

Producción de Hidrógeno por reformado de bio-etanol utilizando un catalizador de Ni-Co/Al₂O₃-SiO₂

Iván Ramos Martínez ¹, José Luis Contreras L. ^{1,*}, Jennipher Pérez ¹, Beatriz Zeifert ², Ricardo López Medina ¹ y José Salmones ²

¹ Laboratorio del Área de Procesos de la Industria Química, Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Ciudad de México, México

² ESIQIE. Instituto Politécnico Nacional, U.P. López Mateos Zacatenco, México City C.P. 07738, México;

* Autor de correspondencia: jlcl@azc.uam.mx; Tel.: +52-55591911047

Artículo de divulgación científica

Recibido: 11 de junio de 2025

Aceptado: 14 de agosto de 2025

Publicado: 28 de octubre de 2025

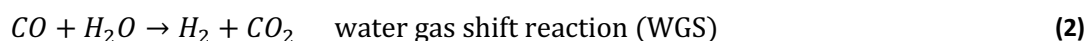
DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.497>

Resumen: Se investigó la producción de H₂ por reformado de etanol con vapor de agua en un reactor catalítico de lecho fijo integral (30 g, d_{partícula} = 1/8 pulg), utilizando un catalizador de Ni-Co/Al₂O₃-SiO₂, se usó una relación molar 4/1: moles H₂O/mol etanol. Se encontró que la conversión a 480°C fue cercana a 90% mientras que la selectividad de H₂ fue de 81%, la de CO₂ fue de 6% y la del CH₄ fue de 12% respectivamente y no se observó CO. Las técnicas de caracterización del catalizador incluyeron: resistencia mecánica, área y textura BET, adsorción de agua, microscopía electrónica de barrido (MEB, EDS), análisis térmico gravimétrico (TGA) y acidez por espectroscopia infrarrojo de piridina adsorbida. Las esferas mostraron alta resistencia a la compresión y se observó que a medida que aumenta el contenido de silicio, tanto el área superficial como la resistencia mecánica aumentaban.

Palabras clave: Hidrógeno; Ni-Co/Al₂O₃-SiO₂; alta resistencia; reformado; bioetanol.

Introducción

El bioetanol tiene varias ventajas como combustible y puede almacenarse más fácilmente y sin riesgo significativo de manipulación y puede obtenerse en grandes cantidades a partir de la biomasa (Cortright, et al., 2022; Jordi Llorca, et al., 2002). Para producir H₂ por reformado de etanol con vapor de agua (ESR) a altas temperaturas, se requiere que los catalizadores deben mostrar una alta estabilidad térmica y mecánica, además deben mostrar una alta selectividad hacia la producción de H₂. Las tres reacciones más importantes de entre 14 (Rosas M.D., et al., 2024) que se pueden llevar a cabo son:



La reacción de reformado de etanol con agua (reacción 1) se favorece a altas temperaturas. Varios estudios termodinámicos han demostrado que a temperaturas mayores de 350°C la conversión del etanol es completa [Contreras, et al., 2014] además a temperaturas de 650°C solo se obtienen como productos: H₂, CO, CO₂, CH₄ y H₂O. Se ha observado que al aumentar la relación H₂O/etanol a valores mayores de 3 es recomendable. Así mismo es conveniente presiones bajas, cercanas a 1 atm. La reacción de WGS (reacción 2) es importante tanto en el reformado de etanol como en el de glicerol.

Varios estudios han demostrado que los metales nobles soportados tales como: Ir, Pt, Pd, Ru o Rh (Contreras et al., 2008; Barroso et al., 2006) o metales de bajo costo como Co (Jordi Llorca, et al., 2002; Sing et al., 1985; Gelb, et al., 1999). Ni (Lowell, et al., 2004) o materiales bimetalicos (M del Arco et al., 2004; Basile, et al., 2000) son buenas opciones para catalizar la reacción de reformado de etanol (ESR). De este modo, soportes tales como: MgO, ZnO, SiO₂, Al₂O₃, La₂O₃ o CeO₂, entre otros, son los más comúnmente utilizados para soportar dichos metales activos (Contreras et al., 2014).

En este estudio, se prepararon catalizadores bimetalicos de Ni, Co soportados en un soporte conformado por Al₂O₃-SiO₂ en forma de esferas y luego se evaluaron en la reacción de reformado de etanol con vapor de agua (ESR) en un reactor catalítico de lecho fijo integral.

