

Síntesis y caracterización de óxido de lantano dopado con neodimio para la degradación de azul de metileno

Synthesis and Characterization of Neodymium-Doped Lanthanum Oxide for Methylene Blue Degradation

Jesus Xochitiotzi Xochitiotzi^a, Cristian A. Ospina De la Cruz^b, Naveen Kumar Reddy Bogireddy^c, Yael Bedolla Pluma^d, Belem Garcés Martínez^e, Dulce Y. Medina Velazquez^{f*}

Abstract:

To address the problem of water pollution, heterogeneous photocatalysis has emerged as a promising technology for the degradation of contaminants in aqueous media. This process has attracted significant attention due to its ability to remove organic pollutants such as methylene blue, a dye widely used as a model compound in photocatalytic degradation studies. In this context, the development of materials based on rare earth elements is of great interest, since their incorporation significantly influences the optical and electronic properties of photocatalytic materials. In this work, lanthanum oxide doped with neodymium ($\text{La}_2\text{O}_3:\text{Nd}$) was synthesized. Doping refers to the incorporation of an element into a material in order to modify its electronic and optical properties. The material was obtained via the coprecipitation method and characterized by X-ray diffraction (XRD). The results confirmed the incorporation of Nd, a rare earth element acting as a dopant, enhancing light absorption and the photocatalytic activity of the La_2O_3 structure without generating predominant secondary phases. In addition, absorption bands were observed in the visible region associated with electronic transitions of the Nd^{3+} ion, as well as a band gap energy close to 3.5 eV, indicating modifications in the electronic structure of the material. Finally, the material exhibited photocatalytic activity under solar irradiation, achieving 90% degradation of methylene blue within 60 minutes, demonstrating its potential for environmental remediation applications.

Keywords:

Lanthanum oxide, Neodymium, photocatalysis, methylene blue, doping.

Resumen:

Para abordar la problemática de la contaminación del agua, la fotocatalisis heterogénea se ha consolidado como una tecnología prometedora para la degradación de contaminantes en medios acuosos. Este proceso ha captado gran atención debido a su capacidad para eliminar contaminantes orgánicos, como el azul de metileno, un colorante ampliamente utilizado como compuesto modelo en estudios de degradación fotocatalítica. En este contexto, el desarrollo de materiales basados en tierras raras resulta de gran interés, ya que su incorporación influye significativamente en las propiedades ópticas y electrónicas de los materiales fotocatalíticos. En este trabajo, se sintetizó óxido de lantano dopado con neodimio ($\text{La}_2\text{O}_3:\text{Nd}$). El dopaje tiene como objetivo incorporar un elemento en un material para modificar sus propiedades electrónicas y ópticas. El material se obtuvo mediante el método de coprecipitación y fue

^a Universidad Autónoma de Tlaxcala | Facultad de Ciencias Básicas Ingeniería y Tecnología | Apizaco-Tlaxcala | México, <https://orcid.org/0009-0000-3448-6879>, Email: 20231606@uatx.mx

^b Universidad Politécnica del Estado de Morelos | Programa de Ingeniería en Computación | Cuernavaca-Morelos | México, <https://orcid.org/0000-0002-9609-3031>, Email: crisalod@gmail.com

^c Universidad Nacional Autónoma de México | Instituto de Ciencias Físicas | Cuernavaca-Morelos | México, <https://orcid.org/0000-0002-9392-926X>, Email: naveen@icf.unam.mx

^d Universidad Autónoma de Tlaxcala | Facultad de Ciencias Básicas Ingeniería y Tecnología | Apizaco-Tlaxcala | México, <https://orcid.org/0009-0005-5426-9827>, Email: 20256922@uatx.mx

^e Universidad Autónoma de Tlaxcala | Facultad de Ciencias Básicas Ingeniería y Tecnología | Apizaco-Tlaxcala | México, <https://orcid.org/0009-0008-7764-2550>, Email: 20254182@uatx.mx

^{f*} Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma de Tlaxcala | Facultad de Ciencias Básicas Ingeniería y Tecnología | Apizaco-Tlaxcala | México, <https://orcid.org/0000-0001-7021-8804>, Email: dymedinav@uatx.mx

caracterizado por difracción de rayos X (DRX). Los resultados confirmaron la incorporación del Nd, un elemento de tierras raras que actúa como dopante, mejorando la absorción de luz y la actividad fotocatalítica de la estructura de La_2O_3 sin generar fases secundarias predominantes. Además, se observaron bandas de absorción en la región visible asociadas a transiciones electrónicas del ion Nd^{3+} , así como una energía de banda prohibida cercana a 3.5 eV, lo que indica modificaciones en la estructura electrónica del material.

Finalmente, el material presentó actividad fotocatalítica bajo irradiación solar, alcanzando una degradación del 90 % del azul de metileno en 60 minutos, lo que evidencia su potencial para aplicaciones de remediación ambiental.

