

Síntesis y Análisis Estructural de Materiales Silíceos Mesoporosos

María de Jesús Martínez-Carreón(<https://orcid.org/0000-0002-9283-7857>)^{a*}, Raquel Murillo-Ortiz(<https://orcid.org/0009-0007-4377-6107>)^a, Azael Adrián Cavazos-Jaramillo(<https://orcid.org/0000-0003-0728-7094>)^b, Mitchel Abraham Ruiz-Robles(<https://orcid.org/0000-0003-4834-8025>)^a, Francisco Solis-Pomar(<https://orcid.org/0000-0002-4536-6538>)^a y Eduardo Pérez-Tijerina(<https://orcid.org/0000-0001-9742-4093>)^a

^a Centro de Investigación en Ciencias Físico Matemáticas, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Universidad Autónoma de Nuevo León, Avenida Universidad s/n, San Nicolás de los Garza, México.

^b Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, Avenida Universidad s/n, San Nicolás de los Garza, México.

* maria.martinezcr@uanl.edu.mx

Recibido 30 de noviembre 2025, Aceptado 10 enero 2026

Resumen

En este trabajo se sintetizó sílice mesoporosa tipo SBA-15 (Santa Barbara Amorphous-15), un material silíceo no cristalino caracterizado por una estructura mesoporosa altamente ordenada con posible contribución microporosa en sus paredes y un arreglo hexagonal bien definido. Sus propiedades texturales, como tamaño de poro uniforme y potencial jerarquización, junto con su elevada estabilidad hidrotérmica y mecánica, la convierten en un soporte estructurado de gran interés para aplicaciones catalíticas y de adsorción. Con el objetivo de conferir funcionalidad al material, se incorporaron especies de Cu y Cu-Ce en forma de óxidos mediante la técnica de impregnación a humedad incipiente, utilizando precursores metálicos disueltos en etanol y aplicando impregnaciones sucesivas. La SBA-15 se obtuvo empleando un surfactante no iónico como agente director de estructura y una fuente de sílice bajo condiciones fuertemente ácidas. Los materiales sintetizados fueron caracterizados mediante difracción de rayos X (XRD), microscopía electrónica de transmisión (TEM), fisisorción de N₂, reducción a temperatura programada (TPR) y espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS), lo que permitió la observación y análisis de las estructuras obtenidas.

Palabras clave: Sílice mesoporosa, Santa Barbara Amorphous-15, Impregnación húmeda incipiente, Análisis estructural

Abstract

In the present work, mesoporous silica SBA-15 (Santa Barbara Amorphous-15) was synthesized. This non-crystalline siliceous material is characterized by a highly ordered mesoporous structure with a possible microporous contribution within its pore walls and a well-defined hexagonal arrangement. Its textural properties, such as uniform pore size and potential hierarchical organization, together with its high hydrothermal and mechanical stability, make it an attractive structured support for catalytic and adsorption applications. In order to impart functionality to the material, Cu and Cu-Ce species in oxide form were incorporated by the incipient wetness impregnation method, using ethanol-dissolved metal precursors and applying successive impregnation steps. SBA-15 was synthesized using a non-ionic surfactant as a structure-directing agent and a silica source under strongly acidic conditions. The resulting materials were characterized by X-ray diffraction (XRD), transmission electron microscopy (TEM), N₂ physisorption, temperature-programmed reduction (TPR), and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), enabling detailed observation and analysis of the obtained structures.

Keywords: Mesoporous silica, Santa Barbara Amorphous-15, Incipient wetness impregnation, Structural analysis

1. Introducción

Los materiales mesoporosos han captado considerable atención en diversas áreas de investigación gracias a sus propiedades texturales intrínsecas, como una elevada área superficial específica, gran volumen de poros y tamaño de poro ajustable [1,2]. Entre ellos, los basados en sílice porosa han recibido un interés creciente por su versatilidad estructural, niveles de cristalinidad variables y la abundancia de silicio [2].

