

## Síntesis verde óxido de zinc (ZnO) utilizando extractos de *Ephedra californica* y su aplicación en la fotodegradación de colorantes

### Green synthesis of zinc oxide (ZnO) using *Ephedra californica* extracts and its application in dye photodegradation

Quevedo Robles, R.V.<sup>1</sup>, Arce Barajas, A.G.<sup>2</sup>, Cota Leal, M.A.<sup>1</sup>, Ochoa Estrella, F.J.<sup>1</sup>, Luque Morales, P.A.<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Cajeme, C. P.85024, Ciudad Obregón, Sonora México.

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño-Universidad Autónoma de Baja California, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México.

\*Corresponding Author: [pluque@uabc.edu.mx](mailto:pluque@uabc.edu.mx)

Recibido: 27 de enero de 2025

Aceptado: 08 de mayo de 2025

#### Resumen

En este trabajo se reporta la síntesis verde de óxido de zinc (ZnO) utilizando extractos de *Ephedra californica* en concentraciones 1%, 3% y 5% p/v (peso/volumen) los cuales actúan como agentes reductores y estabilizantes, con el objetivo de evaluar su influencia en la formación ZnO. Los materiales obtenidos se caracterizaron mediante Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) y Espectroscopia Ultravioleta Visible (UV-Vis). En el espectro de FTIR se observó una banda centrada a 440 cm<sup>-1</sup>, característica del enlace Zn-O, confirmando la formación de ZnO. Asimismo, el análisis de UV-Vis mostró una disminución del bandgap conforme incrementaba la concentración del extracto. La actividad fotocatalítica se evaluó en la degradación de tres colorantes modelo: azul de metileno, naranja de metilo y rodamina B bajo radiación UV. El ZnO sintetizado con 5% de extracto mostró una mayor eficiencia en la degradación del azul de metileno (99.63% en 180 min), mientras que para los otros colorantes se obtuvieron resultados óptimos con concentraciones intermedias. Estos resultados demuestran el potencial de la síntesis verde como una alternativa eco-amigable para la producción de ZnO con aplicaciones en el tratamiento de agua contaminada.

**Palabras clave:** Síntesis verde; óxido de zinc; *Ephedra californica*; fotocatalisis; tratamiento de agua.

#### Abstract

In this work, the green synthesis of zinc oxide (ZnO) using *Ephedra californica* extracts at concentrations of 1%, 3%, and 5% w/v (weight/volume) is reported. The extracts act as reducing and stabilizing agents to evaluate their influence on ZnO formation. The obtained materials were characterized by Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Ultraviolet Visible Spectroscopy (UV-Vis). The FTIR spectrum showed a band centered at 440 cm<sup>-1</sup>, characteristic of the Zn-O bond, confirming the formation of ZnO. Likewise, the UV-Vis analysis revealed a decrease in the bandgap as the extract concentration increased. The photocatalytic activity was evaluated in the degradation of three model organic dyes, methylene blue, methyl orange, and rhodamine B, under UV radiation. The ZnO synthesized with 5% extract exhibited the highest efficiency in degrading methylene blue (99.63% in 180 min), while optimal results for the other dyes were obtained with intermediate extract concentrations. These results demonstrate the potential of green synthesis as an eco-friendly, sustainable alternative for producing ZnO with applications in wastewater treatment.