Desarrollo

Síntesis de catalizadores

Para la síntesis de los catalizadores, se prepararon dos geles de aluminio (Bohemita: $AlO(OH)$) y de silicio (ácido metasilícico: H_2SiO_3) como precursores del soporte del catalizador, ver Tabla 1. En un estudio previo (Pérez Cabrera J. y Contreras J.L., 2021) estudiaron el efecto de la adición de SiO_2 a la Al_2O_3 sobre la resistencia mecánica de esferas. El gel de bohemita se preparó por precipitación de $Al_2(SO_4)_3$ (SAISA) con NH_4OH (J.T. Baker) en agua a $58^\circ C$ a un pH de 8-9 y se dejó en reposo durante 72 h. Después de varios lavados se neutralizó a pH de 7. Por otra parte, se preparó el gel de silicio o ácido metasilícico a partir de la precipitación de Na_2SiO_3 con HCl concentrado (30%p) (J.T. Baker) a un pH de 2.5 y se dejó reposar el gel durante 48 h.

Una vez que se tuvieron los dos geles, se mezclaron en un agitador mecánico orbital sencillo en proporciones definidas en peso (Tabla 1) y se nombraron como sigue: M0 fue el gel de bohemita $AlO(OH)$ equivalente al 100% de Al_2O_3 , M1: 5% SiO_2 + 95% Al_2O_3 , M2: 10% SiO_2 + 90% Al_2O_3 , M3: 15% SiO_2 + 85% Al_2O_3 , M4: 20% SiO_2 + 80% Al_2O_3 , M5: 25% SiO_2 + 75% Al_2O_3 y M6 fue el gel con 100% de H_2SiO_3 .

Cada mezcla de geles se mantuvo en agitación orbital durante 1 hora a 120 rpm a $25^\circ C$. Para las muestras M0 y M6 solo se pesó la cantidad requerida de gel de bohemita y de ácido metasilícico. Las mezclas de geles se les dieron forma esférica colocando cantidades definidas de material colocando 500 g de geles más 50 g de almidón más 5 g de solución acuosa con HNO_3 al 2% y en un granulador tipo tambor mecánico rotatorio de 30.5 cm de diámetro por 101 cm de largo con una velocidad de rotación de 42 rpm, con calentamiento a fuego directo, quemando gas LP por la parte inferior con una temperatura promedio externa de $110^\circ C$ e interior de $62-72^\circ C$ para obtener esferas de 1/8 de pulgada. Una vez formadas las esferas se extrajeron y se secaron a $110^\circ C$ en una estufa durante 48 h y posteriormente fueron calcinadas en una mufla hasta alcanzar $600^\circ C$ durante 2 h, con el fin de aumentar la resistencia mecánica, el área específica y llevar a cabo la transformación térmica de geles a la formación de los óxidos de Al y de Si, como se muestra en las siguientes reacciones:



Preparación del Catalizador

El catalizador de Ni-Co soportado se preparó utilizando la mejor esfera en términos de la resistencia mecánica y sus propiedades de textura (M5: 25% SiO_2 + 75% Al_2O_3). Una vez seleccionado el mejor soporte, se le impregnaron las soluciones de $Ni(NO_3)_2$ y de $Co(NO_3)_2$ (SAISA, Mexico) en agua en cantidades tales para obtener un 10% peso de Ni y un 4.5% de Co (Contreras, et al. 2014). Las muestras se secaron a $110^\circ C$ por 24 h y se calcinaron a $500^\circ C$ por 2 h., finalmente fueron reducidas en flujo de H_2 (20ml/min) hasta $500^\circ C$ por 2 h.

Caracterización de materiales

La resistencia a la ruptura de las esferas preparadas fue evaluada en una máquina para medir la compresión a la ruptura UNITED Modelo SSTM-1. La cual posee una celda de carga de 10 kN. La velocidad de carga fue de 0.02 in/min. Las isothermas de adsorción de agua de las esferas, se llevaron a cabo en un equipo volumétrico de vidrio a diferentes presiones parciales de vapor de agua.

La acidez superficial, se efectuó por espectroscopia infrarrojo (IR) de Piridina adsorbida usando un equipo FTIR Nicolet Model 170-SX. El estudio térmico (TGA) se realizó en un equipo SDT Q600 V20.9 Build 20, con flujo de 10.0 ml/min con un intervalo de temperaturas desde $25^\circ C$ hasta $1000^\circ C$.

Los sólidos obtenidos se caracterizaron por difracción de rayos X (XRD) en un instrumento Phillips X'Pert. La fisiorción de N_2 a 77 K se realizó en un instrumento Micromeritics 2000. Cada muestra se pre trató a $200^\circ C$ bajo vacío (1×10^{-4} torr) durante 1 h. Las muestras se analizaron por microscopía electrónica de barrido (SEM) usando un microscopio Jeol

modelo JFM 6701 F de alta resolución, utilizando electrones secundarios. El análisis químico se obtuvo mediante el acoplamiento de una sonda SEM y EDS (espectroscopia de dispersión de energía de rayos X).

