

Propiedades estructurales y ópticas de nanopartículas de óxido de cerio biosintetizadas con extracto alcohólico de *Aloe vera*

Structural and optical properties of biosynthesized cerium oxide nanoparticles with alcoholic extract of *Aloe vera*

Jorge A. Alzamora Lozano¹ ; Segundo R. Jáuregui-Rosas^{2,*} 

¹ Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n – Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

² Departamento Académico de Física, GMIN-UNT, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n – Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

* Autor correspondiente: sjauregui@unitru.edu.pe (J. Alzamora)

DOI: [10.17268/scien.inge.2026.03.03](https://doi.org/10.17268/scien.inge.2026.03.03)

RESUMEN

La investigación tuvo como propósito caracterizar estructural y ópticamente las nanopartículas de óxido de cerio (CeO_2) biosintetizadas por un método amigable con el medio ambiente, para esto se utilizó nitrato de cerio hexahidratado y extracto alcohólico de *Aloe vera*. Las nanopartículas se caracterizaron por difracción de rayos x, espectroscopia Raman, FTIR, fotoluminiscencia y Uv-vis. Se obtuvieron nanopartículas de 7 nm aproximadamente con un ancho de banda prohibida de 2,9 eV, que es menor al del CeO_2 reportado en tamaño masivo, lo que se atribuyó a las vacancias de oxígeno reportados en el presente estudio.

Palabras clave: óxido de cério; nanopartículas; biosíntesis; *Aloe vera*.

ABSTRACT

The purpose of this research was to structurally and optically characterize cerium oxide (CeO_2) nanoparticles biosynthesized using an environmentally friendly method. For this purpose, cerium nitrate hexahydrate and an alcoholic extract of *Aloe vera* were used. The nanoparticles were characterized by X-ray diffraction, Raman spectroscopy, FTIR, photoluminescence, and UV-Vis spectroscopy. Nanoparticles approximately 7 nm in size were obtained with a band gap of 2.9 eV, which is smaller than that of CeO_2 reported in bulk. This difference was attributed to the oxygen vacancies observed in this study.

Keywords: cerium oxide; nanoparticles; biosynthesis; *Aloe vera*.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, las nanopartículas han despertado un creciente interés debido a sus aplicaciones en campos tan diversos como la salud, la energía, medio ambiente y tecnología de alimentos. Este interés se fundamenta en sus propiedades ópticas y electrónicas únicas, que difieren significativamente de las que presentan los materiales en tamaño masivo (Tumkur et al., 2021). En el campo de la medicina, se ha propuesto su utilización en el diagnóstico y tratamiento de diversas enfermedades, en la administración controlada de fármacos y en el aprovechamiento de su acción antibacteriana (Choudary et al., 2024). Estas aplicaciones son posibles debido a su estructura nanométrica, con tamaños comprendidos entre 1 y 100 nm (Nadeem et al., 2020). Dichas partículas pueden obtenerse por una amplia variedad de métodos y condiciones de síntesis, lo que permite ajustar sus propiedades de manera precisa para orientarlas hacia aplicaciones muy específicas (Reed et al., 2014).

Un método para sintetizar nanopartículas que ha estado ganando popularidad en la comunidad científica en los últimos años, es la síntesis verde; en este método se utilizan plantas, residuos agrícolas, microorganismos, nutrientes, entre otras (Charbgoon et al., 2017). De las plantas, es posible usar las hojas, raíces, frutos, tallos, cuyos extractos actúan como agentes estabilizadores, reductores y de protección debido a que el material orgánico contiene compuestos bioactivos que recubre las nanopartículas y evita la aglomeración (Ahmad et al., 2024). El método de química verde es ecológico y de fácil implementación, lleva menos tiempo en comparación con los métodos químicos tradicionales, es biocompatible sin residuos (o son mínimos), no usa agentes



oxidantes/reductores dañinos ni compuestos estándar de ácido/base ni temperaturas elevadas. (Nadeem et al., 2020).

En relación con el mecanismo de síntesis de nanopartículas mediante química verde utilizando extractos vegetales, la literatura señala que los componentes fitoquímicos de las plantas, ricos en radicales OH, actúan como donadores de electrones en la reducción del nitrato de cerio hexahidratado a hidróxido de cerio. Posteriormente, este hidróxido se transforma en óxido de cerio (CeO_2) (Iqbal et al., 2021). Bajo agitación magnética, las partículas colisionan y se fusionan, dando lugar a estructuras de mayor tamaño. En este proceso, los compuestos fitoquímicos ejercen una función protectora al recubrir las nanopartículas, evitando su aglomeración. Sin embargo, la formación completa de las nanopartículas suele requerir un tratamiento térmico adicional, que permite la interacción del oxígeno con el cerio a altas temperaturas y facilita la obtención de CeO_2 (Huang et al., 2011; Ahmad et al., 2024).