**Keywords:** Green synthesis; zinc oxide; *Ephedra californica*; photocatalysis; water treatment.

## INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital para todos los organismos y constituye un componente esencial en los procesos biológicos, agrícolas e industriales. Sin embargo, las actividades antropogénicas han generado una contaminación creciente de los cuerpos de agua, particularmente por el vertido de colorantes provenientes de la industria papelera, cosmética, farmacéutica y textil (Singh & Sinha, 2025). Se estima que más de diez mil tipos de pigmentos y colorantes sintéticos se utilizan actualmente en estas industrias, de los cuales aproximadamente el 15% se desecha en los efluentes (Slama et al., 2021). Estos compuestos presentan estructuras químicas complejas que les confieren alta estabilidad y resistencia a los métodos convencionales de tratamiento, lo que los convierte en contaminantes persistentes y de difícil eliminación (Kayani et al., 2025). La industria textil se ha convertido en la principal causa de contaminación del agua debido al uso de grandes cantidades de colorantes orgánicos. Se estima que en el mundo se producen anualmente más de 70 000 toneladas de colorantes orgánicos, y hasta un 20 % se pierde durante el procesamiento industrial (Al-Tohamy et al., 2022). Esta situación afecta no solo la calidad del agua, sino también la biodiversidad acuática y la salud humana, debido a la bioacumulación y a la toxicidad de los compuestos derivados de su degradación (Barzinjy et al., 2020; Nguyen et al., 2018).

Entre los métodos de tratamiento de aguas residuales se encuentran la coagulación, la adsorción, la ósmosis inversa y la ultrafiltración. Aunque eficaces, estas técnicas suelen ser costosas, generan subproductos secundarios y no siempre garantizan la completa eliminación de los contaminantes (Mudhoo et al., 2020; My Hanh Le et al., 2022). Frente a estas limitaciones, los procesos avanzados de oxidación, como la fotocatálisis heterogénea, han cobrado relevancia por su capacidad de degradar compuestos orgánicos hasta su mineralización completa, produciendo únicamente dióxido de carbono y agua como subproductos (Yuvaraja et al., 2025).

El óxido de zinc (ZnO) se ha consolidado como un fotocatalizador eficiente gracias a su estabilidad química, biocompatibilidad, bajo costo y capacidad para absorber radiación en la región ultravioleta (Bhaskar & Bhame,

2024). En los últimos años, la síntesis verde de materiales ha surgido como una alternativa sustentable a los métodos químicos tradicionales en la síntesis de ZnO, empleando extractos vegetales ricos en flavonoides, fenoles y otras biomoléculas capaces de reducir y estabilizar nanopartículas metálicas (Al-darwesh et al., 2024). En este contexto, *Ephedra californica* representa una fuente natural promisoría debido a su contenido fitoquímico y su adaptabilidad a condiciones áridas. El presente trabajo propone la síntesis verde de ZnO utilizando extractos de *E. californica* en distintas concentraciones, con el objetivo de evaluar su eficiencia fotocatalítica en la degradación de tres colorantes modelo.

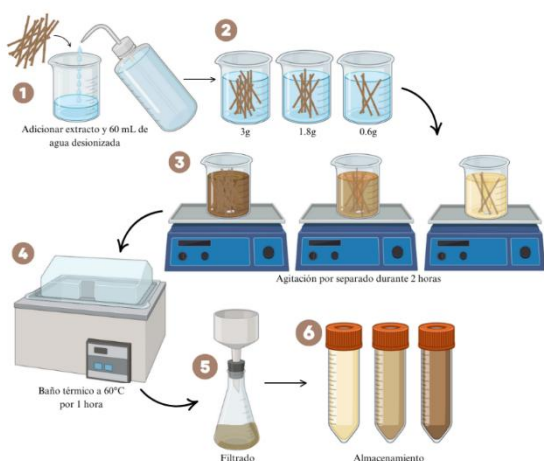
## MATERIALES Y MÉTODOS

### Preparación de extracto de *Ephedra californica*

Los tallos secos de *Ephedra californica* fueron adquiridos en un supermercado en Baja California, México. El material vegetal se limpió cuidadosamente con agua desionizada para eliminar impurezas superficiales y posteriormente se secó. Una vez seco, se trituró hasta obtener un polvo fino. Para la obtención del extracto de *Ephedra californica*, se pesaron diferentes cantidades del material vegetal (Figura 1), para obtener concentraciones de 1%, 3% y 5%, las cuales se colocaron en 60 mL de agua desionizada. Las mezclas fueron colocadas en agitación magnética durante 2 horas, posteriormente, las suspensiones se colocaron en un baño térmico a 60 °C durante 1 hora para obtener la extracción de compuestos bioactivos como flavonoides, fenoles y alcaloides. El extracto obtenido se filtró utilizando papel Whatman No. 4 y se almacenó para su posterior uso en la síntesis de ZnO.