Palabras Clave:

Óxido de lantano, Neodimio, fotocátalisis, azul de metileno, dopaje.

1. Introducción

En la actualidad, la fotocátalisis heterogénea, proceso en el cual un sólido activado por la luz degrada contaminantes presentes en otra fase mediante la generación de pares electrón-hueco, ha cobrado gran interés debido al creciente problema ambiental y sanitario asociado a la presencia de contaminantes orgánicos en cuerpos de agua [1]. Muchos de estos compuestos, como colorantes sintéticos, fármacos y pesticidas, al ser moléculas de gran complejidad y tamaño son muy difíciles de remover en medios acuosos, afectando ecosistemas y la salud humana [2]. Por ello, el desarrollo de materiales eficientes para su degradación en moléculas más simples es una prioridad en la remediación ambiental [3,4]. Entre estas tecnologías, la fotocátalisis heterogénea ha demostrado ser una alternativa prometedora, destacando especialmente el óxido de titanio (TiO_2) como material de referencia por su alta actividad fotocatalítica, estabilidad química y bajo costo, sin embargo, su ancho de banda prohibida (≈ 3.2 eV) limita su activación a la región UV del espectro [5], adicionalmente se han estudiado otros materiales como el óxido de rutenio [6], ferritas [7,8], y otros semiconductores de banda prohibida similar [9], no obstante, ya sea por su alto costo o bajo valor de amplitud de banda prohibida, la búsqueda de nuevos materiales resulta indispensable. Por otro lado, el azul de metileno es ampliamente utilizado como molécula modelo en estudios de fotocátalisis, debido a su estabilidad, fácil detección espectrofotométrica y comportamiento representativo frente a procesos de degradación en solución [10,11]. Su uso permite evaluar de manera indirecta la eficiencia de materiales fotocatalíticos mediante el seguimiento de la disminución de su concentración en función del tiempo de irradiación. En este contexto, los óxidos basados en tierras raras han comenzado a ser estudiados por sus propiedades electrónicas y ópticas singulares [12,22]. En investigaciones previas, como la de Divya T la incorporación de tierras raras como el terbio ha mostrado mejorar el desempeño fotocatalítico de los materiales, al

favorecer la absorción en la región visible y la degradación de contaminantes [13].

Srinivasan, A y colaboradores estudiaron la fotodegradación de ciprofloxacina y azul de metileno a través del óxido de magnesio dopado con tierras raras [14].

El óxido de lantano (La_2O_3) surge como un material novedoso y aún poco explorado para la degradación de colorantes, ya que presenta un ancho de banda prohibida mayor que el de otros semiconductores de aplicación similar [15,16]. En contraste, la presencia de iones Nd^{3+} introduce niveles energéticos asociados a sus orbitales 4f, los cuales influyen en los procesos de excitación fotoinducida y en la dinámica de los portadores de carga, afectando directamente los mecanismos de recombinación electrón-hueco. Estas características son especialmente relevantes en sistemas fotocatalíticos, donde la eficiencia depende en gran medida de la adecuada separación y disponibilidad de dichas cargas. En este sentido, Wu, Q. y colaboradores estudiaron el efecto del neodimio en las propiedades fotocatalíticas del óxido de zinc, reportando mejoras significativas en su desempeño [17].

Otros estudios han explorado el dopaje con neodimio en diversos óxidos semiconductores. Por ejemplo, Lal et al. [18] reportaron que la incorporación de Nd en TiO_2 reduce la energía de banda prohibida (de 3.2 eV a 3.0-2.8 eV, dependiendo de la concentración), favoreciendo la absorción de luz visible y mejorando la degradación de colorantes bajo luz solar, atribuyéndolo a la generación de niveles intermedios 4f que actúan como trampas de carga. Asimismo, Yu et al. [19] encontraron que el dopaje con Nd en $\text{g-C}_3\text{N}_4$ incrementa la absorción en el visible y reduce la recombinación electrón-hueco, logrando una mayor eficiencia fotocatalítica. Por su parte, Coria-Quñones et al. [20] observaron que la inclusión de Nd en WO_3 modifica la estructura electrónica y mejora la fotocorriente; sin embargo, concentraciones elevadas del dopante pueden generar defectos estructurales y centros de recombinación que disminuyen el desempeño fotocatalítico del material [20].

La presente investigación se centra en la síntesis y caracterización de óxido de lantano dopado con neodimio, así como en la evaluación de su actividad fotocatalítica para la degradación de azul de metileno bajo irradiación solar. El estudio integra el análisis estructural mediante difracción de rayos X (DRX) y la caracterización óptica mediante espectroscopía de reflectancia difusa (DRS), con el fin de establecer una relación entre las propiedades del material y su desempeño funcional. De esta manera, se busca aportar información relevante sobre el comportamiento de sistemas basados en tierras raras en aplicaciones de remediación ambiental.