Dentro de esta categoría, la SBA-15 destaca por su morfología controlable y la capacidad de modular sus propiedades texturales, lo que la convierte en un soporte ideal para incorporar fases activas y modular su actividad catalítica [3]. Esta clase de materiales presenta una arquitectura de poro bien definida, una alta relación superficie-volumen y la posibilidad de incorporar heteroátomos en sus paredes, lo que no solo mejora su estabilidad hidrotérmica, sino que también abre nuevas oportunidades en el campo de la química de materiales

[1,4].

Específicamente, la síntesis de SBA-15 implica la disolución de un agente director de estructura no iónico en un medio ácido acuoso, seguida de la adición de una fuente de sílice [5]. Este proceso, realizado bajo agitación, envejecimiento hidrotermal y calcinación posterior, permite formar una estructura mesoporosa ordenada con contribución microporosa opcional, asegurando la modulación precisa de la morfología y el tamaño de poro del material final [6].

La impregnación a humedad incipiente es una de las técnicas más empleadas para incorporar óxidos metálicos en materiales mesoporosos, dada su simplicidad, su capacidad para lograr una alta dispersión de la fase activa en los mesoporos y la preservación de la mesoestructura [7]. La notable estabilidad estructural de la SBA-15, incluso tras la calcinación para eliminar el surfactante y múltiples impregnaciones, garantiza la integridad del soporte durante la preparación del catalizador, lo cual es esencial para una eficiente dispersión metálica y un óptimo desempeño catalítico.

Las numerosas posibilidades de estos materiales para modificar sus estructuras y propiedades los convierten en candidatos ideales para aplicaciones como la liberación controlada de fármacos, adsorción de gases contaminantes, soportes catalíticos en reacciones de oxidación preferencial y remediación ambiental [8].

2. Parte experimental

2.1 Materiales

La síntesis de la SBA-15 se realizó utilizando tetraetilortosilicato (TEOS) como fuente de silicio y Pluronic P123 como agente director de estructura, en una relación molar $\text{TEOS:H}_2\text{O:HCl:P123}$ de 1.0:194.0:5.9:0.01. Inicialmente, se disolvió el surfactante en la solución acuosa ácida; a continuación, se incorporó el TEOS y la mezcla se agitó a 45 °C durante 7.5 horas para promover la hidrólisis y precondensación. Posteriormente, se aplicó un tratamiento hidrotermal a 80 °C durante 15.5 horas para completar la condensación. Finalmente, el sólido obtenido se filtró, lavó, secó y calcinó en mufla a 550 °C durante 6 horas para eliminar el surfactante.

Los materiales con CuO y CuO-CeO₂ se prepararon mediante impregnación a humedad incipiente, una técnica ampliamente empleada por su simplicidad y capacidad para lograr alta dispersión de la fase activa preservando la mesoestructura [7], sobre la SBA-15 sintetizada. Se utilizaron soluciones de nitrato de cobre trihidratado ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) y nitrato de cerio hexahidratado ($\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) disueltas en etanol, en cantidades calculadas para obtener un 10 % en peso de Cu y Ce, respectivamente. Las impregnaciones se realizaron de manera sucesiva, incorporando los nitratos

por separado para optimizar la distribución de las especies metálicas. Todos los materiales se calcinaron en flujo de aire a 450 °C, temperatura que asegura la descomposición completa de las sales precursoras y la formación de óxidos bien dispersos [5]. Las muestras se denominan Cu-SBA-15 y CuCe-SBA-15.

2.2 Métodos

Las muestras se caracterizaron mediante un conjunto de técnicas analíticas como difracción de rayos X, fisisorción de N₂, reducción a temperatura programada, espectroscopia fotoelectrónica de rayos X y microscopía electrónica de transmisión (TEM/STEM), ampliamente empleadas para evaluar la estructura mesoporosa, propiedades texturales, reducibilidad, composición superficial y morfología de materiales tipo SBA-15 [1-3,5].

La Difracción de Rayos X (XRD) se realizó utilizando un difractómetro PANalytical X'Pert PRO operado a 40 kV y 40 mA, empleando radiación Cu-K α ($\lambda=1.54060\text{\AA}$), con una velocidad de escaneo de 0.005°/min para los difractogramas a bajo ángulo (evaluación del orden mesoporoso) y de 2°/min para el análisis a alto ángulo (identificación de fases cristalinas).

