

Síntesis verde de partículas de CeO₂ por los métodos hidrotérmal y precipitación utilizando extracto de cáscara de plátano como agente reductor

Green synthesis of CeO₂ particles by hydrothermal and precipitation methods using banana peel extract as a reducing agent

B. S. Mata-Solis , C. M. Martínez-Hernández , E. Sánchez-Ramírez , G. García-Domínguez 
N. Y. Martínez-Palma *

Departamento de Procesos Industriales, Universidad Tecnológica de Tecámac, 55740, Tecámac, Estado de México, México.

Resumen

En este estudio se sintetizaron partículas de dióxido de cerio (CeO₂) empleando un extracto acuoso de cáscara de plátano como agente reductor y estabilizante, las técnicas de síntesis probadas fueron precipitación e hidrotérmal. Los polvos obtenidos fueron caracterizados utilizando espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR), microscopía electrónica de barrido (MEB) y espectroscopía ultravioleta-visible (UV-Vis). El espectro infrarrojo indicó la presencia de grupos orgánicos pertenecientes a la cáscara de plátano y también aquellos que evidencian la síntesis de CeO₂. Las micrografías demostraron que se obtuvieron tamaños de partículas micrométricas en ambas muestras, teniendo una mayor distribución de tamaño en aquellas obtenidas por la técnica hidrotérmal, la técnica de DRX indica que ambas muestras cristalizaron en la estructura tipo cúbica de fluorita, por medio de espectrofotometría UV-VIS se determinó una absorción máxima a 318 nm para la muestra obtenida por método hidrotérmal. A expensas de más técnicas de caracterización, el método hidrotérmal permite más control de los parámetros de síntesis.

Palabras Clave: Dióxido de cerio, cáscara de plátano, precipitación, hidrotérmal.

Abstract

In this study, cerium dioxide (CeO₂) particles were synthesized using an aqueous extract of banana peel as a reducing and stabilizing agent. The tested synthesis techniques were precipitation and hydrothermal methods. The obtained powders were characterized using Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR), scanning electron microscopy (SEM), and ultraviolet-visible spectroscopy (UV-Vis). The infrared spectrum indicated the presence of organic groups from the banana peel, as well as those confirming the synthesis of CeO₂. The micrographs showed that micrometric particle sizes were obtained in both samples, with a wider size distribution in those obtained via the hydrothermal technique. XRD analysis indicated that both samples crystallized in a fluorite-type cubic structure. UV-Vis spectrophotometry determined a maximum absorption at 318 nm for the sample obtained via the hydrothermal method. Pending further characterization techniques, the hydrothermal method allows for better control of synthesis parameters.

Keywords: Cerium dioxide, aqueous banana peel, precipitation, hydrothermal.

1. Introducción

El dióxido de cerio (CeO₂) es un óxido de metal de tierras raras que ha captado una atención significativa en la investigación debido a sus propiedades fisicoquímicas (Supakanapitak *et al.*, 2012). Estas propiedades incluyen una alta estabilidad térmica, capacidad de intercambio iónico, y una estructura cristalina que puede albergar vacantes de oxígeno, lo que le confiere una amplia gama de aplicaciones

en campos como la medicina, la electrónica, protección contra radiación ultravioleta (UV), sensores de gas, electrolitos en celdas de combustible y materiales para la fotocatalisis (Dastpak *et al.*, 2016 y Channei *et al.*, 2013).

Tradicionalmente, la síntesis de nanopartículas de CeO₂ se ha llevado a cabo mediante métodos físicos y químicos convencionales como la pirólisis por aerosol (Kang *et al.*, 2005), la ultrasonificación (Gowthaman *et al.*, 2020) y el

*Autor para la correspondencia: nmartinezp@uttecamac.edu.mx

Correo electrónico: bms.delsagrario@gmail.com (Beariz S. Mata-Solis), miguelmartinezhernandez@gmail.com (Cristian M. Martínez-Hernández), rsanchezeduardo.11@gmail.com (Eduardo Sanchez-Ramírez), ggarciad@uttecamac.edu.mx (Giovanni García-Domínguez), nmartinezp@uttecamac.edu.mx (Nikte Y. Martínez-Palma)