2. Metodología

2.1 Síntesis de La_2O_3 dopado con Nd ($\text{La}_2\text{O}_3:\text{Nd}$)

El $\text{La}_2\text{O}_3:\text{Nd}$ fue sintetizado mediante coprecipitación. Inicialmente, se preparó una disolución de 4.5 mmol de $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Sigma-Aldrich, pureza del 99.9%) en un recipiente adecuado. De manera independiente, se disolvió 1 mmol de $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Sigma-Aldrich, pureza del 99.9%), en agua desionizada hasta obtener una solución homogénea. El dopaje con neodimio se realizó durante la mezcla de precursores, antes de la adición del agente complejante. Posteriormente, ambas soluciones se mezclaron bajo agitación constante para favorecer la incorporación del Nd en la red del material. La mezcla se mantuvo bajo agitación y temperatura de 40 °C, se añadió trietanolamina TEA, (J.T. Baker, pureza del 98%) como agente complejante. Después, se agregó hidróxido de amonio (NH_4OH , Merck, 25% p/p) para inducir precipitación, observándose un cambio de color a amarillo ámbar.

El precipitado obtenido fue secado, en estufa a 80 °C durante 12 h, lavado para eliminar impurezas y sometido posteriormente a tratamiento térmico en mufla con condiciones de 800 °C por 4 horas. Finalmente, el material se dejó enfriar a temperatura ambiente y se recuperó en forma de polvo.

2.2 Preparación del sistema de colorante

Se preparó una solución de azul de metileno (Sigma-Aldrich, grado reactivo, pureza $\geq 85\%$) al 1% (p/p) en etanol. Se realizó una dilución en proporción volumétrica 1:4 (solución de azul de metileno: agua). Para el ensayo, el material dopado se dispersó en agua, y posteriormente se puso en contacto con la solución del colorante.

Se tomaron muestras en intervalos de tiempo de 0, 3, 5, 10, 15, 30, 45 y 60 minutos, con el fin de evaluar la variación de la concentración del colorante en función del tiempo.

2.3 Caracterizaciones estructural y óptica

La estructura cristalina fue analizada utilizando un difractómetro de rayos X, Bruker D8 Advanced. La morfología fue medida usando un equipo de microscopia electrónica de barrido JEOL JSM-IT, y finalmente para espectroscopia UV-Vis se utilizó un equipo de la marca Termo Fisher scientific evolution 300, modelo EVO300 PC.

3. Análisis y discusión de resultados

3.1 Difracción de rayos X

El difractograma de rayos X (XRD) correspondiente al material sintetizado muestra un patrón característico del óxido de lantano (La_2O_3), evidenciado por la presencia de picos bien definidos asignados a los planos cristalinos de la estructura La_2O_3 (100, 002, 101, 102, 211, 112, 201).

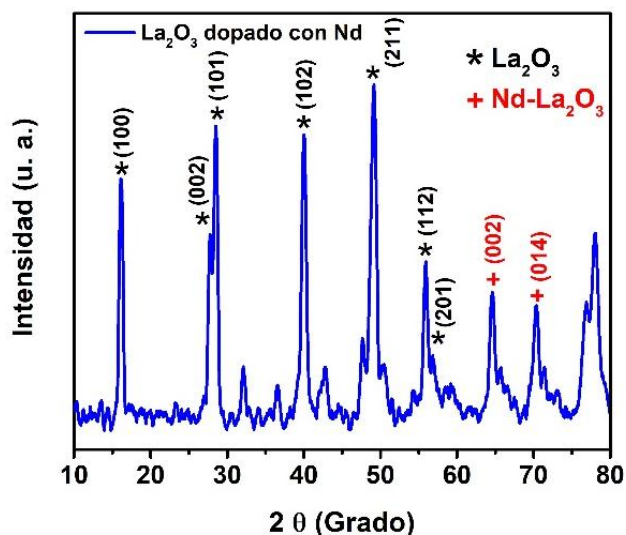


Figura 1. Difractograma de rayos X (DRX) de $\text{La}_2\text{O}_3:\text{Nd}$

La alta intensidad y nitidez de estos picos indican una adecuada cristalinidad del material obtenido posterior al tratamiento térmico como se ha reportado para óxidos de lantano sintetizados por coprecipitación [15, 16, 22].

La presencia del neodimio en la red cristalina del La_2O_3 se observa de manera sutil, principalmente a través de la aparición de picos adicionales de baja intensidad correspondientes a los planos (002) y (014), asociados a fases relacionadas con el óxido de neodimio [17, 18]. La baja intensidad de estos picos sugiere que el Nd se encuentra en baja concentración o bien altamente disperso dentro de la matriz de lantano. Este comportamiento indica que no se generan fases secundarias predominantes, y que el material conserva su estructura cristalina principal de La_2O_3 . Asimismo, se

observan ligeras variaciones en las intensidades relativas y en la forma de los picos asociadas a defectos estructurales como vacancias o distorsiones en la red cristalina.