El área superficial, volumen de poro y distribución de tamaños de poro se determinaron mediante fisisorción de N₂ a -196 °C en un equipo TriStar II 3020 de Micromeritics. Las muestras se pretrataron en vacío a 200 °C durante 8 h. Las áreas superficiales se calcularon por el método BET y los diámetros de poro por el método BJH aplicado a las ramas de adsorción de las isotermas.

Los perfiles de reducción a temperatura programada (TPR) se obtuvieron en un equipo Autochem II 2920 de Micromeritics, empleando ~50 mg de muestra y una mezcla 5% H₂/Ar (50 mL/min). Las muestras se pretrataron a 150 °C por 30 min en flujo de N₂ para eliminar impurezas superficiales, y luego se calentaron de temperatura ambiente a 1,000 °C con una rampa de 10 °C/min.

Los espectros de Espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS) fueron adquiridos en un espectrómetro Axis Ultra DLD con fuente de rayos X monocromática Al K α de 1486.6 eV. Las energías de enlace se calibraron respecto al pico de referencia Si 2p (103.1 eV), bajo presión de cámara de 10⁻⁹ torr.

Los análisis por Microscopía Electrónica de transmisión (TEM) se llevaron a cabo en un microscopio FEI Tecnai T20 operado a 200 kV, mientras que los estudios STEM se realizaron en un FEI Tecnai F30 a 300 kV, permitiendo visualizar la estructura porosa.

3. Resultados y discusión

Los difractogramas a bajo ángulo se presentan en la Figura 1. Se observa que el XRD de la SBA-15 pura exhiben picos característicos y que reflejan su estructura mesoporosa hexagonal ordenada (p6mm), con poros unidimensionales de diámetros en el orden de los nanómetros, ya que este material presenta sílice amorfa sin ordenamiento cristalino a largo rango [1,2].

La disminución observada en la intensidad de estos picos en las muestras impregnadas con CuO y CuO-CeO₂ se debe a la presencia de material óxido dentro de los mesoporos, lo que reduce el contraste de dispersión electrónico [7].

Las incorporaciones sucesivas de Cu y CuCe por impregnación húmeda incipiente no alteran el ordenamiento estructural de la SBA-15, preservando su mesoestructura, aunque la presencia de ambos óxidos provoca una disminución más pronunciada de la intensidad, consistente con una mayor ocupación porosa [5].

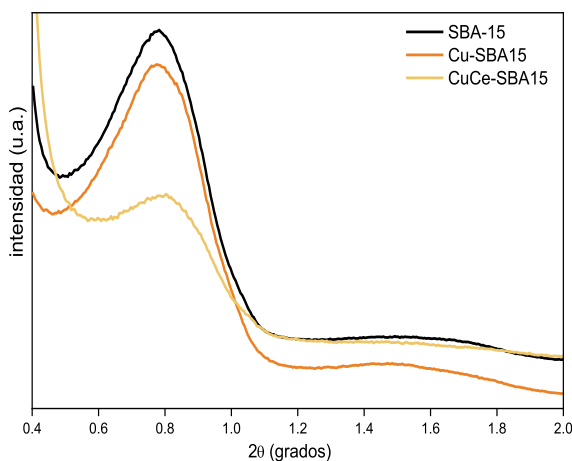


Figura 1. Patrones de difracción de Rayos-X a bajo ángulo.

Los difractogramas de ángulo amplio, entre 10° y 70°, de las tres muestras se presentan en la Figura 2. En todos los casos, se observa un pico ancho centrado alrededor de los 25°, característico de la sílice amorfa sin ordenamiento cristalino a largo rango [2].

En la muestra Cu-SBA-15 se aprecia la fase cristalina del óxido de cobre, identificada mediante la comparación con la carta cristalográfica del International Centre for Diffraction Data número 01-080-1916. Por su parte, los difractogramas de la muestra CuCe-SBA-15 exhiben, además de los picos principales del CuO (ICDD 01-080-1916), los picos correspondientes al óxido de cerio (CeO₂) según la carta ICDD 00-004-0593.

Esta identificación confirma la exitosa incorporación y cristalización de las fases activas mediante impregnación a humedad incipiente, preservando la integridad estructural del soporte mesoporoso [5,7].