El cerio ha sido ampliamente estudiado en diferentes campos de la ciencia como la física, la química y la biología (Kumar et al., 2018). Cuando se combina con el oxígeno se obtiene CeO_2 , el cual cristaliza en una estructura cúbica centrada en las caras (FCC) (Iqbal et al., 2021) donde el Ce^{+4} está rodeado por ocho iones O^{2-} equivalentes, tanto en las esquinas como en las caras (coordinado óctuplemente), mientras que cada átomo de oxígeno está coordinado cuádruplemente. La celda unitaria completa de Ce_4O_8 tiene 0,51 nm de parámetro de red (Reed et al., 2014). Además, el CeO_2 es un semiconductor que en tamaño masivo tiene una energía de banda prohibida de 3,19 eV (Miri et al., 2019) que incluye cerio en estados de oxidación +3 y +4 (Dhall et al., 2018) lo que origina un par redox $\text{Ce}^{+4}/\text{Ce}^{+3}$ de CeO_2 con un potencial redox comparativamente bajo (1,3–1,8 eV). Esto indica que los iones de cerio en el CeO_2 pueden oxidarse con facilidad a diferentes valencias bajo diversas condiciones (G. Zhang et al., 2017). Dicho ciclo redox, basado en la rápida interconversión entre Ce^{3+} y Ce^{4+} , constituye la base de sus propiedades antioxidantes y catalíticas (Charbgoon et al., 2017)

El objetivo de la investigación es evaluar las propiedades estructurales y ópticas de nanopartículas de óxido de cerio biosintetizadas con extracto alcohólico de *Aloe vera*.

2. METODOLOGÍA

2.1 Materiales y reactivos

Se utilizó Nitrato de cerio hexahidratado ($\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) de Sigma-Aldrich con una pureza del 99%, alcohol de 96° de uso comercial, papel filtro Whatmann N° 2 y pulpa de hojas frescas de *Aloe vera* recolectadas del jardín interior de la Universidad Nacional de Trujillo, Perú.

2.2 Síntesis de nanopartículas de óxido de cerio

2.2.1 Preparación de extracto de *Aloe vera*

La hoja fresca de *Aloe vera* fue lavada minuciosamente con agua potable para limpiar la superficie, se cortó las espinas y se cortó transversalmente en dos partes para dejarlas reposando en 4 L de agua potable por tres días, al segundo día se cambió de agua. De la hoja fresca de *Aloe vera* se extrajeron 5 g de pulpa para depositarlas en 100 mL de alcohol de 96° a temperatura ambiente por un día, luego se retiraron las impurezas con papel filtro whatman N°2. (ver figura 1)

2.2.2 Síntesis de nanopartículas de CeO_2

Se disolvió 1,0965 g de $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ en 50 mL de extracto alcohólico de pulpa de *Aloe vera* (0,05mol/L) con agitación magnética en un matraz por 15 min a temperatura ambiente. Luego se sometió a reflujo a 150 °C con agitación continua durante 6 h y se dejó enfriar hasta temperatura ambiente. A continuación, 50 mL de solución se centrifugó por 15 min a 4000 rpm y el sobrenadante se evaporó a 180 °C durante 1 h para luego darle un tratamiento térmico en un crisol abierto en horno mufla a 350 °C durante 1 h. El producto final se pulverizó con un mortero de Agata y almacenado para su caracterización. (ver figura 1)

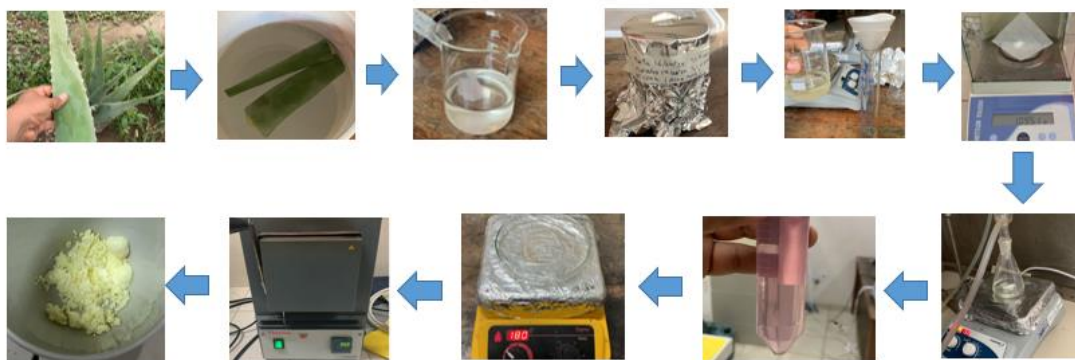


Figura 1. Proceso de síntesis de nanopartículas de CeO_2 con extracto alcohólico de *Aloe vera*.