método sol-gel (Ferreira *et al.*, 2016). Sin embargo, estos métodos presentan limitaciones significativas, incluyendo el uso de reactivos tóxicos, altos costos de producción y la necesidad de equipos complejos (Nyoka *et al.*, 2020). La síntesis química a menudo requiere condiciones estrictas y produce subproductos que pueden ser perjudiciales para el medio ambiente (Zarinkamar *et al.*, 2016). Por otro lado, la síntesis verde, que emplea materiales biológicos como plantas, bacterias y hongos ha emergido como una alternativa más sostenible y económica para la producción de nanopartículas. La síntesis verde no solo minimiza el uso de químicos peligrosos, sino que también ofrece un enfoque más ecológico al aprovechar las capacidades reductoras y estabilizadoras de los extractos biológicos (Ahmed *et al.*, 2021).

Las cáscaras de plátano (*Musa sapientum*), un subproducto agrícola abundante, han demostrado ser una fuente rica en compuestos bioactivos como fenoles, ácidos grasos y azúcares, que pueden actuar como agentes reductores y estabilizantes en la síntesis de nanopartículas (Manojkumar *et al.*, 2024). El plátano, originario del sudeste asiático y cultivado ampliamente en regiones tropicales, es especialmente rico en potasio, lignina, catequinas y taninos. Estos compuestos tienen la capacidad de donar electrones durante el proceso de reducción, facilitando la conversión de iones metálicos en nanopartículas metálicas (Bukhari *et al.*, 2023).

En los últimos años, la síntesis de nanopartículas utilizando extractos de cáscaras de plátano ha ganado relevancia debido a su simplicidad, bajo costo y menor impacto ambiental. Además, las nanopartículas de CeO₂ sintetizadas mediante métodos verdes han mostrado una mejora en propiedades como la actividad fotocatalítica y la protección UV, lo que las convierte en candidatas prometedoras para aplicaciones en la remediación ambiental y en la industria cosmética (Wang *et al.*, 2019).

Este trabajo se centra en la síntesis verde de partículas de CeO₂ mediante las técnicas de precipitación e hidrotérmal utilizando como precursor un extracto acuoso de cáscara de plátano. El uso de cáscaras de plátano no solo proporciona un medio ecológico para la síntesis de estas nanopartículas, sino que también promueve el aprovechamiento de residuos agrícolas, contribuyendo a un enfoque de economía circular.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

Cáscara de plátano, H₂O destilada, nitrato de cerio amónico (NH₄)₂ [Ce(NO₃)₆] y NaOH, estos últimos marca sigma.

2.2 Metodología

2.2.1. Obtención del extracto acuoso de cáscara de plátano

Se cortó la cáscara de plátano y los trozos se colocaron en charolas para secarlos en un horno a 150°C por 2 horas.

Posteriormente los trozos secos se trituraron en un mortero hasta obtener un polvo fino. Para obtener el extracto, se usó una proporción de 1:10 (cáscara seca y agua destilada), la solución se mantuvo en agitación a temperatura ambiente por 20 minutos, después de este tiempo la solución se filtró al vacío con papel Whatman para eliminar los residuos de la cáscara. El extracto obtenido se guardó para su posterior uso.

2.2.2 Síntesis de CeO₂

Como precursor se empleó nitrato de cerio amónico (NH₄)₂ [Ce(NO₃)₆], se preparó una disolución con 2.5 g y 100 mL de agua destilada. Posteriormente se añadió por goteo el extracto de plátano a la solución de precursor hasta obtener una relación 1:5.

2.2.3. Método de precipitación

La mezcla de precursor y extracto se agitó por 4 horas a una temperatura de 70°C, transcurrido este tiempo se adiciono por goteo una solución de NaOH 1M hasta alcanzar un pH de 7.0, posteriormente la mezcla se centrifugó a 4000 rpm por 15 min y para eliminar impurezas se realizaron 3 lavados con agua destilada.

El precipitado se secó a 90°C por 1 hora y posteriormente se llevó a la mufla a 400°C por 2 horas. Los polvos obtenidos se caracterizaron.

2.2.4. Método hidrotérmal

Para esta técnica de síntesis se tomaron 30 mL de la solución de precursor con extracto de cáscara de plátano y se colocaron en una autoclave revestida de teflón.