Evaluación del Catalizador

La reacción catalítica se realizó en un reactor de lecho fijo de acero inoxidable de $\frac{3}{4}$ pulg por 30 cm de longitud compuesto de 5 puertos de muestreo tanto de composición como de temperatura. La mezcla gaseosa de alimentación estuvo compuesta de vapores de H_2O y CH_3CH_2OH (relación molar de 4/1) en presencia de un flujo de N_2 . La temperatura del reactor se controló entre 450 y 550°C. El análisis de los reactivos y todos los productos de reacción se llevó a cabo en línea por cromatografía de gases (cromatógrafo Gow Mac 550) usando una columna de sílica gel malla 60/80 (18'x 1/8") con un detector de conductividad térmica (Gow-Mac). Se identificaron los productos: H_2 , CO , CO_2 y CH_4 . Para el análisis del etanol, acetaldehído y etileno se utilizó un cromatógrafo de gases (Varian 3380) con un detector tipo FID con una columna capilar Varian, VF-1ms, (15 m, 0.25 mm, 0.25 μm).

Resultados y discusión

Se encontró un tipo de isoterma de adsorción de N_2 que corresponde al tipo IV (Figura 1) donde se observa un ciclo de histéresis y que corresponde a materiales mesoporosos (2 a 500 Å), En este caso se forma a baja presión una mono-multicapa de N_2 hasta un punto en que la capa adsorbida llega a un valor de espesor crítico en el cual ocurre la condensación capilar (ciclo de histéresis).

El tipo de ciclo de histéresis de estas muestras, corresponde al H2(a) formado por el comportamiento del fluido en el interior de los poros, en específico por los estados meta-estables asociados con la adsorción, así como por el efecto denominado bloqueo de poros con la existencia de redes de poros interconectados donde se observa un punto de percolación en el cual todo el N_2 adsorbido logra desorberse (caída súbita en la rama de desorción).

La adición de la SiO_2 a la Al_2O_3 produce un aumento en el volumen de poro, como se puede observar comparativamente en la Figura 1 cuando vamos de la muestra M0 a la M5.

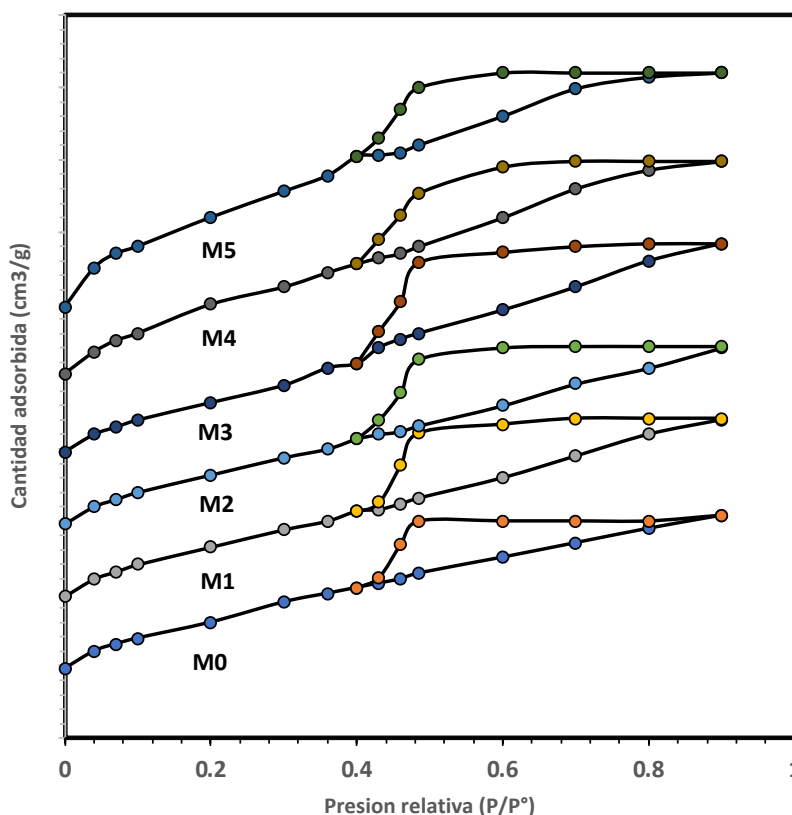


Figura 1. Isotermas de adsorción de N_2 de las muestras M0 a M5.

