Naturaleza y TECNOLOGÍA
Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

OBTENCIÓN DE HIDRÓXIDOS DOBLES LAMINARES Co-Fe ACTIVADOS COMO CATALIZADORES HETEROGÉNEOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL

Karen Nayely Cortez Mendoza [a], Danna Sarai Díaz Alcantar [a], María José López Morales [a], Diego Armando Palafox Hernández [b], Israel Rangel Vázquez [c], Norma L. Gutiérrez Ortega [d], Esthela Ramos Ramírez [e,*]

[a] Licenciatura en Químico Farmacéutico Biólogo, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato
[b] Doctorado en Ciencias Químicas, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.
[c] Posdoctorado, Departamento de Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato
[d] Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.
[e] Departamento de Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. *ramosre@ugto.mx

Resumen

Actualmente a nivel mundial se tiene la necesidad de producir Biodiesel, mediante procesos amigables y sustentables, para la obtención de óxidos mixtos-CoFe derivados de la activación a 700ºC de Hidróxidos Dobles Laminares-CoFe a diferentes relaciones molares (1:1, 3:1). Las condiciones de reacción en la transesterificación de ácidos grasos usando estos catalizadores heterogéneos, presentan ventajas sobre otros procesos entre los que se utilizan catalizadores homogéneos, además de contribuir a la disminución del impacto ambiental. Los catalizadores obtenidos fueron caracterizados por Análisis Termogravimétrico y Calorimetría Diferencial de Barrido (TGA/DSC), Difracción de Rayos X (DRX), Espectroscopía Infrarroja con Transformadas de Fourier (FTIR), Espectroscopia Fotoelectrónica de Rayos X (XPS). Además, se realizó la determinación de Acidez mediante Desorción a Temperatura Programada de Amoniaco (TPD-NH_3) y la Fisisorción de Nitrógeno (N_2). La obtención de biodiésel fue empleando aceite de canola y metanol anhidro como materias primas. Se llevó a cabo la reacción de transesterificación para la producción de biodiésel y se evaluaron parámetros de calidad como la densidad y viscosidad del biodiésel obtenido derivado de la reacción de transesterificación. Los resultados obtenidos de la viscosidad del biodiésel, fue de 3.89 cP con una densidad de 0.8830 g/ml confirmando así la efectividad de los Hidróxidos Dobles

Laminares-Co/Fe con relación 3:1 activados, como catalizadores heterogéneos para la reacción de transesterificación de ácidos grasos.

Palabras clave: Hidrotalcita; biodiésel; viscosidad; transesterificación

OBTAINING DOUBLE LAMINAR HYDROXIDES Co-Fe ACTIVATED AS HETEROGENEOUS CATALYSTS FOR BIODIESEL PRODUCTION

Abstract

Currently worldwide there is a need to produce Biodiesel, through friendly and sustainable processes, so a mixed oxides-CoFe derived from the activation at 700ºC of CoFe-Double Laminar Hydroxides at different molar ratios (1:1, 3:1) were obtained. The reaction conditions in the transesterification of fatty acids using these heterogeneous catalysts have advantages over other processes among which homogeneous catalysts are used, in addition to contributing to the reduction of environmental impact. The catalysts obtained were characterized by Thermogravimetric Analysis and Differential Scanning Calorimetry (TGA/DSC), X-Ray Diffraction (XRD), Infrared Spectroscopy with Fourier Transforms (FTIR), X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS). In addition, the determination of acidity was carried out by Ammonia Temperature-Programmed Desorption (TPD-NH_3) and Nitrogen Physisorption (N_2). The biodiesel was obtained using canola oil and anhydrous methanol as raw materials. The transesterification reaction was carried out to produce biodiesel and quality parameters such as the density and viscosity of the biodiesel obtained derived from the transesterification reaction were evaluated. The results obtained from the viscosity of the biodiesel was 3.89 cP with a density of 0.8830 g/ml, thus confirming the effectiveness of the Double Laminar Hydroxides-Co/Fe with a 3:1 ratio activated, as heterogeneous catalysts for the transesterification reaction of fatty acids.

Keywords: Hydrotalcite; biodiesel; viscosity; transesterification

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

1. Introducción

El incremento en la demanda energética mundial y la preocupación por los efectos ambientales derivados del uso de combustibles fósiles han impulsado el desarrollo de fuentes de energía renovables y sostenibles (International Energy Agency, 2024; Knothe y col., 2015). Entre ellas, el biodiésel destaca como una alternativa viable debido a su carácter biodegradable, baja toxicidad, menor emisión de gases contaminantes y compatibilidad con los motores diésel convencionales (Knothe y col., 2015; Meher y col., 2006). Este biocombustible se obtiene principalmente mediante la reacción de transesterificación de aceites vegetales o grasas animales con un alcohol de cadena corta, generalmente metanol, en presencia de un catalizador (Ma y Hanna, 1999), como se ilustra en la Figura 1. Las principales materias primas que son utilizados y que cumplen el propósito para la síntesis del biodiésel son: soja, colza y girasol, al ser comparados con la obtención del diésel proveniente de fuentes fósiles, en términos de densidad, número de cetanos, eficacia y desempeño de los motores diésel, destacando que el biodiesel tiene un punto de inflamación más alto (Knothe, 2005). La ASTM (American Society for Testing and Material Standard) define el biodiesel como ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga, los cuales pueden ser utilizados en motores de ignición por compresión, como son los motores del tipo "Diésel" (ASTM International, 2024). El aceite de canola constituye una materia prima de gran interés para la producción de biodiésel debido a su elevado contenido de triglicéridos y ácidos grasos insaturados, los cuales favorecen la obtención de ésteres metílicos con propiedades fisicoquímicas adecuadas para su uso como combustible. Asimismo, el empleo de metanol permite alcanzar altas conversiones en la reacción de transesterificación, debido a su alta reactividad y disponibilidad. Tradicionalmente, la síntesis de biodiésel se ha llevado a cabo utilizando catalizadores homogéneos alcalinos como el NaOH o KOH. Sin embargo, estos presentan desventajas como la dificultad de separación, la generación de efluentes y la imposibilidad de reutilización. En este contexto, los catalizadores heterogéneos han adquirido gran relevancia, ya que facilitan la recuperación del catalizador, disminuyen la contaminación ambiental y pueden reutilizarse en múltiples ciclos de reacción