3.2 Espectroscopia UV-VIS

El espectro de reflectancia difusa del material ($\text{La}_2\text{O}_3:\text{Nd}$) muestra un comportamiento característico de materiales semiconductores, con una alta reflectancia en la región visible y una caída pronunciada en la región UV (< 350 nm), lo que sugiere la presencia de un borde de absorción asociado a la transición de banda prohibida.

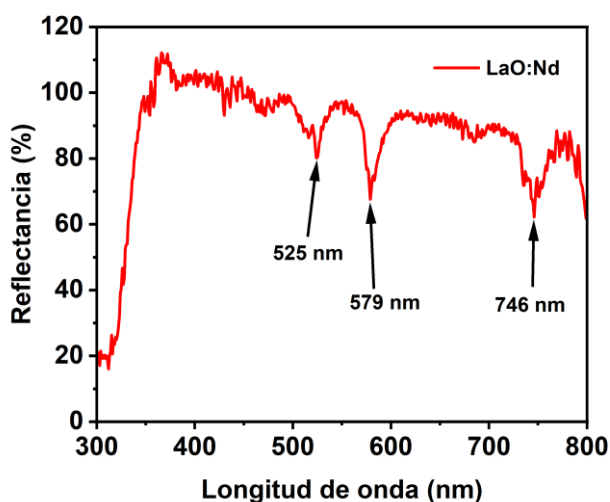


Figura 2. Espectro de reflectancia difusa (UV-Vis DRS) del material $\text{La}_2\text{O}_3:\text{Nd}$.

Se observan bandas de absorción alrededor de 525 nm, 579 nm y 746 nm, características de transiciones electrónicas intra-4f del ion Nd^{3+} . Estas bandas evidencian la presencia de niveles energéticos asociados al ion dentro del material. La aparición de estas señales en la región visible indica que el material interactúa con la radiación en ese rango del espectro, esto se relaciona con la existencia de niveles electrónicos dentro de la estructura que permiten transiciones adicionales a las de la banda prohibida. Asimismo, la disminución de la reflectancia en estas longitudes de onda confirma la absorción en la región visible.

Por otra parte, la absorción en la región UV (<350 nm) se mantiene, lo que corresponde a la transición de banda del material. En conjunto, estos resultados muestran que el material presenta respuesta óptica tanto en la región UV como en la visible, sin alterar su naturaleza semiconductor.

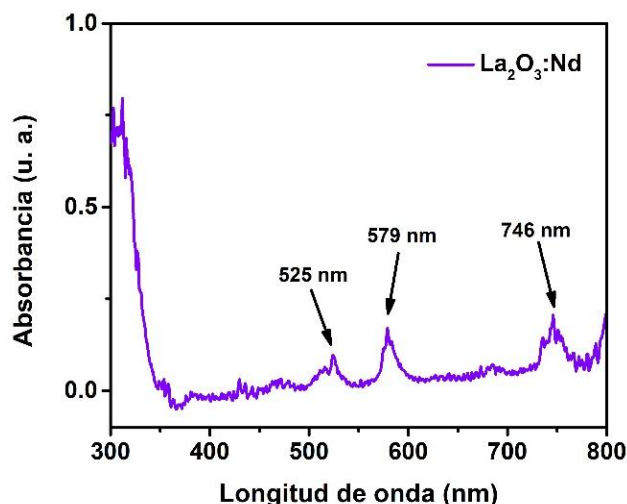


Figura 3. Espectro de absorbancia del material $\text{La}_2\text{O}_3:\text{Nd}$.

El comportamiento óptico del material $\text{La}_2\text{O}_3:\text{Nd}$ fue evaluado mediante espectroscopía UV-Vis de reflectancia difusa. Para el tratamiento de los datos, la reflectancia fue transformada utilizando la función de Kubelka-Munk, según el método reportado en [18]:

$$F(R) = \frac{(1-R)^2}{2R} \dots \dots \dots (1)$$

Donde: R es la reflectancia difusa

Esta función es proporcional al coeficiente de absorción (α) en materiales altamente dispersivos, permitiendo analizar sus propiedades ópticas de manera equivalente a sistemas en transmisión.

El espectro obtenido muestra una absorción significativa en la región UV, asociada a la transición de banda prohibida del La_2O_3 . En la región visible se identifican bandas características alrededor de 525, 579 y 746 nm, correspondientes a transiciones electrónicas intra-4f del ion Nd^{3+} [23]. lo que confirma la incorporación del dopante en la estructura del material. Estas transiciones indican la presencia de niveles energéticos discretos dentro de la estructura electrónica.

Una vez conociendo lo anterior se empleó la ley de Beer-Lambert

$$(A = \epsilon lc) \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

A : Absorbancia

ϵ : Coeficiente de extinción molar o absorptividad

l : Longitud del paso

c : Concentración de la disolución

que describe la relación entre absorbancia y concentración en sistemas homogéneos en materiales

sólidos, así mismo la función de Kubelka–Munk permite establecer una relación análoga entre la reflectancia y la absorción, facilitando el análisis cuantitativo de la respuesta óptica.