2.3 Caracterización

Las fases presentes y estructura cristalina fueron analizadas, en muestras pulverizadas, mediante difracción de rayos X, utilizando el difractómetro Miniflex 600 (Rigaku) con un blanco de cobre ($\lambda_{\text{Cu}}=0,154 \text{ nm}$), trabajando a 40 kV, 15 mA, $0,02^\circ$ de paso y a una velocidad de $2^\circ/\text{min}$ en el rango de 20° a 80° . Los modos vibracionales característicos de las nanopartículas de CeO_2 se analizaron con el microscopio confocal Raman Alpha 300R (Witec) equipado con un láser de 532 nm como fuente de excitación, usando un portamuestra de aluminio y objetivo de 50X. Los ensayos de fotoluminiscencia se realizaron usando el espectrofluorómetro LS-55 (Perkin Elmer) equipado con lámpara de xenón (longitud de onda de excitación 290 nm), para un rango de emisión de 325 a 500 nm. La absorbancia óptica de las nanopartículas fue analizada con el espectrofotómetro UV-vis Lambda 750 (Perkin Elmer), de doble haz y con esfera de integración de espectralón de 60 mm, tomando el espectro entre 250 y 500 nm. Los ensayos de fotoluminiscencia y absorbancia se hicieron dispersando 3 mg de nanopartículas en 10 mL de alcohol de 96° durante 20 minutos para su respectivo análisis. También se estudiaron los modos vibracionales de las nanopartículas de CeO_2 mediante espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier, el cual fue realizado con un espectrómetro marca Spectrum Two (Perkin Elmer) con escaneos de 4 acumulaciones. Todos los ensayos de caracterización se realizaron a temperatura ambiente.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los patrones de difracción de rayos X (Figura 2) exhibieron picos de difracción correspondientes a la estructura FCC de CeO_2 (Tarjeta N° 9009008). A partir del pico más intenso correspondiente al plano (111), se estimó el tamaño promedio de cristalito (D) utilizando la Ecuación 1 (Iqbal et al., 2021), siendo λ la longitud de onda de rayos X ($1,5406 \text{ \AA}$ para la radiación CuK_α), k es la constante de Scherrer (0,89 para partículas esféricas), β es el ancho completo a la mitad del máximo y θ es el ángulo de Bragg. El parámetro de red se calculó mediante la Ecuación 2 (Gunasekaran et al., 2019) y el volumen de celda unitaria se obtuvo mediante la relación $V=a^3$.

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

$$a = d \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (2)$$

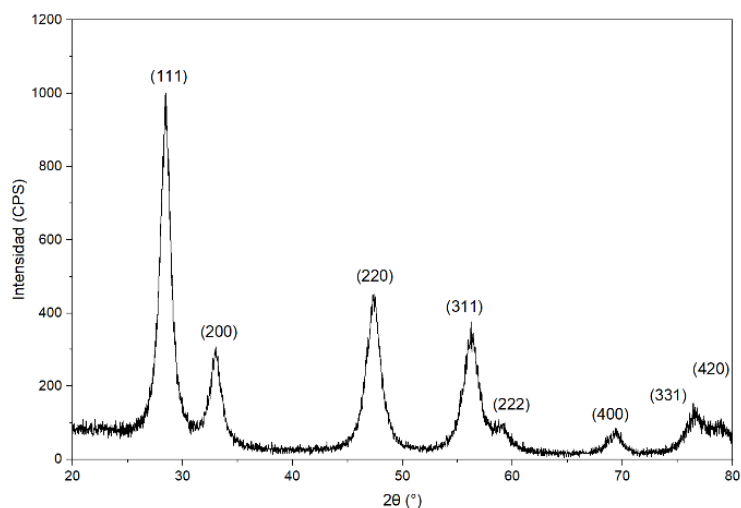


Figura 2. Difractograma de rayos X de nanopartículas de CeO_2 .