En la Tabla 1 se observa un aumento del área BET de las muestras conforme aumenta la concentración de SiO₂, lo cual es debido a que la SiO₂ tiene la mayor área. No se observó un cambio notable en el diámetro de poro. Sin embargo, podemos observar que si hay un cambio tanto en el diámetro como en el volumen de poro y su comportamiento es opuesto. En la Tabla 1, se observa que al aumentar la concentración de SiO₂ hay un ligero aumento de diámetro de poro de 32 a 36 Å y se mantiene hasta el 20% SiO₂ para caer en 25% SiO₂. Como podrá deducirse la adición de SiO₂ estará disminuyendo el diámetro de poro del sólido ya que cuando se llega al 100% de SiO₂ tenemos un diámetro de poro de 20 Å. Por otra parte, en el caso del volumen de poro, se observa un pequeño aumento de 0.24 cm³/g hasta 0.33 cm³/g cuando aumenta la concentración de SiO₂, hasta 25% de SiO₂. Sin embargo, se observa una disminución del volumen de poro cuando aumenta la concentración del SiO₂ hasta 100%.

Tabla 1. Composición de las muestras, así como el área BET y textura de las muestras.

Muestra	SiO ₂ % (óxido)	H ₂ SiO ₃ % (Gel)	Al ₂ O ₃ % (óxido)	AlO(OH) % (Gel)	Área (m ² /g)	Vp (cm ³ /g)	Dp (Å)
M0	0	0	100	117.6	298	0.24	32
M1	5	6.6	95	111.7	286	0.26	36
M2	10	13.2	90	105.8	302	0.27	36
M3	15	19.8	85	99.9	327	0.29	36
M4	20	26.44	80	94.1	358	0.31	35
M5	25	33.0	75	88.2	404	0.33	32
M6	100	132.2	0	0	522	0.26	20

Por difracción de rayos-X (Figura 2) se pueden observar las reflexiones característica tanto de la gamma Al₂O₃ (muestra M0, carta: JCPDS-029-0063n) como de SiO₂ (muestra M6, carta: JCPDS-029-0085). Conforme aumenta la concentración de Al₂O₃ sus reflexiones (66.5°, 46°, 39.6°, 37.9°) van aumentando mientras que disminuye la reflexión en 22.2° de la SiO₂.

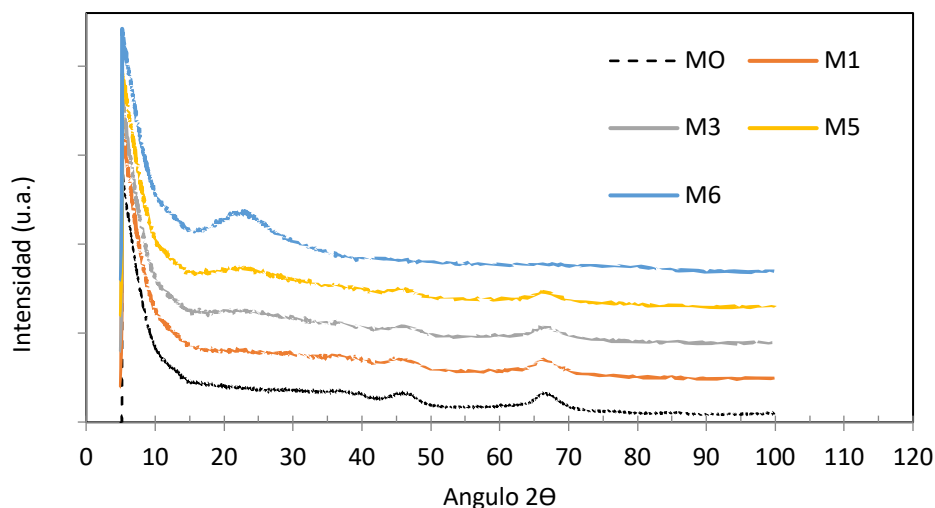


Figura 2. Difracción de rayos-X de las mezclas de Al₂O₃-SiO₂

Las isoterma de adsorción de agua mostraron una isoterma tipo Langmuir simple que al aumentar el contenido de SiO₂ la capacidad de adsorción de agua a 1000 min (16.66 h y 25°C) aumenta, siguiendo el siguiente orden: M6 > M5 > M4 > M2 > M1 > M3 > M0 > Al₂O₃ comercial. La muestra conteniendo 25% de SiO₂ y 75% de alúmina, (muestra M5) mostro tener la mayor capacidad de adsorción de agua de 0.43 g de H₂O/g de sólido.

Por microscopía electrónica de barrido (SEM) se obtuvieron las muestras de la Figura 3(a-e). Desde la muestra M0 a la muestra M5 se observan partículas con morfologías de diferentes tamaños y aglomerados que conforme aumenta la

cantidad de SiO₂ disminuyen los espacios entre las multicapas. En el caso de la muestra M6 (Figura 3(f)) la micrografía muestra una superficie con rugosidad en la que no se observan multicapas.