### Caracterización de ZnO

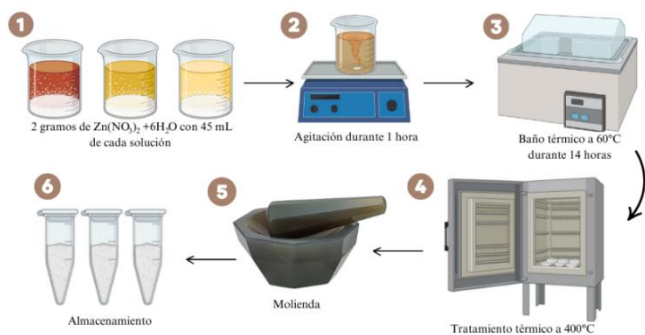
Las nanopartículas sintetizadas fueron caracterizadas mediante espectroscopía ultravioleta-visible (UV-Vis) y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). La técnica UV-Vis se empleó para identificar el borde de absorción característico del ZnO y estimar la energía de la banda prohibida mediante el método de TAUC. Las mediciones se realizaron en un espectrofotómetro Lambda 365 (Perkin Elmer). Por su parte, la técnica FTIR permitió identificar los grupos funcionales asociados al extracto vegetal y confirmar la presencia de enlaces Zn-O. Los espectros se obtuvieron en un espectrofotómetro Perkin Elmer, utilizando el modo ATR en el rango de 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ .



**Figura 1.** Obtención de extractos.

### Síntesis verde de nanopartículas de ZnO

La síntesis de óxido de zinc se realizó empleando como precursor nitrato de zinc hexahidratado  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . En un vaso de precipitado, se colocaron en agitación magnética 2 gramos de la sal precursora de Zinc en 45 mL del extracto vegetal previamente preparado, Figura 2. La mezcla se mantuvo en agitación constante 1 hora bajo temperatura ambiente. Posteriormente, las soluciones se colocaron en un baño térmico durante 14 horas hasta tener una apariencia caramelizada. Las muestras fueron transferidas a capsulas de porcelana y se calcinaron en una mufla a 400  $^{\circ}\text{C}$  durante 1 hora. Finalmente, el polvo obtenido fue molido y almacenado para su posterior uso.



**Figura 2.** Proceso de síntesis de ZnO.

### Evaluación fotocatalítica

La actividad fotocatalítica de ZnO se evaluó en la degradación de tres colorantes modelo: azul de metileno (MB), naranja de metilo (MO) y rodamina B (RhB). Se prepararon soluciones acuosas de cada colorante con una concentración de 15 ppm. En un experimento típico, se colocaron 50 mg de ZnO en 50 mL de la solución del colorante y se mantuvo en agitación magnética durante 30 minutos en oscuridad para alcanzar el equilibrio de adsorción-desorción. Posteriormente, las suspensiones se irradiaron con luz ultravioleta (10 W, 18  $\text{mJ cm}^{-2}$ ) durante 180 minutos. Cada 30 minutos se tomaron alícuotas de la solución, las cuales se centrifugaron para separar el catalizador, y el sobrenadante se analizó por espectroscopía UV-Vis a fin de determinar la concentración remanente del colorante. La eficiencia de degradación se calculó mediante la ecuación (Ec.):