Los modos vibracionales de las nanopartículas de CeO_2 sintetizados por química verde se estudió mediante espectroscopia Raman, tomando espectros entre 400 y 1100 cm^{-1} (Figura 3). Se observa una banda Raman de primer orden (F_{2g}) a 462 cm^{-1} atribuido al estiramiento simétrico de la unidad de vibración Ce-O, la cual corresponde generalmente a la estructura cubica de fluorita (Dutta et al., 2016). Este modo puede considerarse como el modo de estiramiento simétrico de ocho átomos de oxígeno alrededor de iones de Ce^{4+} (O-Ce-O). El desplazamiento al rojo observado con respecto a la posición típica del pico de 464 cm^{-1} del CeO_2 indica la existencia de un nivel moderado de vacancias de oxígeno y una posible reducción de Ce^{4+} a Ce^{3+} . (Shirni et al., 2025)

También se observaron dos picos débiles alrededor de 600 y 1050 cm^{-1} , los que han sido atribuidos a modos Raman de segundo orden, con el modo fonónico $\omega\text{TO(X)} + \text{LA(X)}$, cuya presencia ha sido atribuido a los iones de Ce^{3+} y vacancias de oxígeno en el CeO_2 (Vasudevan, 2023). Una de las posibles causas de las vacancias de oxígeno, es la reducción del CeO_2 a tamaños nanométricos (Schilling et al., 2017). También se calculó el tamaño promedio (D_R) de las nanopartículas de CeO_2 usando el ensanchamiento de línea (Γ) Raman utilizando la ecuación 3 (Arumugam et al., 2015).

$$\Gamma(\text{cm}^{-1}) = 10 + \frac{137,4}{D_R} \quad (3)$$

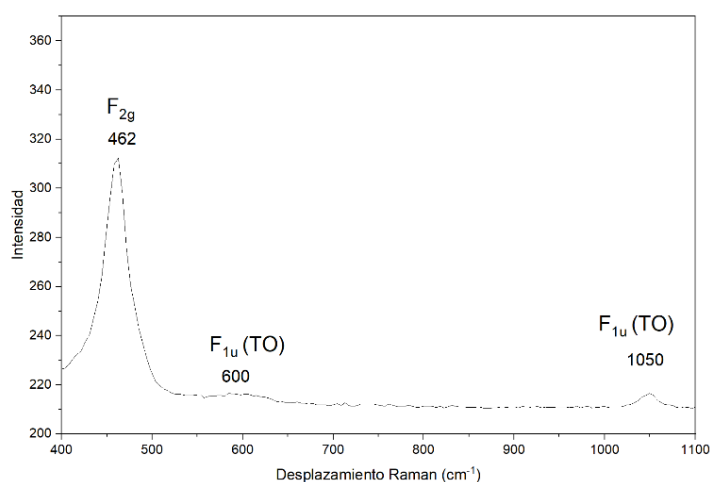


Figura 3. Espectro Raman de nanopartículas de CeO_2 .

El parámetro de red presentado en la tabla 1 resultó mayor al reportado por Reed et al. (2014) (0,51 nm), pero ligeramente menor al reportado por Pisal et al. (2019) (0,5468 nm) quien explica que valores grandes del parámetro de red estarían asociados a vacancias de oxígeno y presencia Ce^{3+} en la superficie de las nanopartículas de CeO_2 , esto es debido a que el Ce^{3+} tiene un radio iónico mayor que el Ce^{4+} generando un aumento en el parámetro de red. Así mismo, se observa que el tamaño del cristalito (D) y el tamaño (D_R), estimado a partir del espectro Raman, de las nanopartículas de CeO_2 son semejantes, lo que indicaría que son monocristalinas con un tamaño cercano a 7 nm (Ahemad et al., 2025).

Tabla 1. Parámetros estructurales de nanopartículas de CeO_2 .

Masa (g)	$D(\text{nm})$	$a(\text{nm})$	$V(\text{\AA}^3)$	$D_R(\text{nm})$
5	6,56	0,543	160	6,59

La figura 4 muestra el espectro de fotoluminiscencia a temperatura ambiente, observándose cinco bandas de emisión. Una banda en la región UV a 382 nm se atribuye a un proceso de recombinación de banda a banda, que posiblemente involucre excitones localizados o libres; una banda de emisión violeta a 409 nm que se origina en los estados defectuosos que existen ampliamente entre el estado $\text{Ce } 4f$ y la banda de valencia $\text{O } 2p$, dos bandas de emisión azul fuerte a 425 nm y 444 nm que están relacionadas con los defectos abundantes como las dislocaciones, que son útiles para el transporte rápido de oxígeno, una banda azul-verde débil a 488 nm que posiblemente se deba a defectos superficiales en las nanopartículas de CeO_2 (Arumugam et al., 2015). Los espectros Raman y de fotoluminiscencia sugieren la presencia de vacancias de oxígeno y defectos superficiales el cual es consistente con lo reportado en la literatura para CeO_2 sintetizado por combustión y sugiere una alta densidad de sitios activos. (Shirni et al., 2025)