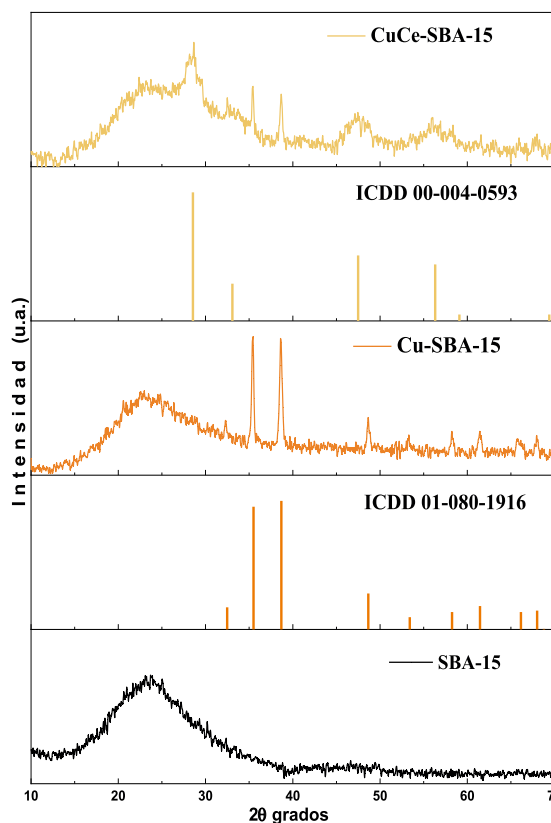


Figura 2. Patrones de difracción de Rayos-X de ángulo amplio.

Los tamaños promedio de los cristalitas de las muestras, presentados en la Tabla 1, se determinaron mediante la ecuación de Scherrer aplicada a los picos característicos de CuO y CeO₂ utilizando el software X'Pert HighScore Plus.

Tabla 1. Tamaño de los cristales de las muestras impregnadas

Muestra	Tamaño de cristal [nm]
Cu-SBA-15	41.36
CuCe-SBA-15	44.62

Estos valores revelan un ligero aumento en el tamaño de cristalito en la muestra bimetalítica, sugiriendo que la co-impregnación sucesiva de cerio junto con cobre favorece el crecimiento de los nanocristalitos de óxido, posiblemente por interacciones sinérgicas entre CuO y CeO₂ que estabilizan partículas más grandes [5]. Esta modificación no compromete la estructura mesoporosa del SBA-15, como se corrobora por la presencia de picos bien definidos y característicos a bajo ángulo en los difractogramas XRD, incluso tras la impregnación [5,7,9].

En la Tabla 2 se detallan las propiedades texturales de los materiales preparados obtenidas por Fisisorción de N₂. Los resultados revelan una disminución progresiva del área superficial y del volumen de poro, atribuible a la

ocupación parcial de los mesoporos por las nanopartículas de CuO y CeO₂, lo que provoca un bloqueo efectivo de la superficie accesible sin colapsar la estructura [1,5,9]. Los diámetros de poro muestran variaciones menores (6.0 nm para SBA-15, 6.2 nm para Cu-SBA-15 y 5.1 nm para CuCe-SBA-15), confirmando la preservación de la mesoestructura hexagonal ordenada típica de SBA-15 tras la impregnación. Esta tendencia se alinea con investigaciones previas sobre la incorporación de óxidos metálicos en matrices SBA-15, donde se observa una reducción similar en propiedades texturales que mantiene la integridad mesoporosa y favorece aplicaciones catalíticas.

Lo anterior es consistente con estudios previos sobre catalizadores de CuO-CeO₂ soportados en SBA-15 que han reportado una disminución en el área superficial y el volumen de poro tras la incorporación de la fase activa, sin daño significativo a la estructura mesoporosa. [10] Adicionalmente, los diámetros de poro consistentes indican la dispersión exitosa de nanopartículas de óxidos dentro de las cavidades mesoporosas, previniendo aglomerados grandes y manteniendo la arquitectura mesoporosa ordenada.

Tabla 2. Propiedades texturales.