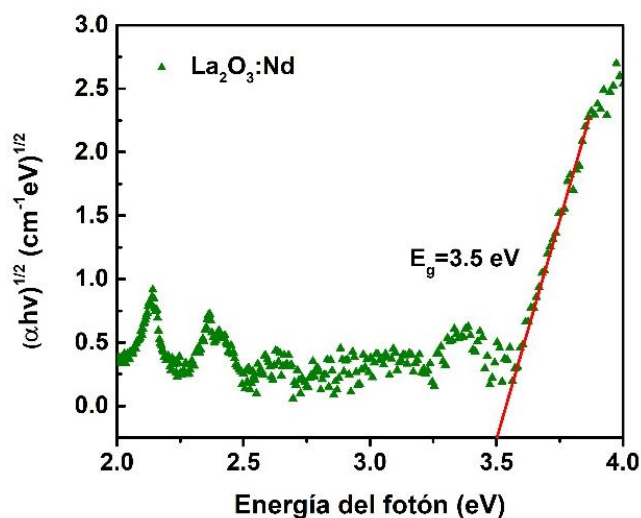


Figura 4. Gráfica de Tauc para el material $\text{La}_2\text{O}_3:\text{Nd}$, correspondiente a una transición indirecta permitida $(\alpha hv)^{1/2}$ vs. $h\nu$.

Para determinar la energía de banda prohibida, se empleó el método de Tauc [18].

$$(\alpha hv)^n = A(hv - E_g) \quad \dots\dots\dots(3)$$

Donde:

α : es el coeficiente de absorción

$h\nu$: la energía del fotón

E_g : la energía de banda prohibida

n : depende del tipo de transición electrónica (para transiciones indirectas permitidas, $n = \frac{1}{2}$).

A partir de la gráfica de $(\alpha hv)^{1/2}$ en función de $h\nu$, se obtuvo un valor de

$$E_g \approx 3.5 \text{ eV}$$

mediante la extrapolación lineal de la región de absorción. Este valor es consistente con materiales basados en La_2O_3 [21], la diferencia con respecto al valor teórico del La_2O_3 es debido a la introducción de niveles energéticos asociados al Nd^{3+} . Estos niveles actúan como trampas de carga, favoreciendo la separación de pares electrón–hueco y disminuyendo su recombinación.

En conjunto, la aplicación de la ley de Beer–Lambert y el método de Tauc permitió caracterizar de manera integral las propiedades ópticas del material, evidenciando que el dopaje con neodimio induce cambios en su comportamiento electrónico y funcional.

3.3 Degradación fotocatalítica de azul de metileno

El espectro UV-Vis muestra la evolución de la absorbancia del azul de metileno en función del tiempo en presencia del material $\text{La}_2\text{O}_3:\text{Nd}$. Se observa una banda de absorción característica centrada alrededor de ~660–670 nm, asociada al cromóforo del colorante.

Conforme avanza el tiempo de reacción (0 a 60 minutos), se aprecia una disminución progresiva en la intensidad de la absorbancia, lo que indica una reducción en la concentración del azul de metileno en solución. Este comportamiento evidencia la capacidad del material para remover el colorante, ya sea por procesos de adsorción, degradación fotocatalítica o ambos.

Durante los primeros minutos (0–15 min), la disminución de la absorbancia es moderada, lo que sugiere una etapa inicial dominada por la adsorción superficial en los sitios activos del material. Posteriormente (15–45 min), se observa una reducción más notable, indicando una mayor interacción entre el colorante y el sistema.

A los 60 minutos, el pico de absorbancia característico del azul de metileno alcanza su valor más bajo dentro del intervalo evaluado, lo que confirma la remoción casi total del colorante.

Es notable que este comportamiento puede estar relacionado con la dinámica de los portadores de carga y la presencia de niveles energéticos asociados al material, los cuales influyen en los procesos de absorción de radiación y en la recombinación de pares electrón–hueco. En conjunto, los resultados muestran una disminución continua de la concentración del azul de metileno en función del tiempo hasta su degradación casi total. Este comportamiento evidencia la capacidad del material para remover el colorante, ya sea por procesos de adsorción, degradación fotocatalítica o ambos [10,14]. Comparando nuestros resultados con los de otros fotocatalizadores dopados con neodimio reportados en la literatura, se observan diferencias significativas en cuanto al tiempo requerido para una degradación casi total del azul de metileno. Por ejemplo, Lal [18] lograron una degradación del 95% en 120 minutos usando $\text{TiO}_2:\text{Nd}$ bajo luz solar, mientras que nuestro material alcanza una remoción comparable en solo 60 minutos, lo que sugiere una cinética más rápida. Esta mejora podría atribuirse a la estructura del $\text{La}_2\text{O}_3:\text{Nd}$, que presenta una menor tendencia a la agregación que el TiO_2 , favoreciendo una mayor área superficial disponible para la adsorción y reacción. Por otro lado, Srinivasan [14] reportaron una degradación completa de azul de metileno en 90 minutos utilizando $\text{MgO}:\text{Nd}$ bajo luz visible, pero con una concentración de dopante más alta, lo que puede incrementar los costos de síntesis. En nuestro caso, se empleó una concentración relativamente baja de neodimio (relación La:Nd de 4.5:1), lo que reduce el uso