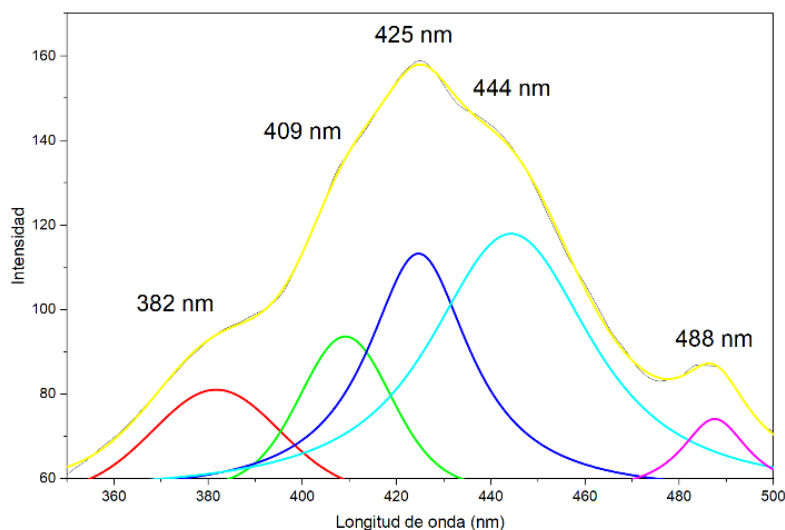


Figura 4. Espectro de fotoluminiscencia de nanopartículas de CeO_2

La Figura 5 representa los espectros FTIR de nanopartículas de CeO_2 entre 500 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} . Se observaron vibraciones de estiramiento de Ce-O alrededor de 479 cm^{-1} confirmando la formación de nanopartículas de CeO_2 con estructura cúbica centrada en las caras (Ghanbary et al., 2017). La vibración de estiramiento O-H es responsable de la banda ancha observada en 3522 cm^{-1} , mientras que la vibración de flexión O-H , causada por moléculas de agua químicamente adsorbidas, corresponde a la banda en 1626 cm^{-1} (Mishra et al., 2026). Estos picos se producen debido a los compuestos fenólicos disponibles en el extracto de *Aloe vera* (Maan et al., 2018), la presencia de este grupo podría deberse también a la naturaleza alcalina del extracto utilizado en la reacción (Pisal et al., 2019), y podría corroborar que los grupos funcionales disponibles en los compuestos químicos del extracto están fijados en la superficie de las nanopartículas de CeO_2 . También se observa una banda alrededor de 1492 cm^{-1} el cual indica los modos de vibracionales de estiramiento del C=O (Gunasekaran et al., 2019). Las bandas a 3054 cm^{-1} y 1296 cm^{-1} están relacionadas con el modo de estiramiento de los grupos C-H y C-O que son causados por los compuestos orgánicos del extracto vegetal (Miri et al., 2019; Dutta et al., 2016).

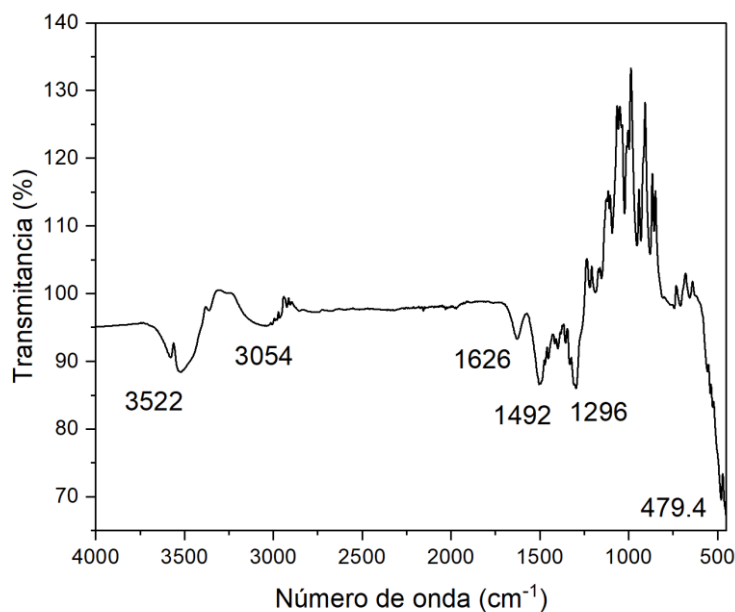


Figura 5. Espectro FTIR de nanopartículas de CeO₂

El CeO₂ es un semiconductor de banda directa, con $n=1/2$ para la ecuación 4 (Gunasekaran et al., 2019), ajustando los datos de absorción a esta última ecuación y mediante extrapolación de las partes lineales de las curvas a una absorción igual a cero (Phoka et al., 2009), se obtuvo el ancho de banda prohibida (E_g).

$$\alpha h\nu = A (h\nu - E_g)^n \quad (4)$$

La energía del fotón se denota por $h\nu$. El coeficiente de absorción se denota por α y A es una constante que involucra propiedades de las bandas (Iqbal et al., 2021). La figura 5 muestra el espectro de absorción UV-visible de las nanopartículas de CeO₂ sintetizadas con extracto alcohólico de *Aloe vera* en donde se observa un pico excitónico alrededor de 319 nm lo que lo que indica la formación de nanopartículas de CeO₂ (Choudary et al., 2024), esto se relaciona también a la transferencia de carga del estado 2p del oxígeno al estado 4f del cerio (Gunasekaran et al., 2019).