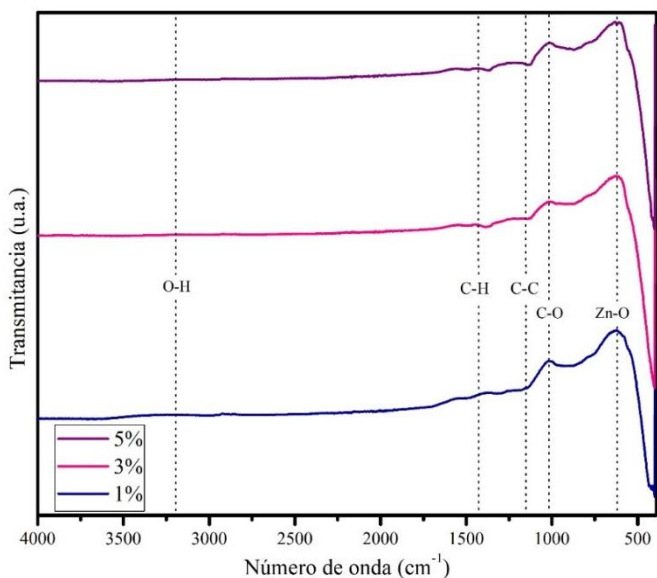
$$\text{Degradación (\%)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:  $C_0$  es la concentración inicial y  $C_t$  es la concentración dependiente del tiempo.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 3 se presentan los espectros de absorción infrarroja correspondientes a las tres síntesis de ZnO. La banda centrada en 440  $\text{cm}^{-1}$ , presente en los tres espectros, se atribuye a la vibración del enlace Zn-O, lo que confirma

la formación del óxido de zinc (Vargas et al., 2021). Además, en la región de grupos funcionales y en la región de huellas dactilares, se observan otras bandas de absorción infrarroja asociadas con residuos del extracto vegetal empleado durante la síntesis. La banda centrada en  $3200\text{ cm}^{-1}$  se relaciona con la vibración de estiramiento del enlace O-H, mientras que las señales alrededor de  $1000\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$  se asignan a las vibraciones de estiramiento del enlace C-O. Asimismo, la banda a  $1156\text{ cm}^{-1}$  se asocia al estiramiento del enlace C-C, vinculado con la formación de compuestos fenólicos y aromáticos. Finalmente, la banda observada a  $1426\text{ cm}^{-1}$  se atribuye a la vibración del enlace C-H (Abizi-Moqadam et al., 2025).



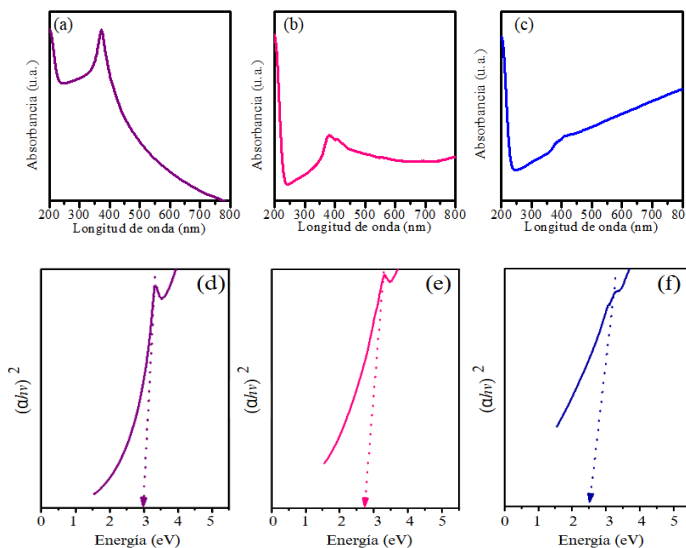
**Figura 3.** Espectro FTIR de nanopartículas de ZnO utilizando concentraciones del extracto de 1%, 3% y 5%.

En la Figura 4 (a-c) se presentan los espectros de absorción del óxido de zinc. Estos muestran con una banda de absorción máxima centrada a 373 nm, 376 nm y 381 nm para las muestras de ZnO sintetizadas con 5%, 3% y 1% p/v de extracto, respectivamente. Esta variación se en el máximo de absorción debe a la cantidad de extracto involucrado en la síntesis (Almarhoon et al., 2022). Posteriormente, se determinó la energía de la banda prohibida ( $E_g$ ), es decir, la energía necesaria para promover un electrón desde la banda de valencia hasta la banda de conducción, empleando el modelo de Tauc Ec.2:

$$(\alpha hv)^{1/n} = B(hv - E_g) \quad \text{Ec. 2}$$

Donde  $\alpha$  es el coeficiente de absorción (Lambert-Beer),  $hv$  es la energía del fotón incidente,  $B$  es una constante,  $E_g$  es la energía de banda prohibida y  $n$  es el tipo de transición electrónica  $n=1/2$ .