El tratamiento hidrotérmal se realizó a una temperatura de 190°C durante 12 horas. Finalizado el proceso la autoclave se dejó enfriar a temperatura ambiente, la solución obtenida se centrifugó a 4000 rpm por 15 min y se realizaron 3 lavados con agua destilada para eliminar impurezas. El precipitado obtenido se secó a 90°C por 1 hora y posteriormente se llevó a la mufla a 400°C por 2 horas.

2.2.5. Caracterización de las muestras

Las muestras de CeO₂ se caracterizaron por Espectroscopia Infrarrojo por Transformada de Fourier (FT-IR), en el modo de reflectancia total atenuada en un espectrofotómetro Spectrum Two (PerkinElmer, Waltham, Massachusetts, USA), para identificar los enlaces característicos del material. Los espectros se obtuvieron realizando un barrido en la región de 4000 a 500 cm⁻¹.

También se empleó la espectrofotometría UV-Visible para la obtención del espectro de absorción. Se empleó un equipo Perkin-Elmer Lambda, el barrido se realizó de 400 a 200 nm empleando celdas de cuarzo y agua destilada como blanco.

La Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), se realizó con un equipo JOEL modelo JCM-6000 (Jeol Ltd Akishima, Tokio, Japón) operando bajo alto vacío y una tensión de aceleración de 10 kV para determinar la morfología de las partículas y detectar la formación de aglomerados.

La Difracción de Rayos X (DRX) se usó para identificar las fases cristalinas, la determinación se realizó a temperatura ambiente en un difractor Bruker D8 Advance Eco (Bruker, Billerica, MA, EE.UU.) utilizando una radiación $\text{Cu K}\alpha$ de $\lambda = 1.541 \text{ \AA}$.

3. Resultados y discusión

En la Figura 1 se muestra la reacción propuesta para la formación del CeO_2 , el nitrato de cerio amónico al ser una sal soluble en agua libera iones Ce^{4+} , cuando se mezcla con el extracto de cáscara de plátano rico en almidón (unidades de glucosa) se induce la formación de $\text{Ce}(\text{OH})_4$, por último, mediante un proceso térmico se elimina agua y se forma el CeO_2 .

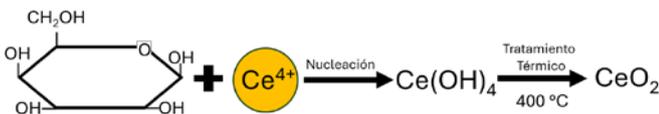


Figura 1. Mecanismo de reacción propuesto para la síntesis de CeO_2 (Miri *et al.*, 2021).

El espectro FT-IR obtenido para las muestras de CeO_2 sintetizadas por los métodos de precipitación (P) e hidrotermal (H) se muestra en la Figura 2. Dicho espectro permite identificar los grupos funcionales característicos del óxido de cerio y comparar las técnicas de síntesis en términos de los componentes químicos que contienen las muestras.

El pico obtenido a 1643 cm^{-1} , sugiere la presencia de agua absorbida en los polvos después de la calcinación o grupos OH^- en ambas muestras. Los picos a 1515 y 1350 cm^{-1} corresponde a las vibraciones de los enlaces $\text{C}=\text{C}$ y $\text{C}-\text{H}$, respectivamente.

Las bandas a 981 y 842 cm^{-1} están relacionados con las vibraciones de los enlaces $\text{Ce}-\text{O}$, que son característicos del óxido de cerio, se observa que su intensidad cambia con respecto a la metodología de síntesis.

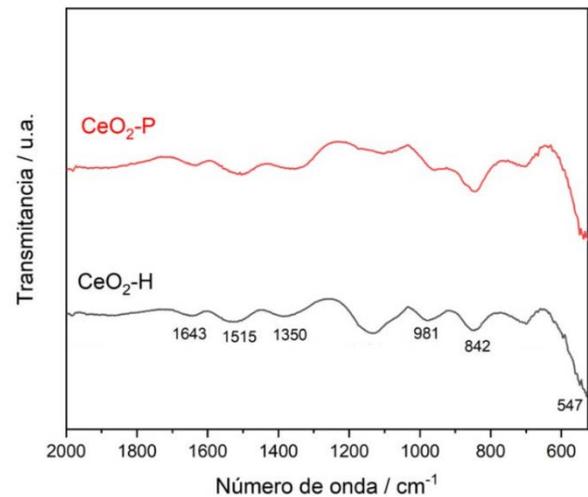


Figura 2. Espectros infrarrojos de muestras de CeO_2 obtenidas por método hidrotermal ($\text{CeO}_2\text{-H}$) y precipitación ($\text{CeO}_2\text{-P}$), empleando como agente reductor extracto acuoso de cáscara de plátano.