Muestra	Área BET (m ² /g)	Volumen de poro (cm ³ /g)	Diámetro de poro (nm)
SBA-15	560	0.70	6.0
Cu-SBA-15	407	0.58	6.2
CuCe-SBA-15	345	0.48	5.1

Los perfiles de TPR de las muestras Cu-SBA-15 y CuCe-SBA-15 se muestran en la Figura 3.

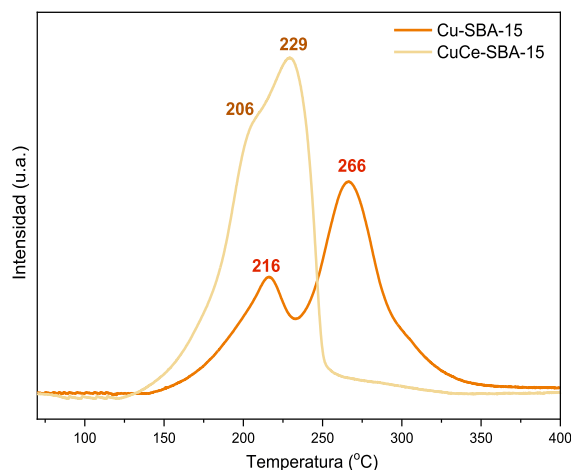


Figura 3. Perfiles TPR de las muestras Cu-SBA-15 y CuCe-SBA-15

El perfil de reducción de Cu-SBA-15 presenta dos picos bien definidos a 216 °C y 266 °C, asociados a especies de CuO altamente dispersas con fuerte interacción con el soporte mesoporoso y a CuO en forma más bulk o con menor interacción, respectivamente [5,7].

En contraste, la muestra CuCe-SBA-15 exhibe picos desplazados a temperaturas inferiores, 206 °C y 229 °C, lo que evidencia una reducibilidad mejorada del cobre gracias a la incorporación de CeO₂, que favorece interacciones sinérgicas y mayor movilidad de oxígeno superficial [5,9].

Es conocido que el CeO₂ presenta reducción superficial a bajas temperaturas con mínima contribución en este rango, confirmando que la modificación bimetalica optimiza la activación redox del sistema CuO/SBA-15 sin alterar su estructura [5,10]. Esta mejora en la reducibilidad se atribuye a la capacidad redox del CeO₂, que facilita la transferencia de oxígeno entre el óxido de cobre y el soporte [10].

Los espectros de Espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS) se detallan en la Tabla 3:

Tabla 2 – Resultados XPS. Energías de enlace y relación atómica.

Muestra	Energía de enlace, (fwhm) eV*		Relación atómica Cu/Si
	Cu 2p _{3/2}	Satélite	
Cu-SBA-15	933.7(2.0) 60%	943.6 (6.3)	0.12
	932.7 (1.8)		
CuCe-SBA-15	933.8 (2,3) 75%	943.4 (5.8)	0.14
	932.9 (1.8)		

*Referencia interna Si 2p=103.1 eV

Por esta técnica se confirma la presencia de especies de cobre y cerio en las superficies de las muestras. En la región del Cu 2p_{3/2}, se deconvolucionan dos componentes principales: para Cu-SBA-15, picos a 933.7 eV (CuO, 60%) y 932.7 eV (Cu₂O), atribuibles a especies de Cu²⁺ con fuerte interacción con el soporte y Cu⁺/Cu²⁺ reducidas, respectivamente [5]. En CuCe-SBA-15, los valores son 933.8 eV (CuO, 75%) y 932.9 eV (Cu₂O), con una proporción mayor de CuO, lo que sugiere una estabilización del estado de oxidación +2 por interacciones sinérgicas con CeO₂[10].

La presencia de CeO₂ se evidencia por el pico satélite del Ce 3d a 943.4 eV en la muestra bimetalica (versus 943.6 eV en Cu-SBA-15, posiblemente un artefacto menor), característico de Ce⁴⁺ con alta capacidad redox.

Además, la relación atómica Cu/Si aumenta de 0.12 en Cu-SBA-15 a 0.14 en CuCe-SBA-15, indicando una mayor exposición superficial de Cu pese a la adición de Ce, atribuible a una dispersión mejorada y prevención de aglomeración por el efecto promotor del CeO₂ [5,9].