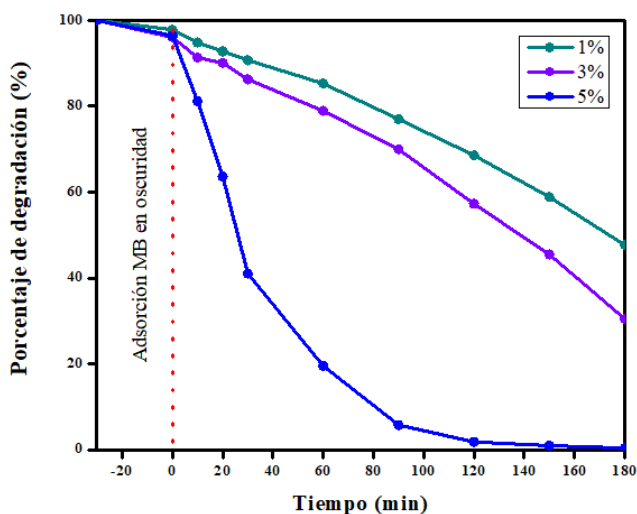
Se determinó un bandgap de 2.98 eV para el ZnO sintetizado con 5% de extracto vegetal (Figura 4 d), mientras que para el ZnO obtenido con 3% de extracto, el valor disminuyó a 2.73 eV (Figura 4 e). Por su parte, el ZnO preparado con 1% de extracto presentó un  $E_g$  de 2.52 eV (Figura 4 f). La disminución observada en la energía de banda prohibida puede atribuirse a la presencia de moléculas orgánicas procedentes del extracto vegetal empleado durante la síntesis (Villegas-Fuentes et al., 2023). Este comportamiento ha sido ampliamente reportado en estudios recientes, donde los extractos naturales actúan no solo como agentes reductores y estabilizantes, sino también como modificadores ópticos, introduciendo defectos superficiales o niveles intermedios de energía en la estructura del ZnO. Estas alteraciones favorecen la absorción de luz y contribuyen a una mayor eficiencia fotocatalítica (Khan et al., 2025).



**Figura 4.** Espectros UV-Vis de ZnO (a) 5%, (b) 3% y (c) 1%. (d) 5%, (e) 3% y (f) 1% corresponde al modelo de Tauc.

La evaluación de la actividad fotocatalítica de las nanopartículas de ZnO se realizó con tres colorantes diferentes, azul de metileno (MB), naranja de metilo (MO) y rodamina B (RhB) (Figura 5, 6 y 7), bajo irradiación con luz ultravioleta.

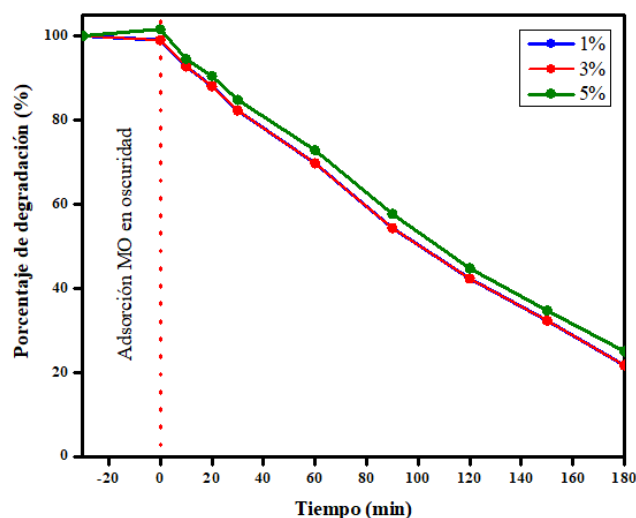
La Figura 5 muestra el comportamiento de la degradación del azul de metileno (MB) en presencia de los distintos fotocatalizadores de ZnO. Después de 20 minutos de irradiación, el ZnO sintetizado con 5% de extracto alcanzó una degradación del 36%, mientras que las muestras obtenidas con 3% y 1% presentaron valores de 10% y 7%, respectivamente. Transcurrida una hora de reacción, la degradación de MB aumentó hasta 81% para el ZnO con la mayor concentración de extracto, en contraste con las muestras sintetizadas con menores concentraciones de *Ephedra*, las cuales mostraron porcentajes inferiores al 21%. Tras 90 minutos de fotocatalisis, se logró una degradación del 94% utilizando ZnO con 5% de extracto, alcanzando un 98% a los 120 minutos y una degradación casi completa (~100%) después de 180 minutos de reacción.