Según Culica *et al.*, (2020) alrededor de los 555 cm^{-1} se observa la vibración del estiramiento $\text{Ce}-\text{O}$, corroborando que la banda a 547 cm^{-1} , se encuentra ubicada cerca del enlace metal-oxígeno ($\text{M}-\text{O}$) en el material.

En la Figura 3 se presentan las micrografías de las partículas sintetizadas por el método de precipitación, donde se observa una notable heterogeneidad en su morfología. Este comportamiento puede atribuirse a un crecimiento no homogéneo de las partículas, influenciado por factores como la concentración o la velocidad de nucleación durante la síntesis, según lo reportado por Chen *et al.* (2020) y Li *et al.* (2021). Gómez *et al.* (2022) y Smith *et al.* (2021) también señalan que esta variabilidad es característica de los procesos de precipitación, donde el control inadecuado de las condiciones de síntesis resulta en una distribución de partículas desigual. Estas diferencias morfológicas podrían afectar de manera adversa las propiedades físicas y químicas de las partículas, así como su actividad catalítica y estabilidad térmica (Martínez *et al.*, 2021; Kumar y Singh, 2019).

Por otro lado, las micrografías de las partículas sintetizadas mediante el método hidrotermal revelan una distribución más controlada y una menor aglomeración, lo que sugiere un mejor control de las condiciones de síntesis. Este método, al emplear temperaturas y presiones elevadas, permite un crecimiento de partículas más uniforme (Xu *et al.*, 2020). Según Wang y Li (2019), la distribución de tamaño más consistente y la morfología controlada son características del proceso hidrotermal, lo que resulta crucial para diversas aplicaciones, ya que impacta directamente en la superficie activa del CeO_2 .

Las micrografías del CeO_2 revelan detalles cruciales sobre la morfología de las partículas, se observan diferencias significativas en el tamaño de las partículas sintetizadas por ambos métodos, las variaciones en la microestructura sugieren que las condiciones de síntesis influyen directamente en la uniformidad y distribución de tamaño de las partículas, lo que puede afectar sus propiedades fotocatalíticas y su rendimiento en aplicaciones específicas (Smith *et al.*, 2022).

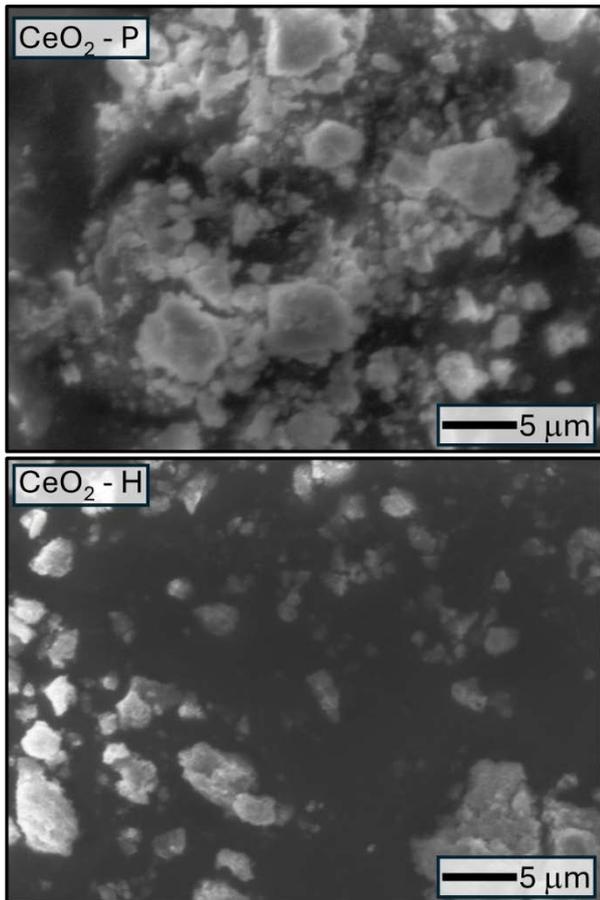


Figura 3. Micrografías de partículas de CeO_2 sintetizadas vía precipitación ($\text{CeO}_2\text{-P}$) e hidrotermal ($\text{CeO}_2\text{-H}$).