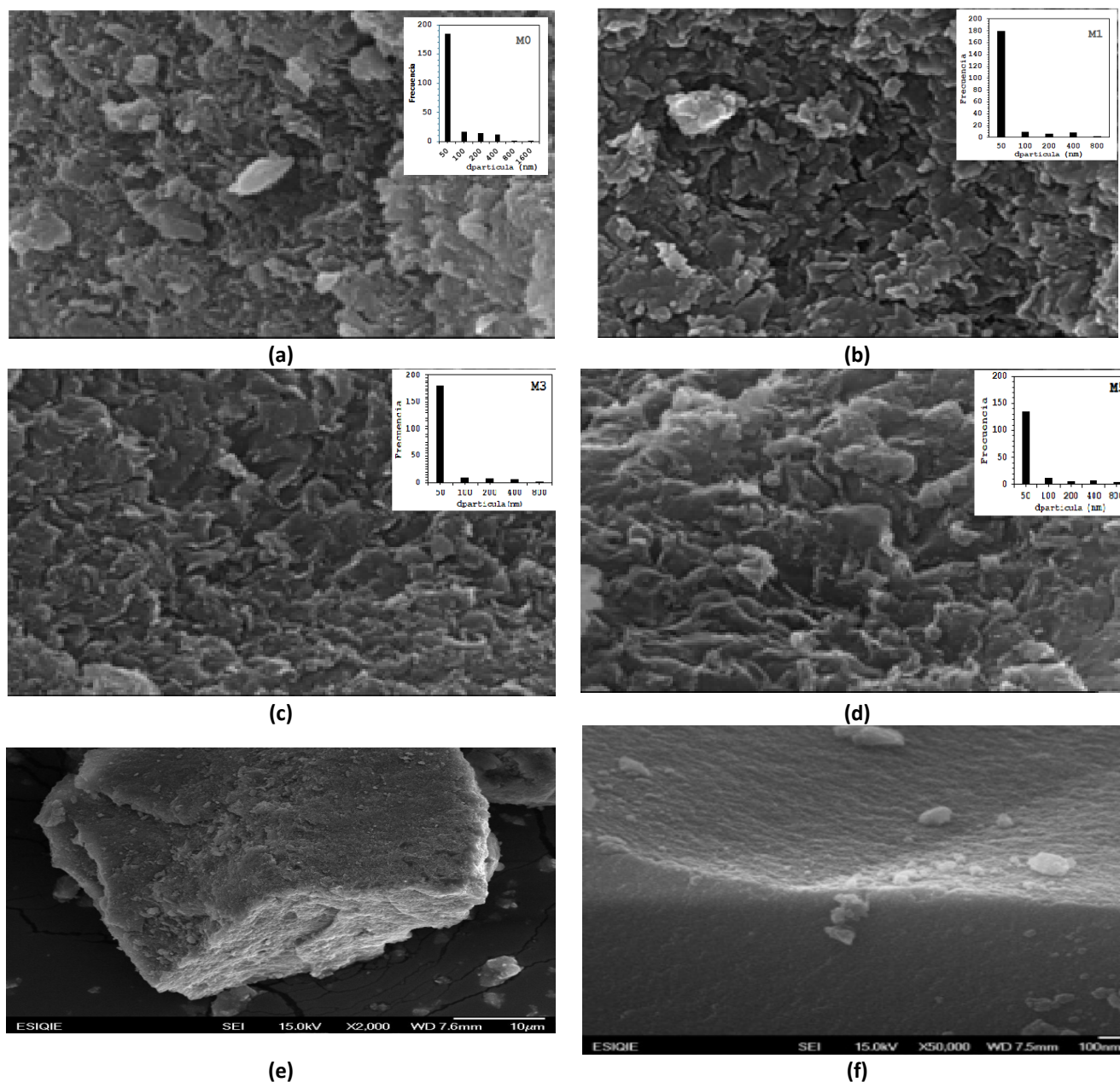


Figura 3. Microscopía electrónica de barrido (SEM) de las muestras de Al₂O₃-SiO₂ (a) es muestra M0, (b) M1, (c) M3, (d) M5 y (e) M6.

El tamaño (o diámetro) de partícula en cada micrografía, es preponderantemente de 50 nm mientras que los demás tamaños (100 a 800 nm) se encuentran en menor proporción (Figura 3(a) - (e)). Se observa que las muestras M0, M1 y M3 tienen una cantidad aproximadamente igual de partículas de 50 nm (185, 180 y 180 respectivamente), sin embargo, la muestra M5 tiene 135 partículas. El aumento en la relación SiO₂/Al₂O₃ da como resultado menor número de partículas de 50 nm.