**Figura 5.** Porcentaje de degradación de MB utilizando ZnO con diferentes concentraciones de *Ephedra californica*.

La degradación del naranja de metilo utilizando ZnO biosintetizado con extractos de *Ephedra californica* al 5%, 3% y 1% mostró un incremento gradual en la eficiencia fotocatalítica con el tiempo, alcanzando valores de 75-78% tras 180 minutos de irradiación, Figura 6. A

diferencia de lo observado con el azul de metileno, la concentración del extracto no produjo variaciones en la degradación de MO. Este comportamiento puede atribuirse a la naturaleza aniónica y estructura azo del MO, que limita su interacción con la superficie del ZnO. Además, la presencia de residuos orgánicos del extracto podría actuar como barrera parcial en la adsorción del colorante. No obstante, la degradación sostenida confirma la eficacia del ZnO biosintetizado como fotocatalizador verde, cuya actividad depende tanto de la concentración del extracto como de las propiedades estructurales del contaminante.

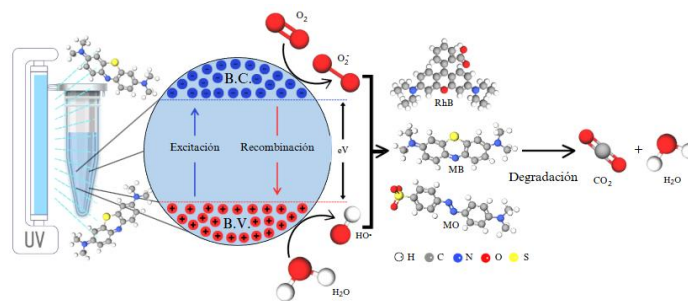


**Figura 6.** Porcentaje de degradación de MO utilizando ZnO con diferentes concentraciones de *Ephedra californica*.

La degradación de rodamina B (RB) utilizando ZnO biosintetizado con extractos de *Ephedra californica* al 1%, 3% y 5% mostró un incremento progresivo con el tiempo (Figura 7), alcanzando una eficiencia máxima de 86% a los 180 minutos para el catalizador con 3% de extracto. En las primeras etapas se observó un incremento en la absorbancia, posiblemente asociados a procesos de adsorción-desorción del colorante sobre la superficie del ZnO antes del equilibrio. La muestra con 3% presentó la mejor actividad fotocatalítica, mientras que las concentraciones más altas o bajas mostraron una ligera disminución en el rendimiento, lo que sugiere un efecto óptimo intermedio del contenido de extracto.

Los estudios de degradación de los colorantes modelo

demonstraron que los materiales de ZnO sintetizados con extracto de *Ephedra californica* presentan una actividad catalítica dependiente tanto de la estructura del colorante como de la concentración del extracto utilizado. Por ello, estos materiales representan una alternativa prometedora para la degradación de contaminantes orgánicos presentes en el agua, como los colorantes.