Para la determinación del tamaño de partícula se analizaron las micrografías de las muestras de CeO_2 mediante el software ImageJ. En la Figura 4 se presenta la distribución del tamaño de partícula sintetizado vía precipitación e hidrotermal.

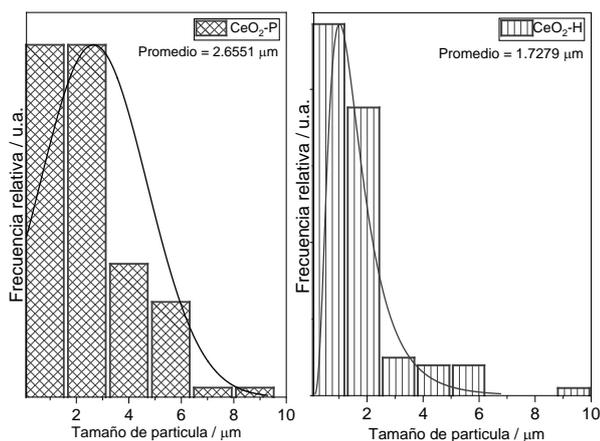


Figura 4. Distribución del tamaño de partículas del CeO_2 sintetizadas vía precipitación ($\text{CeO}_2\text{-P}$) e hidrotermal ($\text{CeO}_2\text{-H}$).

Las partículas sintetizadas por precipitación tienen un tamaño promedio de 2.655 μm . Esta distribución en los tamaños puede atribuirse a factores como una tasa de nucleación descontrolada o un crecimiento de cristales menos

uniforme durante el proceso (Jiang *et al.*, 2021). Esta variabilidad es común en los métodos de precipitación, donde las condiciones de síntesis no siempre permiten obtener una distribución estrecha de tamaños. Durante el proceso, el precipitado se forma al añadir un agente precipitante, típicamente un hidróxido, que provoca la sobresaturación de la solución. Las partículas crecen al precipitarse, pero el control sobre su tamaño y morfología es limitado, lo que explica la variabilidad observada en la distribución de tamaños (Li *et al.*, 2018).

Por otro lado, se observa una distribución de partículas más estrecha y homogénea con el método hidrotermal. En este proceso, el CeO_2 se sintetiza en una autoclave bajo condiciones de presión alta y temperatura, lo que permite un control más preciso sobre el crecimiento de las partículas. La nucleación y el crecimiento ocurren de manera más controlada, resultando en partículas más uniformes y bien cristalizadas (Wang *et al.*, 2020).

Las partículas sintetizadas vía hidrotermal tienen un tamaño promedio de 1.7279 μm . Esta uniformidad en la distribución de tamaños es característica del método hidrotermal, ya que las condiciones controladas dentro del autoclave limitan el crecimiento excesivo de las partículas, lo que resulta en una distribución más ajustada (Yang *et al.*, 2019). La menor dispersión en el tamaño observada en la gráfica es un indicativo de la ventaja de este método al para producir partículas con un tamaño controlado.

En la Figura 5 se muestra el espectro UV-Vis de las muestras de CeO_2 sintetizadas por las técnicas de hidrotermal y precipitación utilizando extracto de cáscara de plátano como agente reductor. En el espectro se observa una longitud de onda de máxima absorción (λ_{max}) diferente entre las muestras. Para la muestra obtenida por el método hidrotermal se obtuvo una absorción máxima a 318 nm, caso contrario con la muestra obtenida por la técnica de precipitación donde no se aprecia un máximo absorción.

El estudio espectral de absorción UV-visible puede ayudar a comprender la estructura electrónica de la banda prohibida óptica del material. La absorción en la región ultravioleta cercana surge de transiciones electrónicas asociadas dentro de la muestra, en estudios previos se reportan variaciones en la absorción en muestras con diferentes tamaños de partícula, lo que indica un cambio en las propiedades ópticas del CeO_2 (Solapa *et al.*, 2019). Esto sugiere que en las muestras obtenidas por ambos métodos de síntesis se obtienen diferentes tamaños de partícula. Se ha reportado un máximo de absorción a 315 nm para CeO_2 obtenido por síntesis verde (Maqbool *et al.*, 2016).