En la síntesis de Al₂O₃ calcinadas, nosotros (Contreras et al., 2015) hemos estudiado la síntesis de bohemita y la Al₂O₃ calcinada, agregando un surfactante llamado Bromuro de cetil trimetil amonio (CTAB). En ese estudio observamos que las morfologías de partículas cambiaron gradualmente cuando cambia la concentración de surfactante CTAB. En las muestras preparadas con y sin surfactante (C1-0 y C1-0.01) se observaron numerosos cúmulos hemisféricos unidos

entre sí para formar una estructura similar a una coliflor. Se observaron partículas esferoidales con diámetros entre 30 y 54 nm que formaban una estructura sólida. En el caso de las alúminas preparadas con una mayor concentración de CTAB (muestras C1-0.05 y C1-0.075), también se observaron cúmulos hemisféricos de partículas unidos a estructuras cilíndricas, donde estos cúmulos de cilindros o varillas estuvieron conectados con las semiesferas.

En la Al_2O_3 preparada con la mayor concentración de CTAB (muestra C1-0.1) se observó una densa red de partículas con forma de gusano. Para la misma muestra se obtiene una imagen de mayor resolución, la cual muestra la presencia de estructuras adheridas a las formaciones vermiformes, agrupadas y separadas entre sí. Estas partículas vermiformes también se han observado en alúminas preparadas por el método sol-gel utilizando el surfactante catiónico bromuro de hexadecil trimetil amonio. Estas estructuras probablemente se originaron por la coalescencia incontrolada de las especies de aluminio que forman las paredes de los poros durante la calcinación.

En el caso de nuestras muestras se observan también algunas de estas estructuras que posiblemente tengan relación con la presencia de precursores del SiO_2 , sin embargo, es difícil atribuir la morfología a la sola presencia del ácido metasilícico.

Las muestras tuvieron acidez Brønsted (Tabla 2) y acidez Lewis (Tabla 3) solo la alúmina comercial (no se incluyó) mostró acidez Lewis. Al aumentar el contenido de SiO_2 en las muestras M1 a M5 la acidez Brønsted fue disminuyendo y la acidez Lewis también parece disminuir.

Tabla 2. Acidez Brønsted ($\mu\text{mol-Py/gc}$) en función de la temperatura de desorción de piridina del soporte $Al_2O_3-SiO_2$.

Temperatura (°C)	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
50	282	153	220	186	168	151	0
100	193	126	196	163	148	133	0
200	155	86	110	91	88	85	0
300	60	35	45	74	54	34	0
400	30	17	3	5	6	8	0

La muestra M2 presentó la mayor acidez Brønsted y también la mayor acidez Lewis.

Tabla 3. Acidez Lewis ($\mu\text{mol-Py/gc}$) en función de la temperatura de desorción de piridina del soporte $Al_2O_3-SiO_2$.

Temperatura (°C)	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
50	649	602	1324	490	413	337	668
100	181	244	267	110	117	125	24
200	130	114	133	69	65	61	0
300	90	73	96	52	51	50	0
400	57	44	53	40	25	11	0

Todas las muestras mostraron un perfil de pérdida de peso por análisis ATG al aumentar la concentración de SiO_2 la cantidad de peso también disminuyó en el siguiente orden: $M5 > M0 > M1 > M2 > M3 > M4$. Se observaron tres zonas de pérdida de peso, la zona-I, fue debida a pérdida de H_2O de los geles, la zona II, debida a descomposición de la bohemia a Al_2O_3 y posible descomposición de los grupos NH^{4+} y H_2O y la zona-III estuvo relacionada con la pérdida de agua por cambio de la fase $\gamma-Al_2O_3$ a las fases θ y $\alpha-Al_2O_3$. La resistencia a la fractura de las esferas se muestra en la Figura 4. Las muestras M4 y M5 demostraron tener una resistencia a la fractura mayor que la de la Al_2O_3 comercial. Por lo que se eligió la muestra M5 como soporte para la preparación del catalizador.