**Figura 8.** Propuesta de mecanismo de degradación de los colorantes.

### CONCLUSIÓN

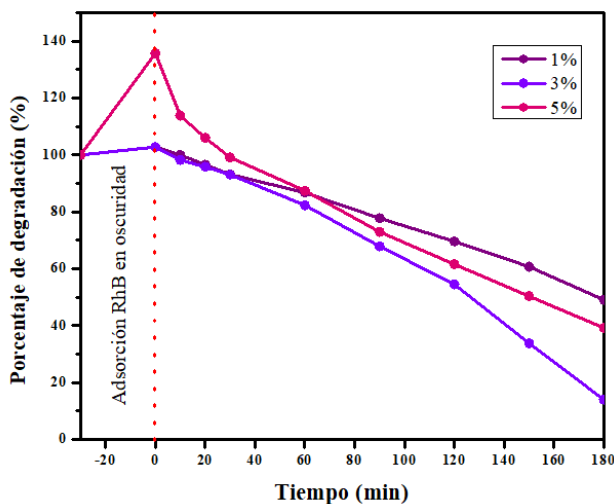
La síntesis verde de nanopartículas de ZnO utilizando extractos de *Ephedra californica* resultó ser un método eficiente, económico y ambientalmente sostenible. La concentración del extracto influye directamente en el rendimiento y las propiedades fotocatalíticas del material. Los materiales de ZnO demostraron una alta capacidad para degradar colorantes, en especial el azul de metileno, evidenciando su potencial aplicación en el tratamiento de aguas residuales. Este trabajo contribuye al desarrollo de estrategias verdes para la producción de ZnO con impacto ambiental positivo.

### REFERENCIAS

Abizi-Moqadam, A., Mortazavi-Derazkola, S., Zare-Bidaki, M., Osmani, F., & Alizadeh, L. (2025). In vitro Investigation of Antimicrobial and Antioxidant Properties of Green Silver Nanoparticles Synthesized Using Ephedra gerardiana Plant Extract. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 26. <https://doi.org/10.2174/0113892010349133241120075750>

Al-darwesh, M. Y., Ibrahim, S. S., & Mohammed, M. A. (2024). A review on plant extract mediated green synthesis of zinc oxide nanoparticles and their biomedical applications. *Results in Chemistry*, 7, 101368. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101368>

Almarhoon, Z. M., Indumathi, T., & Kumar, E. R. (2022). Optimized green synthesis of ZnO nanoparticles:



**Figura 7.** Porcentaje de degradación de RhB utilizando ZnO con diferentes concentraciones de *Ephedra californica*.

En la Figura 8 se muestra mecanismo de fotodegradación de los colorantes. Posterior a la adsorción del colorante en la superficie del ZnO, se irradia con luz ultravioleta. Los electrones de la banda de valencia (B.V. en color rojo) se excitan y pasan a la banda de conducción (B.C. en azul), produciendo un hueco en la B.V. y un electrón en la B.C. Los pares electrón-hueco reaccionan con el H<sub>2</sub>O y el O<sub>2</sub>, se generan reacciones redox sobre la superficie, ayudando a la producción de radicales hidroxilo (HO•) y radicales superóxido (O<sub>2</sub><sup>•-</sup>) los cuales reaccionan con los contaminantes degradándolos hasta su mineralización, dióxido de carbono y agua (Shukla et al., 2025; Sulaiman et al., 2025).