de este elemento de tierras raras y, por tanto, el costo del material. En cuanto a la formación de subproductos, estudios como los de Wu et al. [17] en ZnO:Nd identificaron la aparición de intermediarios como ácidos carboxílicos de cadena corta antes de la mineralización completa.

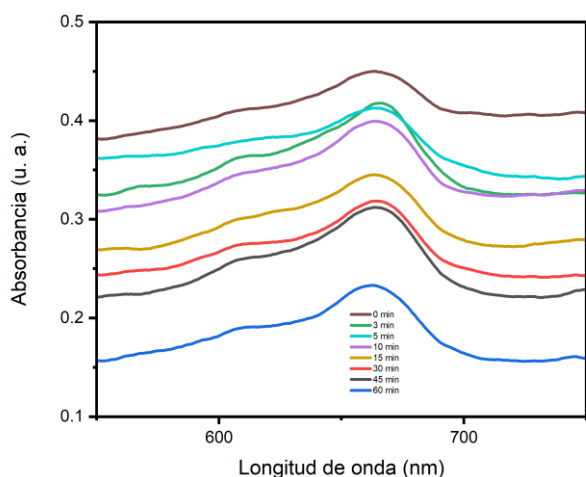


Figura 5. Espectros de absorción UV-Vis del azul de metileno en función del tiempo (0–60 min) en presencia del material $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Nd}$, evidenciando la disminución progresiva de la concentración del colorante.

Tabla 1. Análisis de degradación de azul de metileno

Tiempo (min)	Absorbancia	Comportamiento
0	Alta	Inicial
3-10	Media	Adsorción
15-30	Baja	Remoción
45	Muy baja	Avanzado
60	Mínima	Final

4. Conclusiones

En esta investigación, se sintetizó óxido de lantano dopado con neodimio ($\text{La}_2\text{O}_3\text{:Nd}$) utilizando el método de coprecipitación, los resultados obtenidos permiten comprender el significado estructural, óptico y funcional del material desarrollado. En primer lugar, el difractograma confirmó que el dopante se incorporó de manera efectiva en la red cristalina del La_2O_3 sin que se formaran fases secundarias predominantes, como se observa en la presencia de los planos (002) y (014), atribuidos al dopaje con Nd. Esto demuestra que el método de síntesis empleado es adecuado para introducir iones de neodimio en posiciones sustitucionales dentro de la estructura del óxido de lantano, aprovechando la similitud de radios iónicos entre La^{3+} y Nd^{3+} , lo cual evita

la aparición de fases indeseadas y mantiene la integridad cristalina del material, un requisito para mantener propiedades semiconductoras estables y reproducibles. Las ligeras variaciones en intensidades y anchos de pico observadas en el difractograma sugieren además la presencia de defectos estructurales puntuales, como vacancias en la red.

En cuanto a las propiedades ópticas, la espectroscopía evidenció bandas de absorción bien definidas en la región visible, específicamente alrededor de 525 nm, 579 nm y 746 nm, las cuales son atribuibles a transiciones electrónicas intra-4f del ion Nd^{3+} , correspondientes a los niveles energéticos característicos de este ion de tierras raras. El significado de este hallazgo demuestra que el dopaje con neodimio no solo ha sido exitoso desde el punto de vista de su composición, sino que además ha introducido niveles electrónicos intermedios dentro de la estructura de bandas del La_2O_3 . Dichos niveles son relevantes porque modifican las vías de absorción de radiación, permitiendo que el material interactúe con fotones en el rango visible del espectro solar. La presencia de estas transiciones 4f implica que el material puede aprovechar una fracción mayor de la luz solar, lo cual es especialmente importante para aplicaciones fotocatalíticas que buscan operar con irradiación natural sin necesidad de fuentes artificiales de UV.