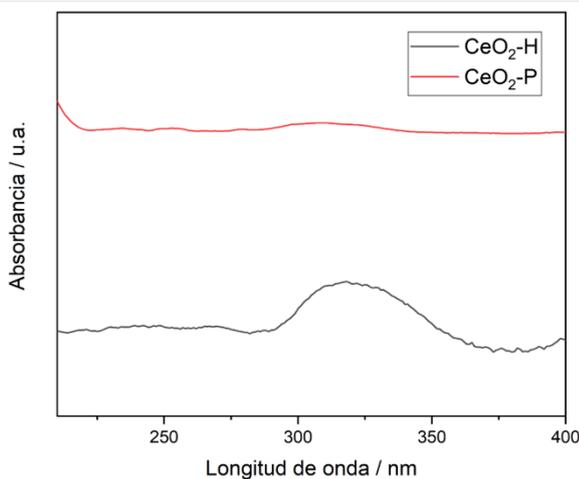


Figura 5. Espectro UV de las muestras de CeO_2 obtenidas por método hidrotermal ($\text{CeO}_2\text{-H}$) y precipitación ($\text{CeO}_2\text{-P}$), empleando como agente reductor extracto acuoso de cáscara de plátano

Los patrones de difracción de rayos X (DRX) se presentan en la Figura 6, se confirma que ambas muestras cristalizaron en la estructura tipo cúbica de fluorita del CeO_2 de acuerdo con la carta JCPDS 34-0394, lo cual se evidencia por la coincidencia de los picos característicos. Sin embargo, la ruta de síntesis empleada para obtener el CeO_2 afecta significativamente la cristalinidad del material. En particular, la muestra $\text{CeO}_2\text{-P}$ presenta picos más intensos que la muestra $\text{CeO}_2\text{-H}$, lo que puede atribuirse al uso del extracto acuoso de cáscara de plátano, el cual podría interferir en la pureza del CeO_2 y favorecer la formación de fases secundarias.

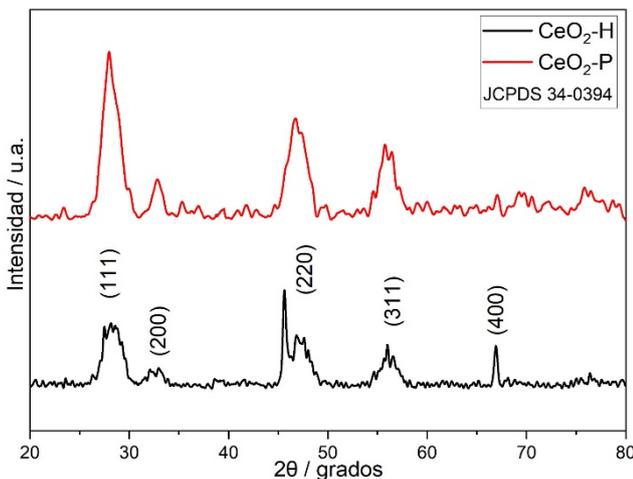


Figura 6. Patrones DRX de las muestras de CeO_2 obtenidas por método hidrotermal ($\text{CeO}_2\text{-H}$) y precipitación ($\text{CeO}_2\text{-P}$), empleando como agente reductor extracto acuoso de cáscara de plátano.

Además, se observa una diferencia en la intensidad del plano (400), siendo menos intenso en la muestra $\text{CeO}_2\text{-P}$. Esto puede deberse a la preferencia de crecimiento cristalino en el método hidrotermal, donde las condiciones de alta presión y temperatura críticas influyen en la orientación de los planos cristalográficos. Por otro lado, el método hidrotermal genera tamaños de cristal más pequeños, lo cual se refleja en la menor intensidad y el mayor ensanchamiento de los picos. En contraste, el método de precipitación tiende a producir

cristalitos de mayor tamaño, lo que explica los picos más intensos y estrechos observados en la muestra $\text{CeO}_2\text{-P}$.

Estas observaciones son consistentes con la síntesis de CeO_2 mediante el método de precipitación, donde los patrones de DRX mostraron una mayor intensidad de picos, y se obtuvo un tamaño de cristalito de 9 nm (Nurhasanah *et al.*, 2018). Aunque la síntesis hidrotermal produce una mayor cristalinidad, se ha reportado que diversos parámetros, como la temperatura y el tiempo de reacción, influyen en el resultado.