- Evaluation of structural, morphological, vibrational and optical properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(30), 23659–23672. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-09125-5>
- Al-Tohamy, R., Ali, S. S., Li, F., Okasha, K. M., Mahmoud, Y. A.-G., Elsamahy, T., Jiao, H., Fu, Y., & Sun, J. (2022). A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 231, 113160. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113160>
- Barzinjy, A. A., Hamad, S. M., Aydin, S., Ahmed, M. H., & Hussain, F. H. S. (2020). Green and eco-friendly synthesis of Nickel oxide nanoparticles and its photocatalytic activity for methyl orange degradation. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31(14), 11303–11316. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-03679-y>
- Bhaskar, A. R., & Bhame, S. (2024). A review on ZnO and its modifications for photocatalytic degradation of prominent textile effluents: Synthesis, mechanisms, and future directions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(3), 112553. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112553>
- Kayani, K. F., Mohammed, S. J., Mustafa, M. S., & Aziz, S. B. (2025). Dyes and their toxicity: Removal from wastewater using carbon dots/metal oxides as hybrid materials: a review. *Materials Advances*, 6(16), 5391–5409. <https://doi.org/10.1039/D5MA00572H>
- Khan, M. M. A., Siddique, S., Khan, M. K. A., Liu, B.-T., & Latif, A. (2025). Barium-doped ZnO nanorods fabricated via Piper nigrum leaf extract: A green route for enhanced photocatalytic efficiency. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 138(1), 413–431. <https://doi.org/10.1007/s11144-024-02742-7>
- Mudhoo, A., Ramasamy, D. L., Bhatnagar, A., Usman, M., & Sillanpää, M. (2020). An analysis of the versatility and effectiveness of composts for sequestering heavy metal ions, dyes and xenobiotics from soils and aqueous milieus. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 197, 110587. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110587>
- My Hanh Le, T., Nuisin, R., Mongkolnavin, R., Painmanakul, P., & Sairiam, S. (2022). Enhancing dye wastewater treatment efficiency in ozonation membrane contactors by chloro- and fluoro-organosilanes' functionality on hydrophobic PVDF membrane modification. *Separation and Purification Technology*, 288, 120711. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120711>
- Nguyen, V. N., Tran, D. T., Nguyen, M. T., Le, T. T. T., Ha, M. N., Nguyen, M. V., & Pham, T. D. (2018). Enhanced photocatalytic degradation of methyl orange using ZnO/graphene oxide nanocomposites. *Research on Chemical Intermediates*, 44(5), 3081–3095. <https://doi.org/10.1007/s11164-018-3294-3>
- Shukla, H., Gautam, R., Sushma, & Kumari, N. (2025). A comprehensive review: Photodegradation of dyes with rare earth doped metal oxide nanoparticles for wastewater treatment. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 200, 112593. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2025.112593>
- Singh, R., & Sinha, A. (2025). A critical review of recent advancements in the photocatalysis process, mechanism, and degradation pathways for the removal of phthalates from the contaminated water matrix. *Journal of Environmental Management*, 377, 124663. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124663>
- Slama, H. B., Chenari Bouket, A., Pourhassan, Z., Alenezi, F. N., Silini, A., Cherif-Silini, H., Oszako, T., Luptakova, L., Golińska, P., & Belbahri, L. (2021). Diversity of Synthetic Dyes from Textile Industries, Discharge Impacts and Treatment Methods. *Applied Sciences*, 11(14), 6255. <https://doi.org/10.3390/app11146255>
- Sulaiman, J. M. A., Altalbawy, F. M. A., Kumar, A., Kanjariya, P., Rekha, M. M., Siva Prasad, G. V., Singh, D., Albadr, R. J., Saydaxmetova, S., Bhakuni, P. N., Athab, A. H., Mansoor, A. S., Radi, U. K., Abd, N. S., & Muzammil, K. (2025). Recent advances in carbon nanomaterials:

- Removal, photodegradation and electrochemical detection of tetracycline, a review. *Inorganic Chemistry Communications*, 174, 113897. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.113897>
- Vargas, M. A., Rivera-Muñoz, E. M., Diosa, J. E., Mosquera, E. E., & Rodríguez-Páez, J. E. (2021). Nanoparticles of ZnO and Mg-doped ZnO: Synthesis, characterization and efficient removal of methyl orange (MO) from aqueous solution. *Ceramics International*, 47(11), 15668–15681. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.02.137>
- Villegas-Fuentes, A., Rosillo-de La Torre, A., Vilchis-Nestor, A. R., & Luque, P. A. (2023). Improvement of the optical, photocatalytic and antibacterial properties of ZnO semiconductor nanoparticles using different pepper aqueous extracts. *Chemosphere*, 339, 139577. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139577>
- Yuvaraja, G., Wen, C.-T., Huang, S.-Y., Wang, Y.-L., Munagapati, V. S., Vijaya, Y., Koteswararao, R., Choi, H. Y., & Sangaraju, S. (2025). Recent advances on TiO<sub>2</sub> based hybrid aerogels for photocatalytic degradation of dyes: A review. *Inorganic Chemistry Communications*, 179, 114649. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.114649>