Estos hallazgos fortalecen la hipótesis de optimización catalítica en el sistema bimetalico, correlacionándose con la reducibilidad mejorada observada en TPR y la preservación mesoporosa, al incrementar sitios activos accesibles para reacciones redox [5,10] y es consistente con la literatura que describe cómo las interacciones CuO-CeO₂ resultan en una mayor proporción de Cu⁺ y una dispersión mejorada del cobre, lo cual es crucial para la actividad catalítica [11].

Las micrografías TEM del material SBA-15 sintetizado, presentadas en la Figura 4, revelan un

ordenamiento hexagonal bien definido y la unidimensionalidad de los poros característicos de este material mesoporoso [3,5,9]. Los valores obtenidos de diámetro de poro (6.3 nm) y espesor de pared (4.3 nm) son consistentes con las mediciones por fisorción de nitrógeno y con reportes literarios para SBA-15, confirmando la preservación de su mesoestructura ordenada típica de 2-10 nm de diámetro poroso [1,5,10].

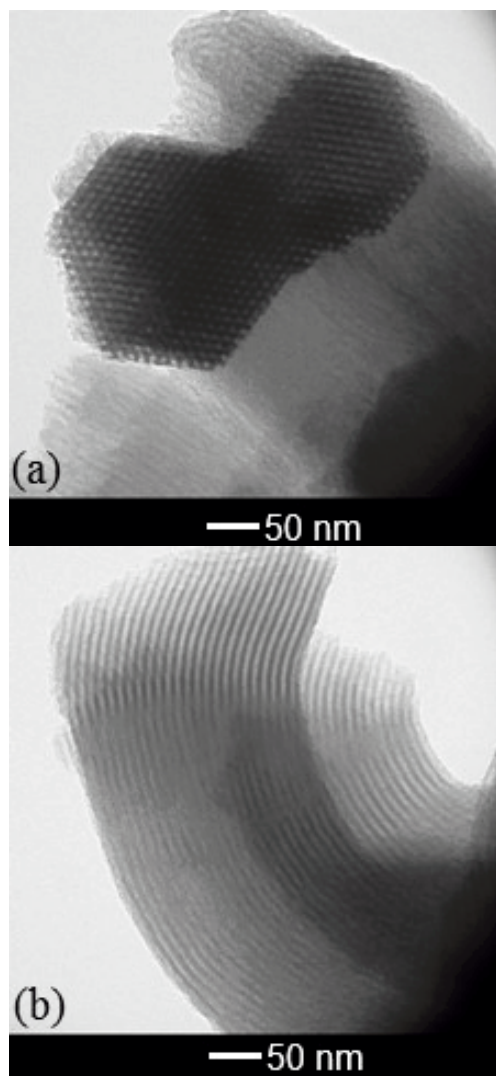


Figura 4. Imágenes TEM de SBA-15 sintetizada. (a) estructura hexagonal; (b) canales paralelos unidireccionales.

En la Figura 5 se muestran las micrografías STEM del material Cu-SBA-15, donde se distinguen claramente nanopartículas de CuO de tamaño inferior a 50 nm, distribuidas de manera homogénea dentro y sobre la estructura mesoporosa, confirmando su anclaje efectivo sin obstruir los canales porosos [5,10]. Esta dispersión uniforme y la preservación de la arquitectura hexagonal ordenada de SBA-15, con poros de 2-10 nm, se alinean con reportes literarios sobre la impregnación de óxidos metálicos que mantienen la integridad mesoporosa y

favorecen la accesibilidad a aplicaciones catalíticas [3,5,9].