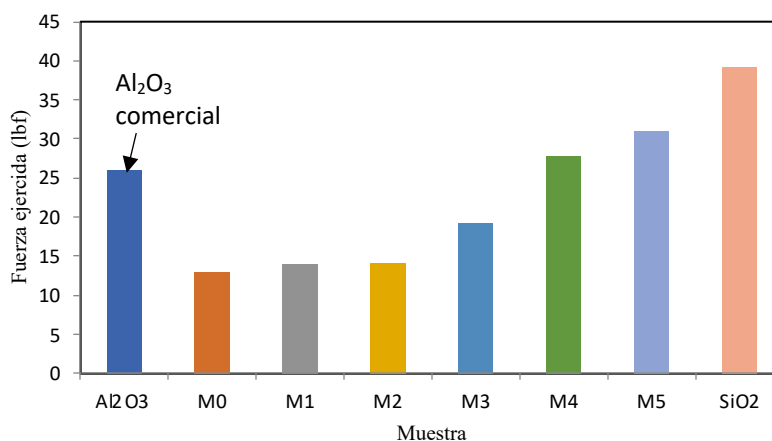


Figura 4. Resistencia a la fractura de las muestras en forma de esferas respecto de la Al₂O₃ comercial.

La conversión (X) y selectividad de los productos de reacción (Si) en función de la longitud del reactor de lecho fijo conteniendo el catalizador de 10%Ni-4.5%Co/M5 a 480°C se aprecia en la Figura 5. La conversión fue cercana a 90% mientras que la selectividad a H₂ fue cercana a 80%. A esta temperatura no se observó CO y la selectividad a CH₄ fue mayor que la selectividad a CO₂. El perfil de temperaturas a lo largo del reactor se mantuvo prácticamente constante.

Cuando aumentamos la temperatura a 510°C (Figura 6) se han obtenido mayores conversiones (X) y selectividades de H₂. Las selectividades de CH₄ y CO₂ se mantuvieron casi las mismas en función de la longitud del reactor.

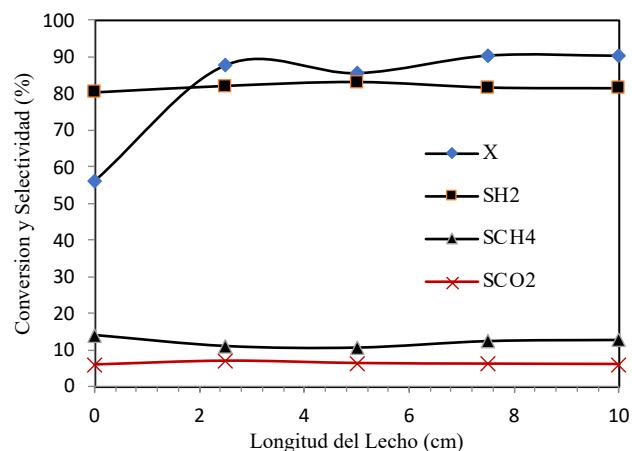


Figura 5. Conversión (X) y selectividad(S) del catalizador de 10%Ni-4.5%Co/M5 evaluado a 480°C.

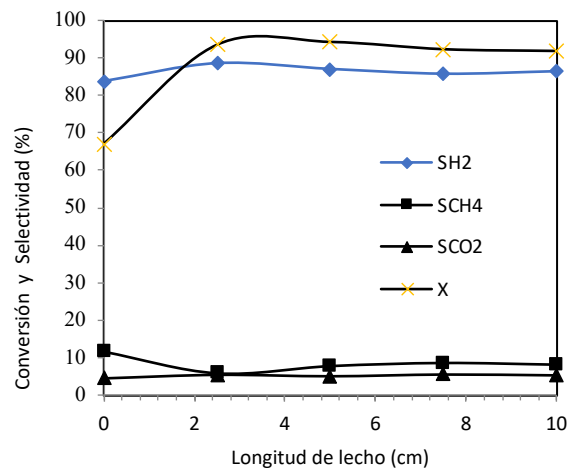


Figura 6. Conversión(X) y selectividad(S) del catalizador de 10%Ni-4.5%Co/M5, en función de la longitud del lecho evaluado a 510°C.

Conclusiones

Se preparó un soporte compuesto de Al₂O₃-SiO₂ con una resistencia mecánica superior a la que muestra una Al₂O₃ comercial. Se demostró que con la adición de SiO₂ a la Al₂O₃ se forman sitios ácidos Brønsted que aparecen junto con los ya conocidos sitios ácidos Lewis de la Al₂O₃. Se observó en los micro cristales de Al₂O₃- SiO₂ que conforme aumenta la concentración de SiO₂, disminuye la presencia de huecos o espacios en las multicapas y en el caso del SiO₂ se observan cristales con superficies sin rugosidad en donde se supone existen micro-poros. La evaluación del catalizador compuesto por 10% de Ni-4.5% de Co soportados en la muestra M5 demostró que se alcanzan altas conversiones en reactor integral cercanas al 95% a 510°C. La selectividad a hidrógeno aumento con el aumento en la temperatura de reacción, mientras que las selectividades a CH₄ y CO₂ prácticamente no cambiaron entre 480 y 510°C.