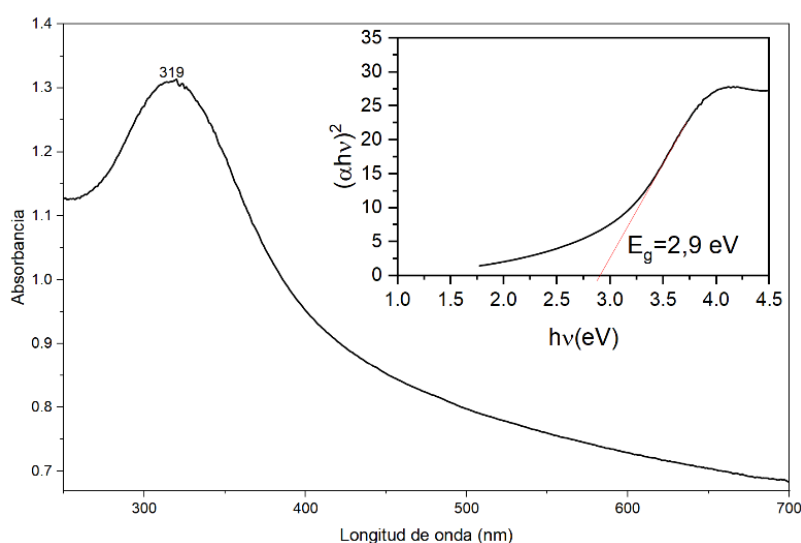


Figura 6. Espectro de absorbancia de nanopartículas de CeO₂

Las nanopartículas de CeO₂ sintetizadas con extracto de hoja fresca de pulpa de *Aloe vera* mostraron una banda prohibida de 2,9 eV, inferior a la del CeO₂ en tamaño masivo. Ahemad et al. (2025) encontró un resultado semejante para el ancho de banda prohibido y explica que esta reducción, probablemente debida a cambios estructurales derivados de la síntesis biogénica, puede mejorar las propiedades electrónicas y fotocatalíticas de las nanopartículas. Esta energía de banda prohibida reducida puede atribuirse a las vacancias de oxígeno creadas en la muestra debido al proceso de combustión como ya se había mencionado antes.

De acuerdo a la tabla 1 el tamaño de las nanopartículas de CeO₂ son de 7 nm aproximadamente y teniendo en cuenta el radio de Bohr para el CeO₂ (7-9 nm) se puede afirmar que existe confinamiento cuántico (Pisal et al., 2019). Este confinamiento cuántico aumenta el ancho de banda prohibida; sin embargo, se ha afirmado que cuando las nanopartículas de CeO₂ son muy pequeñas, aumenta la concentración de Ce⁺³, las cuales están asociadas a las vacancias de oxígeno (Thill et al., 2020). Adicionalmente, en medio acuoso el CeO₂ tiene un potencial electroquímico grande, lo que favorece la reducción de Ce⁺⁴ a Ce⁺³ (Reed et al., 2014), el cual provoca más vacancias de oxígeno que origina un corrimiento al rojo del ancho de banda prohibida (Choudhury B. & Choudhury A., 2012), lo que explicaría el valor reportado en la figura 6 en donde el ancho de banda prohibido es menor al reportado en tamaño masivo.

Las nanopartículas de CeO₂ sintetizadas presentan características estructurales y electrónicas favorables para una posible aplicación como sensores quimiorresistivos de hidrógeno, tales como un tamaño de cristalito nanométrico (~7 nm), un ancho de banda prohibido reducido (2.9 eV) y la presencia de vacancias de oxígeno. De acuerdo con lo reportado en la literatura, estas propiedades favorecen una mayor adsorción de oxígeno, un incremento de los sitios activos y una transferencia electrónica más eficiente durante las reacciones superficiales de detección. No obstante, su desempeño deberá validarse mediante mediciones de sensibilidad, selectividad, estabilidad y tiempos de respuesta. (Shirni et al., 2025)