A partir del tratamiento de los datos, se determinó una energía de banda prohibida de aproximadamente 3.5 eV. Este valor es consistente con lo reportado en la literatura para materiales basados en óxido de lantano, y su significado radica en que, a pesar de la incorporación del dopante, el material conserva su naturaleza semiconductor con una banda prohibida en el rango de los semiconductores de banda ancha. En comparación con otros fotocatalizadores dopados con neodimio reportados en la literatura, como TiO_2 (95 % de degradación en 120 minutos, Lal [18]) y MgO (degradación completa en 90 minutos, Srinivasan [14]), el material La_2O_3 desarrollado en este trabajo alcanzó una remoción del 90 % de azul de metileno bajo irradiación solar. El significado de este comportamiento es que el material $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Nd}$ es capaz de degradar el colorante de la solución acuosa combinando dos etapas que funcionan secuencialmente y simultáneamente: una fase inicial (primeros 15 minutos) dominada por la adsorción superficial de azul de metileno en los sitios activos del material; y una etapa posterior (15 a 45 minutos), donde la adsorción se complementa con una degradación fotocatalítica adecuada, inducidos por la generación de especies reactivas de oxígeno. A partir de los pares electrón–hueco generados por el dopaje con Nd^{3+} que introduce niveles de energía dentro del material que ayudan a “retener” temporalmente las cargas generadas por la luz, evitando que se recombinen rápidamente y

permitiendo que participen por más tiempo en las reacciones que ocurren en la superficie.

La importancia global de estos resultados radica en que confirman la viabilidad del dopaje con neodimio como estrategia para modificar las propiedades estructurales y ópticas del La_2O_3 sin comprometer su cristalinidad ni generar fases secundarias indeseadas. Además, demuestran que el material obtenido presenta actividad bajo irradiación solar, posicionándolo como un sistema de interés para futuras aplicaciones en remediación ambiental, particularmente en la degradación de colorantes orgánicos presentes en efluentes acuáticos. En conjunto, esta investigación contribuye al entendimiento de cómo la incorporación de iones lantánidos modifica las propiedades fisicoquímicas de los óxidos semiconductores y proporciona una base experimental para el desarrollo de materiales más eficientes en procesos de fotocatalisis heterogénea.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma de Tlaxcala y a la Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología por el apoyo institucional y las facilidades otorgadas para el desarrollo de este proyecto. Este proyecto fue financiado por el proyecto de Ciencia de Frontera de SECIHTI CBF-2025-I-2172, el estudiante Jesus Xochitiotzi agradece el apoyo para actividades científicas otorgado en el marco de este proyecto.

Referencias

- [1] Tkaczyk, A., Mitrowska, K., & Posyniak, A. (2020). Synthetic organic dyes as contaminants of the aquatic environment and their implications for ecosystems: A review. *The Science Of The Total Environment*, 717, 137222. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137222>
- [2] Ismail, M., Akhtar, K., Khan, M., Kamal, T., Khan, M. A., Asiri, A. M., Seo, J., & Khan, S. B. (2019). Pollution, Toxicity and Carcinogenicity of Organic Dyes and their Catalytic Bio-Remediation. *Current Pharmaceutical Design*, 25(34), 3645-3663. <https://doi.org/10.2174/1381612825666191021142026>
- [3] Shanker, U., Rani, M. & Jassal, V. Degradation of hazardous organic dyes in water by nanomaterials. *Environ Chem Lett* 15, 623–642 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10311-017-0650-2>
- [4] Zheng, A. L. T., Sinin, A. E., Jin, W. T., Feng, K. L., Boonyuen, S., Chung, E. L. T., Lease, J., & Andou, Y. (2024). Rare earth elements for enhancing photocatalysis in pollutant degradation and water treatment. *International Journal Of Environmental Science And Technology*, 22(8), 7247-7270. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-06203-5>
- [5] Tasisa, Y. E., Sarma, T. K., Krishnaraj, R., & Sarma, S. (2024). Band gap engineering of titanium dioxide (TiO_2) nanoparticles prepared via green route and its visible light driven for environmental remediation. *Results In Chemistry*, 11, 101850. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101850>
- [6] Arunachalam, S., Siranjeevi, R., Pillai, M. V., & Murphy, M. (2024). Evaluation of Ruthenium Oxide Nanoparticles as Photocatalysts: Efficiency in Organic Dye Degradation and Environmental Impact Studies. *Environmental Quality Management*, 34(2). <https://doi.org/10.1002/tqem.22358>
- [7] Tejashwini, D., Harini, H., Nagaswarupa, H., Naik, R., Harlapur, S., & Basavaraju, N. (2023). Nanoferrites in photocatalytic wastewater treatment: Advancements, characterization, and environmental implications. *Results In Chemistry*, 7, 101247. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.101247>
- [8] Khan, A., Valicsek, Z., Horváth, O., Khan, M. M., & Wafi, A. (2024). Ferrite-based photocatalysts: Synthesis, modifications, and key parameters in photocatalytic-related applications. *Materials Today Communications*, 40, 109556. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.109556>
- [9] Kumar, O. P., Nazir, M. A., Shah, S. S. A., Abdou, S. N., Hessien, M. M., Wattoo, M. A., & Rehman, A. U. (2025). Fabrication of High Entropy ZrO_2 -based Composite for Rapid Photocatalytic Degradation of Dyes. *ChemistrySelect*, 10(29). <https://doi.org/10.1002/slct.202502653>
- [10] Alkaykh, S., Mbarek, A., & Ali-Shattile, E. E. (2020). Photocatalytic degradation of methylene blue dye in aqueous solution by MnTiO_3 nanoparticles under sunlight irradiation. *Heliyon*, 6(4), e03663. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03663>
- [11] Sharma, A., Shivanna, J. M., Gupta, N. K., Menezes, P. W., & Hegde, G. (2025). Efficient Photocatalytic Degradation of Methylene Blue From Aqueous Solution Using Hybrid Biomass-Derived Nanostructured Carbon-TiO₂ Photocatalyst. *Chemistry - A European Journal*, 31(44), e202501564. <https://doi.org/10.1002/chem.202501564>
- [12] Zhang, C., Ahmad, I., Ahmed, S. B., Ali, M. D., Karim, M. R., Bayahia, H., & Khasawneh, M. A. (2024). A review of rare earth oxides-based photocatalysts: Design strategies and mechanisms. *Journal Of Water Process Engineering*, 63, 105548. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105548>
- [13] T, D., S, V., S, P. S., & K, V. (2025). Dual-functionality of terbium-doped MoO_3 semiconductor nanomaterials for degradation of synthetic textile dyes and antimicrobial activity. *Journal Of Sol-Gel Science And Technology*, 115(3), 1613-1635. <https://doi.org/10.1007/s10971-025-06869-4>
- [14] Srinivasan, A., Kavitha, H. P., Muniyandi, G. R., Vennila, J. P., Arulmurugan, S., Lohita, D., & Prakash, M. (2024). Improved photocatalytic efficiency of rare earth metal-incorporated magnesium oxide nano-hexagonal sheets for the degradation of Ciprofloxacin and Methylene Blue dye under visible light irradiation. *Results In Chemistry*, 7, 101381. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101381>
- [15] Rajendran, S., Bharadwaj, A. V. S. L. S., Barmavatu, P., Palani, G., Trilaksanna, H., Kannan, K., & Meenakshisundaram, N. (2024). A Review on Lanthanum-Based Materials for Phosphate Removal. *ChemEngineering*, 8(1), 23. <https://doi.org/10.3390/chemengineering8010023>
- [16] Zhang, Z., Guo, Y., & Robertson, J. (2019). Atomic structure and band alignment at $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$, $\text{Sc}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ and $\text{La}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ interfaces: A first-principles study. *Microelectronic Engineering*, 216, 111039. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2019.111039>
- [17] Wu, Q., Liu, G., Shi, H., Zhang, B., Ning, J., Shao, T., Xue, S., & Zhang, F. (2023b). Impact of Nd Doping on Electronic, Optical, and Magnetic Properties of ZnO : A GGA + U Study. *Molecules*, 28(21), 7416. <https://doi.org/10.3390/molecules28217416>