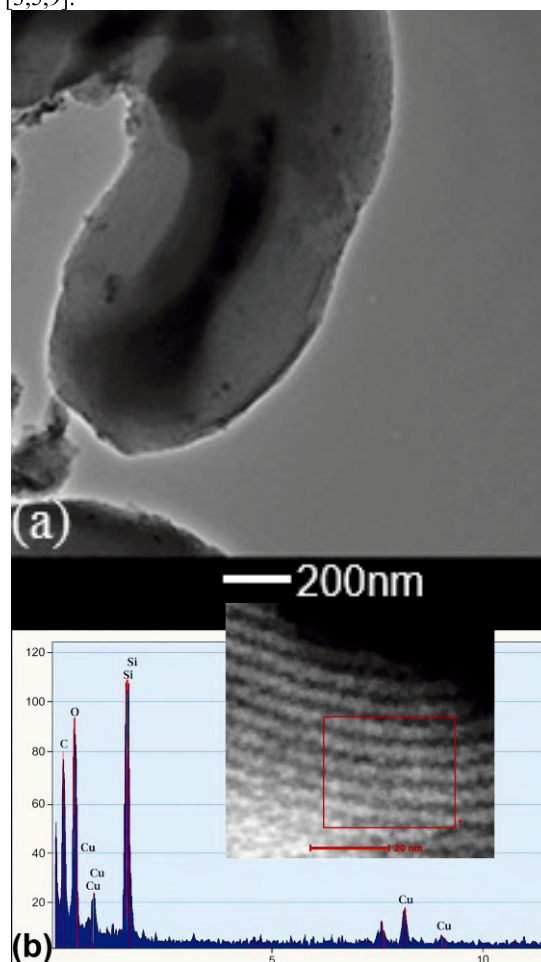


Figura 5. Imágenes de Cu-SBA-15. (a) TEM; (b) STEM.

Las micrografías obtenidas mediante la caracterización por Microscopía Electrónica de Transmisión de la muestra CuCe-SBA-15 se presentan en la Figura 6.

En ellas se aprecia que, del mismo modo, en la muestra CuCe-SBA-15, la incorporación sucesiva de óxidos de cerio y cobre no genera cambios estructurales significativos, preservando la arquitectura mesoporosa ordenada de SBA-15 con poros de 2-10 nm [5,10].

Las micrografías STEM revelan una fuerte interacción entre ambos óxidos, pese a la impregnación en dos pasos, con nanopartículas de ~40 nm distribuidas homogéneamente dentro de los mesoporos (diámetro <10 nm), sin obstrucción de canales ni aglomeración, consistente con reportes literarios sobre sistemas CuO-CeO₂/SBA-15 [3,10,11].

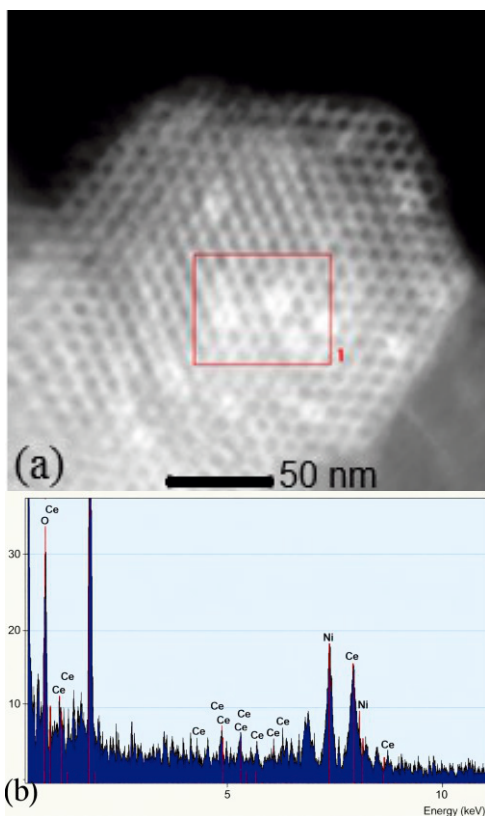


Figura 6. Imágenes de CuCe-SBA-15. (a) TEM; (b) STEM.

4. Conclusiones

En este trabajo se sintetizaron exitosamente los materiales mesoporosos SBA-15, Cu-SBA-15 y CuCe-SBA-15 mediante impregnación controlada, preservando la estructura hexagonal ordenada con poros de 2-10 nm, así como altos valores de área superficial y volumen poroso. La incorporación de CeO_2 promovió una reducibilidad mejorada del CuO , una mayor exposición superficial de Cu y la estabilización de Cu^{2+} mediante interacciones sinérgicas, lo que confirma nanopartículas homogéneamente dispersas sin obstruir los canales porosos, según XPS y TEM. Estos avances optimizan el sistema bimetalico para aplicaciones catalíticas como la oxidación de CO y la reducción de NO por CO , gracias a la mejorada reducibilidad del CuO , mayor dispersión de nanopartículas y preservación de la estructura mesoporosa de SBA-15, que incrementan la accesibilidad de sitios activos y la movilidad de oxígeno superficial.