4. CONCLUSIONES

Se sintetizaron exitosamente nanopartículas de CeO₂ utilizando extracto de hojas frescas de pulpa de *Aloe vera*, cuya estructura cúbica centrada en las caras fue claramente confirmada. La espectroscopía Raman y de fotoluminiscencia confirmaron la presencia de iones Ce³⁺ y vacancias de oxígeno, mientras que la espectroscopia FTIR reveló compuestos orgánicos residuales del extracto en la superficie de las nanopartículas. El corrimiento al rojo del ancho de banda prohibida se atribuye a las vacancias de oxígeno. El método desarrollado es sencillo, económico y respetuoso con el medio ambiente.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo financiero de la Universidad Nacional de Trujillo a través de fondos del Canon Minero mediante el contrato PIC No. 07-2024-MODALIDAD 02-VIII CONVOCATORIA, así mismo al Laboratorio de Investigación 3 de la Facultad de Farmacia y Bioquímica de la UNT por su apoyo para el análisis FTIR.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahemad, H. I., Patil, G. E., Aher, Y. B., Malik, M. S., Sonawane, L. D., More, M. A., Mandawade, A. S., Patil, D. Y., Shinde, S. D., & Jain, G. H. (2025). Synthesis and characterization of CeO₂ nanoparticles using *Plectranthus barbatus* leaf extract and its CO gas sensing and antimicrobial activity. *Materials Letters*, 379, 137652. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.137652>
- Ahmad, N. M., Mohamed, A. H., Hasan, N., Abidin, N. Z., Nawahwi, M. Z., & Azzeme, A. B. M. (2024). Effect of optimisation variable and the role of plant extract in the synthesis of nanoparticles using plant-mediated synthesis approaches. *Inorganic Chemistry Communications*, 161, 111839. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111839>
- Arumugam, A., Karthikeyan, C., Haja Hameed, A. S., Gopinath, K., Gowri, S., & Karthika, V. (2015). Synthesis of cerium oxide nanoparticles using *Gloriosa superba* L. leaf extract and their structural, optical and antibacterial properties. *Materials Science and Engineering: C*, 49, 408–415. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.01.042>
- Charbgo, F., Ahmad, M. B., & Darroudi, M. (2017). Cerium oxide nanoparticles: Green synthesis and biological applications. *International Journal of Nanomedicine*, 12, 1401–1413. <https://doi.org/10.2147/ijn.s124855>
- Choudary, M. R. P., Surya, M., & Saravanan, M. (2024). Green synthesis of cerium oxide nanoparticles using *Tribulus terrestris*: characterization and evaluation of antioxidant, anti-inflammatory and