Agradecimientos: Se agradece a la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, a la ESIQIE del Instituto Politécnico Nacional y a la empresa Síntesis y Aplicaciones Industriales, S.A., por los apoyos recibidos.

Bibliografía

- Barroso M. N, M. F.Gómez, L.A.Arrúa, M. C. Abello, (2006), Hydrogen production by ethanol reforming over NiZnAl catalysts, *Appl. Catal. A: General* 304, 116-123. <https://10.1016/j.apcata.2006.02.033>
- Basile, F., G. Fornasari, M. Gazzano, A. Vaccari, (2000), Synthesis and thermal evolution of hydrotalcite-type compounds containing noble metals, *Appl. Clay. Sci.* 16, 185. [https://10.1016/S0169-1317\(99\)00053-8](https://10.1016/S0169-1317(99)00053-8)
- Contreras J.L., G. Gómez, B. Zeifert, J. Salmones, T. Vázquez, G.A. Fuentes, J. Navarrete, L. Nuño. (2015), Synthesis of Pt/Al₂O₃ catalyst using mesoporous alumina prepared with a cationic surfactant, *Catalysis Today* 250 72–86
- Contreras, J. L., J. Salmones, L. A. García, A. Ponce, B. Zeifert and G.A. Fuentes, (2008), Effect of WO_x Over Ni/Hydrotalcite Catalysts to Produce Hydrogen from Ethanol *J. of New Materials for Electrochemical Systems* 11, 109-117. <https://10.14447/jnmes.v15i3.60>
- Contreras, J. L., Anabel Figueroa, Beatriz Zeifert, Jose Salmones, Gustavo A. Fuentes, Tamara Vázquez, Deyanira Angeles, Leticia Nuño. (2021) Production of hydrogen by ethanol steam reforming using Ni-Co-ex-hydrotalcite catalysts stabilized with tungsten oxides., *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 6474-6493. <https://10.1016/j.ijhydene.2020.11.143>
- Contreras, J.L., J. Salmones, J.A. Colín-Luna, L. Nuño, B. Quintana, I. Córdova, B. Zeifert, C. Tapia and G.A. Fuentes. (2014), Catalysts for H₂ production using the ethanol steam reforming (A review). *Inter. J. of Hyd. Ene.*, 39 (33), 18835-18853. <https://10.1016/j.ijhydene.2014.08.072>
- Cortright, R.D., R.R. Davda, J.A. Dumesic, Hydrogen from catalytic reforming of biomass-derived hydrocarbons in liquid water, *Nature* 418 (2002) 964. <https://10.1038/nature01009>
- Jordi Llorca, N., Homs, J. Sales, J. L. G. Fierro and P. Ramírez de la Piscina, (2004), Hydrogen production by ethanol reforming over NiZnAl catalysts *J. Catal.* 222, 470-480. <https://10.1016/j.apcata.2006.02.033>
- Jordi Llorca, N. Homs, J. Sales, and P. Ramírez de la Piscina, (2002), Efficient Production of Hydrogen over Supported Cobalt Catalysts from Ethanol Steam Reforming, *J. Catal.* 209, 306-317. <https://10.1006/jcat.2002.3643>
- Lev Gelb, K. E. Gubbins, R. Radhakrishnan, and M. Sliwinski-Bartkowiak, (1999), Phase Separation in Confined Systems *Reports on Progress in Physics* 62, 1573. <https://10.1088/0034-4885/62/12/201>
- Lowell, S., J. E. Shields, M. A. Thomas, and M. Thommes, (2004), *Characterization of Porous Solid and Powders: Surface Area, Pore Size and Density*, Kluwer Academic Publishers.
- M. del Arco, D. Carriazo, S. Gutiérrez, C. Martín and V. Rives, (2004), Synthesis and Characterization of New Mg₂Al-Paratungstate Layered Double Hydroxides, *Inorg. Chem.* 43, 1, 375–384. <https://10.1021/ic0347790>
- Pérez Cabrera J y Contreas J.L., (2021) Efecto del silicio sobre la resistencia mecánica a la compresión de esferas de gamma-alúmina, Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco.
- Rosas, M. D, Figueroa A., Contreras J.L., Pala Rosas I, López M. R y Tapia Medina Carlos. (2024), Estudio termodinámico de la producción de Hidrogeno a partir de la reformación de Glicerol con agua usando el software Aspen Plus *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad (TERYS)*, Vol. 3, No. 1, 272-277.
- Sing K.S.W., Everett, D.H., R. Haul, L. Moscou, R. Pierotti, J. Rouquerol, and T. Siemieniewska, (1985) Reporting physisorption data for gas/solid systems. *Pure Applied Chemistry*, 57, 603-619. <https://10.1351/pac198557040603>