4. Conclusiones

En este estudio se investigó la síntesis de CeO_2 utilizando extracto acuoso de cáscara de plátano como agente reductor. Los espectros obtenidos por FT-IR revelaron la presencia de las bandas correspondientes del CeO_2 (981 , 842 y 547 cm^{-1}) y también algunos otros que podrían corresponder a impurezas generadas por el extracto vegetal, en futuras investigaciones se recomienda alcohol para los lavados y una mejora en el tratamiento térmico.

Los patrones de DRX confirmaron que las muestras cristalizaron en una estructura cúbica tipo fluorita. Sin embargo, la intensidad y la presencia de los planos cristalográficos dependen de las condiciones de síntesis, siendo el método hidrotermal el que presenta picos más definidos, mientras que el método de precipitación muestra una mayor intensidad.

En ambas síntesis se tiene un tamaño de partícula superior a $1\text{ }\mu\text{m}$, los resultados obtenidos en la espectrofotometría UV-Vis corresponden con lo reportado en otros trabajos donde se ha encontrado una longitud de onda de máxima absorción similar y tamaño de partícula de 1.72 nm , para la obtención de nanopartículas se sugiere ajustar los parámetros de síntesis.

Por medio de este trabajo se demostró que para la síntesis de CeO_2 empleando como agente reductor un extracto de cáscara de plátano, la técnica por hidrotermal ofrece un mayor control de los parámetros de síntesis en comparación con la técnica de precipitación. Esto plantea una alternativa más para la obtención de este material que puede ser incorporado en productos como protectores solares.

Agradecimientos

Esta investigación contó con el apoyo de la Universidad Tecnológica de Tecámac. Los autores desean expresar su agradecimiento al CCAI-UTTEC por facilitar el acceso a sus instalaciones y por el apoyo brindado en los análisis de caracterización.

