogénea y foto-fenton aplicadas al tratamiento de aguas de lavado de la producción de biodiesel. *Información Tecnológica*. *22*[2], 33–42.

Kida, M., & Ziembowicz, S. [2025]. The Influence of Ultraviolet Radiation, Ozonation, and Ultrasonic Field on the Effectiveness of Dye Removal from Aqueous Solutions. *Applied Sciences*. *15*[5], 2373.

Soporte

Huang, Y., Li, M., & Liu, J. [2025]. Photocatalytic Degradation of Mycotoxins by Heterogeneous Photocatalysts. *Catalysts.* 15 [2], 112.

Rad, S. M., Ray, A. K., & Barghi, S. [2023]. Enhancing Photon Transfer Efficiency in Photocatalysis Using Suspended LED Lights for Water Treatment. *Reactions*. *4*[2], 246–253.

Slimani, Y., Almessiere, M. A., Mohamed, M. J. S., Hannachi, E., Caliskan, S., Akhtar, S., Baykal, A., & Gondal, M. A. [2023]. Synthesis of Ce and Sm Co-Doped TiO_2 Nanoparticles with Enhanced Photocatalytic Activity for Rhodamine B Dye Degradation. *Catalysts*. 13[4], 668.