- antibacterial efficacy against wound isolates. *Biomedical Physics & Engineering Express*, 10(6), 065033. <https://doi.org/10.1088/2057-1976/ad7f59>
- Choudhury, B., & Choudhury, A. (2012). Ce³⁺ and oxygen vacancy mediated tuning of structural and optical properties of CeO₂ nanoparticles. *Materials Chemistry and Physics*, 131(3), 666–671. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2011.10.032>
- Dhall, A., & Self, W. (2018). Cerium oxide nanoparticles: A brief review of their synthesis methods and biomedical applications. *Antioxidants*, 7(8), 97. <https://doi.org/10.3390/antiox7080097>
- Dutta, D., Mukherjee, R., Patra, M., Banik, M., Dasgupta, R., Mukherjee, M., & Basu, T. (2016). Green synthesized cerium oxide nanoparticle: A prospective drug against oxidative harm. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 147, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2016.07.045>
- Ghanbary, F., & Jafarnejad, E. (2017). Removal of malachite green from aqueous solutions using polyimide nanocomposite containing cerium oxide as adsorbent. *Inorganic and Nano-Metal Chemistry*, 47(12), 1675–1681. <https://doi.org/10.1080/24701556.2017.1357598>
- Gunasekaran, S., Dinesh, A., Silambarasu, A., Thirumurugan, V., & Shankar, S. (2019). Rare earth element (REE) Nd³⁺ doped CeO₂ nanoparticles using *Aloe vera* leaf extract: Structural, optical and antimicrobial activity. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 19(7), 3964–3970. <https://doi.org/10.1166/jnn.2019.16307>
- Huang, Y., Cai, Y., Qiao, D., & Liu, H. (2011). Morphology-controllable synthesis and characterization of CeO₂ nanocrystals. *Particuology*, 9(2), 170–173. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2010.07.023>
- Iqbal, A., Ahmed, A. S., Ahmad, N., Shafi, A., Ahamad, T., Khan, M. Z., & Srivastava, S. (2021). Biogenic synthesis of CeO₂ nanoparticles and its potential application as an efficient photocatalyst for the degradation of toxic amido black dye. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 16, 100505. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100505>
- Kumar, K. M., Mahendhiran, M., Diaz, M. C., Hernandez-Como, N., Hernandez-Eligio, A., Torres-Torres, G., Godavarthi, S., & Gomez, L. M. (2018). Green synthesis of Ce³⁺ rich CeO₂ nanoparticles and its antimicrobial studies. *Materials Letters*, 214, 15–19. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.11.097>
- Maan, A. A., Nazir, A., Khan, M. K. I., Ahmad, T., Zia, R., Murid, M., & Abrar, M. (2018). The therapeutic properties and applications of *Aloe vera*: A review. *Journal of Herbal Medicine*, 12, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.hermed.2018.01.002>
- Miri, A., Darroudi, M., & Sarani, M. (2019). Biosynthesis of cerium oxide nanoparticles and its cytotoxicity survey against colon cancer cell line. *Applied Organometallic Chemistry*, 2019, e5308. <https://doi.org/10.1002/aoc.5308>
- Mishra, U. K., Al-Gethami, W., Alqahtani, Z., Alshahrani, M., Madkhali, A., Chandel, V. S., Mourya, V. K., Singh, S. P., Abdelaziz, F. A., & Shariq, M. (2026). Green fabrication of Cr-doped CeO₂ nanoparticles and their structural, optical and photocatalytic performance toward methylene blue degradation. *Polyhedron*, 297, 118211. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2026.118211>
- Nadeem, M., Khan, R., Afridi, K., Nadhman, A., Ullah, S., Faisal, S., Mabood, Z. U., Hano, C., & Abbasi, B. H. (2020). Green synthesis of cerium oxide nanoparticles (CeO₂ NPs) and their antimicrobial applications: A review. *International Journal of Nanomedicine*, 15, 5951–5961. <https://doi.org/10.2147/ijn.s255784>
- Phoka, S., Laokul, P., Swatsitang, E., Promarak, V., Seraphin, S., & Maensiri, S. (2009). Synthesis, structural and optical properties of CeO₂ nanoparticles synthesized by a simple polyvinyl pyrrolidone (PVP) solution route. *Materials Chemistry And Physics*, 115(1), 423–428. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.12.031>
- Pisal, V., Wakchaure, P., Patil, N., & Bhagwat, S. (2019). Green synthesized CeO₂ quantum dots: A study of its antimicrobial potential. *Materials Research Express*, 6(11), 115409. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab4fa5>
- Reed, K., Cormack, A., Kulkarni, A., Mayton, M., Sayle, D., Klaessig, F., & Stadler, B. (2014). Exploring the properties and applications of nanoceria: Is there still plenty of room at the bottom? *Environmental Science: Nano*, 1(5), 390–405. <https://doi.org/10.1039/c4en00079j>
- Schilling, C., Hofmann, A., Hess, C., & Ganduglia-Pirovano, M. V. (2017). Raman spectra of polycrystalline CeO₂: A density functional theory study. *Journal of Physical Chemistry C*, 121(38), 20834–20849. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b06643>

- Shirni, A. P., Talwar, M. N., Ashadevi, K. S., Goud, S. P. R., Nalajala, N., Shanbhag, G. V., Rao, S. V. S. N., & Prakash, G. A. P. (2025). Highly porous CeO₂ nanoparticles for real-time hydrogen gas sensing application at room temperature. *Nanotechnology*, 36(41), 415503. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ae0ccf>
- Thill, A. S., Lobato, F. O., Vaz, M. O., Fernandes, W. P., Carvalho, V. E., Soares, E. A., Poletto, F., Teixeira, S. R., & Bernardi, F. (2020). Shifting the band gap from UV to visible region in cerium oxide nanoparticles. *Applied Surface Science*, 528, 146860. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146860>
- Tumkur, P. P., Gunasekaran, N. K., Lamani, B. R., Nazario Bayon, N., Prabhakaran, K., Hall, J. C., & Ramesh, G. T. (2021). Cerium oxide nanoparticles: Synthesis and characterization for biosafe applications. *Nanomanufacturing*, 1(3), 176–189. <https://doi.org/10.3390/nanomanufacturing1030013>
- Vasudevan, P. (2023). Biogenic synthesis of cerium oxide nanoparticles using *Justicia adathoda* leaves extract: Size-strain study by x-ray peak profile analysis and luminescence characteristics. *Journal of Molecular Structure*, 1272, 134144. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.134144>
- Zhang, G., Xu, J., Hou, Z., & Wang, Q. (2017). Research on microstructure and catalysis properties of nanosized Ce_{1-x}(Fe_{0.5}Eu_{0.5})_xO_{2-δ} solid solutions. *Journal of Rare Earths*, 35(1), 63–70. [https://doi.org/10.1016/s1002-0721\(16\)60175-8](https://doi.org/10.1016/s1002-0721(16)60175-8)