- [18] Lal, M., Sharma, P., & Ram, C. (2022). Synthesis and photocatalytic potential of Nd-doped TiO₂ under UV and solar light irradiation using a sol-gel ultrasonication method. Results In Materials, 15, 100308. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2022.100308>
- [19] Yu, X., Song, Z., Dong, X., Li, H., Liu, H., Zhao, B., Ye, T., Jiang, Y., Li, X., Duan, L., Fan, J., & Zhao, P. (2022). Enhanced photocatalytic activity of rare earth (Yb, Nd and Ce)-doped g-C₃N₄ nanosheets for the degradation of organic dyes under visible light. Journal Of Materials Science Materials In Electronics, 33(16), 13271-13289. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-08267-w>
- [20] Coria-Quñones, S. D., Rodríguez-Gutiérrez, I. G., Hernández-Landaverde, M. A., Oskam, G., Torres-Ochoa, J. A., Díaz-García, A. K., & Jiménez-Sandoval, O. (2025b). Effect of lanthanide (La, Nd, Gd) doping on the structural and photoelectrochemical properties of WO₃ thin films synthesized by sol-gel. Journal Of Materials Research/Pratt's Guide To Venture Capital Sources, 40(8), 1252-1264. <https://doi.org/10.1557/s43578-025-01577-9>
- [21] Kabir, H., Nandyala, S. H., Rahman, M. M., Kabir, M. A., & Stamboulis, A. (2018). Influence of calcination on the sol-gel synthesis of lanthanum oxide nanoparticles. Applied Physics A, 124(12). <https://doi.org/10.1007/s00339-018-2246-5>
- [22] Hu, Z., Wang, P., Yang, C., Meng, S., Hou, Y., Li, H., Tan, R., & Li, Z. (2025). Rare earth nanomaterials for photocatalytic reaction. Coordination Chemistry Reviews, 560, 217871. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2026.217871>
- [23] Zhang, X., Xi, Y., Liu, S., Bi, Y., Zhang, W., & Hu, F. (2020). Up-conversion luminescence of neodymium oxide nanocrystals-doped TiO₂/ormosils composite films and strip waveguides. Applied Physics A, 126(12). <https://doi.org/10.1007/s00339-020-04115-y>