Referencias

- Ahmed, H. E., Iqbal, Y., Aziz, M. H., Atif, M., Batoool, Z., Hanif, A. & Ahmad, H. (2021). Green synthesis of CeO₂ nanoparticles from the *Abelmoschus esculentus* extract: evaluation of antioxidant, anticancer, antibacterial, and wound-healing activities. *Molecules*, 26(15), 4659.
- Bukhari, S. A., Shakir, H. A., Khan, M., Saeed, S., Ahmad, I., & Irfan, M. (2023). Biosynthesized cerium oxide nanoparticles CeO₂NPs: Recent progress and medical applications. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 24(6), 766-779.
- Channei, D., Inceesungvorn, B., Wetchakun, N., Phanichphant, S., Nakaruk, A., Koshy, P., & Sorrell, C. C. (2013). Photocatalytic activity under visible light of Fe-doped CeO₂ nanoparticles synthesized by flame spray pyrolysis. *Ceramics International*, 39(3), 3129-3134.
- Chen, Y., Li, X., & Zhang, T. (2020). Study on particle growth influenced by concentration and nucleation speed. *Journal of Materials Science*, 45(7), 1234-1241.
- Culica, M., Chivas-Scutaru, A.L., Meliente, V., Coseri, S. (2020). Cellulose incorporation organically functionalized CeO₂ NPs: Efficient materials for UV filtering applications. *MDPI*.
- Dastpak, M., Farahmandjou, M., & Firoozabadi, T. P. (2016). Synthesis and preparation of magnetic Fe-doped CeO₂ nanoparticles prepared by simple sol-gel method. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 29(11), 2925-2929.
- Ferreira, N. S., Angélica, R. S., Marques, V. B., De Lima, C. C. O., & Silva, M. S. (2016). Cassava-starch-assisted sol-gel synthesis of CeO₂ nanoparticles. *Materials Letters*, 165, 139-142.
- Gómez, P., Hernández, R., & Jiménez, S. (2022). Precipitation methods and particle size control: An overview. *Applied Catalysis B*, 271, 118952.
- Gowthaman, N. S. K., Lim, H. N., Balakumar, V., & Shankar, S. (2020). Ultrasonic synthesis of CeO₂@ organic dye nanohybrid: environmentally benign rapid electrochemical sensing platform for carcinogenic pollutant in water samples. *Ultrasonics Sonochemistry*, 61, 104828.
- Jiang, L., Li, X., & Wang, J. (2021). Variability in particle size distribution during precipitation synthesis. *Journal of Physical Chemistry C*, 125(10), 5023-5034.
- Kang, H. S., Sohn, J. R., Kang, Y. C., Jung, K. Y., & Park, S. B. (2005). The characteristics of nano-sized Gd-doped CeO₂ particles prepared by spray pyrolysis. *Journal of alloys and compounds*, 398(1-2), 240-244.
- Kumar, P., & Singh, A. (2019). Catalytic activity of CeO₂ in heterogeneous reactions. *Materials Letters*, 234, 213-220.
- Li, X., Zhang, L., & Wang, J. (2018). Precipitation methods for nanoparticle synthesis. *Journal of Colloid and Interface Science*, 529, 123-130.
- Manojkumar, M. S., Sivaprakash, B., Arumugam, N., & Almansour, A. I. (2024). Banana peel extract for CeO₂ nanoflower synthesis: Enhancing photocatalytic activity for methyl orange dye removal and bactericidal effects. *Environmental Research*, 252, 118785.
- Martínez, S., Fernández, J., & Ruiz, P. (2021). Morphological variations in particle growth: A review. *Nanotechnology*, 32(4), 045701.
- Maqbool, Q., Nazar, M., Naz, S., Hussain, T., Jabeen, N., Kausar, R., Jan, T. (2016). Antimicrobial potential of green synthesized CeO₂ nanoparticles from *Olea europaea* leaf extract. *International journal of nanomedicine*, 5015-5025.
- Miri, A., Beiki, H., Najafidoust, A., Khatami, M., & Sarani, M. (2021). Cerium oxide nanoparticles: green synthesis using Banana peel, cytotoxic effect, UV protection and their photocatalytic activity. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 44(9), 1891-1899.
- Nyoka, M., Choonara, Y. E., Kumar, P., Kondiah, P. P., & Pillay, V. (2020). Synthesis of cerium oxide nanoparticles using various methods: implications for biomedical applications. *Nanomaterials*, 10(2), 242.
- Nurhasanah, I., Safitri, W., Arifin, Z., Subagio, A. y Windarti, T. (noviembre de 2018). Actividad antioxidante y factor de mejora de la dosis de nanopartículas de CeO₂ sintetizadas por el método de precipitación. En *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 432, p. 012031). IOP Publishing.
- Solapa, Y., Sarnatskaya, V., Timashkov, I., Yushko, L., Antal, I., Gerashchenko, B. & Timko, M. (2019). Synthesis of CeO₂ nanoparticles by precipitation in reversal microemulsions and their physical-chemical and biological properties. *Applied Physics A*, 125, 1-10.
- Smith, J., Davis, M., & Johnson, P. (2022). Influence of synthesis conditions on photocatalytic properties. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 127, 105731.
- Smith, J., Martínez, A., & Chen, L. (2021). Precipitation-induced particle aggregation and its effects. *Journal of Solid State Chemistry*, 298, 122051.
- Supakanapitak, S., Boonamnuyvitaya, V., & Jarudilokkul, S. (2012). Synthesis of nanocrystalline CeO₂ particles by different emulsion methods. *Materials characterization*, 67, 83-92.
- Wang, H., Xu, L., & Chen, Y. (2020). Hydrothermal synthesis of uniform CeO₂ particles. *Ceramics International*, 46(9), 13428-13434.
- Wang, H., & Li, X. (2019). Controlled morphologies in hydrothermal synthesis of nanomaterials. *Materials Today Chemistry*, 13, 34-45.
- Wang, W., Zhang, B., Jiang, S., Bai, H., & Zhang, S. (2019). Use of CeO₂ nanoparticles to enhance UV-shielding of transparent regenerated cellulose films. *Polymers*, 11(3), 458.
- Xu, Z., Li, Y., & Wang, Q. (2020). The effects of hydrothermal pressure and temperature on nanoparticle formation. *Journal of Nanoparticle Research*, 22(3), 56.
- Yang, P., Li, F., & Zhang, W. (2019). Hydrothermal methods for controlled particle growth. *Journal of Crystal Growth*, 512, 105-112.
- Zarinkamar, M., Farahmandjou, M., & Firoozabadi, T. P. (2016). One-step synthesis of ceria (CeO₂) nano-spheres by a simple wet chemical method. *Journal of Ceramic Processing Research*, 17(3), 166-169.