5. Agradecimientos

A SECIHTI por la beca posdoctoral Estancias Posdoctorales por México Modalidad Académica Convocatoria 2022(1) otorgada a María de Jesús

Martínez-Carreón con CVU 200939 y Raquel Murillo-Ortiz con CVU 240837.

Al Laboratorio de Nanociencias y Nanotecnología de la FCFM-UANL por las mediciones de caracterización.

6. Referencias

- Colmenares-Zerpa, J.; Chimentão, R.J.; Gispert - Guirado, F.; Peixoto, A.F.; Llorca, J. Preparation of SBA-15 and Zr-SBA-15 Materials by Direct-Synthesis and pH-Adjustment Methods. *Materials Letters* 2021, 301, 130326, <http://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130326>
- Kupfer, V.L.; Maniezzo, R. dos S.; Lima, H.H.C. de; Guilherme, M.R.; Moisés, M.P.; Rinaldi, A.W. Highly Ordered SBA-16 with Low Nickel Amount for Enhanced Adsorption of Methylene Blue. *Journal of environmental chemical engineering* 2018, 6, 3898, <http://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.005>
- Silva, F.E. da; Rigoti, E.; Mello, M.I.S. de; Pergher, S.B.C. Tuning Textural Properties by Changing the Morphology of SBA-15 Mesoporous Materials. *Materials* 2024, 17, 2827, <http://doi.org/10.3390/ma17122827>
- Gajardo, J.; Colmenares-Zerpa, J.; Peixoto, A.F.; Silva, D.S.A.; Silva, J.A.; Gispert - Guirado, F.; Llorca, J.; Urquieta - González, E.A.; Santos, J.B.O.; Szanyi, J.; et al. Revealing the Effects of High Al Loading Incorporation in the SBA-15 Silica Mesoporous Material. *Journal of Porous Materials* 2023, 30, 1687, <http://doi.org/10.1007/s10934-023-01453-z>
- Silva, F.C.M.; Costa, M.J. dos S.; Silva, L.K.R. da; Batista, A.M.; Luz, G.E. Functionalization Methods of SBA-15 Mesoporous Molecular Sieve: A Brief Overview. *SN Applied Sciences* 2019, 1, <http://doi.org/10.1007/s42452-019-0677-z>
- Mou, C.; Lin, H. Control of Morphology in Synthesizing Mesoporous Silica. *Pure and Applied Chemistry* 2000, 72, 137, <http://doi.org/10.1351/pac200072010137>
- Charmot, A. New Synthesis Strategies of Iron Oxide Nanoparticles into Organized Mesostructures, Characterization and Catalytic Activity. HAL (Le Centre pour la Communication Scientifique Directe) 2006.
- Cruz, M.I.A.; López-Marín, L.M. Sílices Mesoporosas: Del Mundo Inorgánico a La Entrega de Fármacos. *Mundo Nano Revista Interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotecnología* 2025, 18, <http://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2025.35.69856>
- Bacariza, C.; Graça, I.; Bebiano, S.S.; Lopes, J.M.; Henriques, C. Micro- and Mesoporous Supports for CO_2 Methanation Catalysts: A Comparison between SBA-15, MCM-41 and USY Zeolite. *Chemical Engineering Science* 2017, 175, 72, <http://doi.org/10.1016/j.ces.2017.09.027>
- Ma, K.; Zhang, H.; Tang, C.; Dong, L. One-Pot Synthesis of CeO_2 Modified SBA-15 With No Pore Clogging for NO

Reduction by CO. *Frontiers in Environmental Chemistry* 2021, 2, <http://doi.org/10.3389/fenvc.2021.670431>

11. Shen, W.; Mao, D.; Luo, Z.; Yu, J. CO Oxidation on Mesoporous SBA-15 Supported CuO–CeO₂ Catalyst Prepared by a Surfactant-Assisted Impregnation Method. *RSC Advances* 2017, 7, 27689, <http://doi.org/10.1039/c7ra02966g>