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

(Marinković y col., 2016). Las hidrotalcitas, también conocidas como hidróxidos dobles laminares (HDL), representan una familia de materiales con propiedades estructurales y catalíticas sobresalientes, tales como elevada área superficial, estabilidad térmica y posibilidad de modificar su composición química para optimizar su actividad catalítica. La incorporación de metales de transición como cobalto y hierro permite generar materiales con sitios activos que favorecen la reacción de transesterificación, además de modificar sus propiedades ácido-base y óxido-reducción (Cavani y col., 1991).

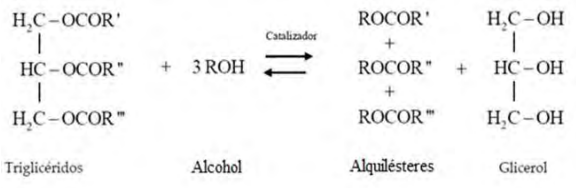


Figura 1. Reacción de transesterificación para la producción de biodiésel.

En este trabajo se evaluaron los hidróxidos dobles laminares calcinados a 700 °C y empleados como catalizadores heterogéneos en la síntesis de biodiésel (transesterificación) a partir de aceite de canola y metanol empleando hidróxidos dobles laminares Co/Fe con diferentes relaciones molares (1:1 y 3:1) con el propósito de analizar la influencia de la composición del catalizador sobre la eficiencia de la reacción de transesterificación para la obtención de biodiésel utilizando materiales tipo HDL.

2. Materiales y Métodos

2.1 Obtención del catalizador

2.1.1 Síntesis de precursores catalíticos de hidróxidos dobles laminares Co/Fe

Los precursores catalíticos de hidrotalcita tipo Co/Fe se sintetizaron mediante el método de coprecipitación empleando sales precursoras de cobalto y hierro, obteniendo materiales con relaciones molares Co/Fe de 1:1 y 3:1. Durante la síntesis se mantuvieron condiciones controladas de pH y agitación para favorecer la formación de la estructura laminar característica de las hidrotalcitas. Posteriormente, los sólidos obtenidos fueron filtrados, lavados para eliminar impurezas y secados antes de su tratamiento térmico. Las muestras se identificaron de acuerdo con su relación molar como HTCoFe-1:1 (HTCF1) y HTCoFe-3:1 (HTCF3).

2.1.2 Activación de las hidrotalcitas

Las hidrotalcitas sintetizadas fueron sometidas a un proceso de calcinación a 700 °C con el fin de obtener los óxidos mixtos catalíticamente activos. Posteriormente, los catalizadores calcinados se emplearon en la

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

reacción de transesterificación para evaluar el efecto de la relación molar Co/Fe sobre la actividad catalítica en la obtención del biodiésel.

2.2 Caracterización del material tipo hidróxidos dobles laminares Co/Fe

Los hidróxidos dobles laminares calcinados fueron caracterizados a fin de obtener sus propiedades fisicoquímicas mediante varias técnicas analíticas.

Los análisis TGA/DSC se realizaron en un equipo STA200 marca Hitachi. En todas las etapas se utilizó una velocidad de calentamiento de 10 °C/min y el análisis completo se realizó en atmósfera dinámica de aire seco de grado cromatográfico.

Los Difractogramas de rayos X de polvos se midieron en un difractómetro D8 Advance (Bruker) equipado con un tubo de rayos X de Cu (λ=0.154 nm) y un detector de tiras de silicio unidimensional sensible a la posición. La intensidad de difracción en función del ángulo 2θ fueron medidos en el intervalo de 10° y 70° en función de 2θ.

La caracterización por Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) se realizó en un FTIR Affinity-1 Shimadzu acoplado con ATR utilizando una resolución de 4 cm^{-1} y 250 scans y en el intervalo de número de onda comprendida entre 500 y 4000 cm^{-1}.

La Espectroscopia de fotoelectrones emitida por Rayos-X (XPS) se utilizó un equipo Versa-Probe II con un vacío de 10^{-9} torr y como referencia se utilizó el orbital de C 1s a 285.00 eV.

Método de fisisorción de N_2-BET, las isotermas de adsorción-desorción de nitrógeno se determinan a −196 °C utilizando un instrumento Micromeritics Tristar II Plus, con análisis BET, tras una desgasificado previa a 200 °C durante 24 h.

La termodesorción de amoniaco (TPD-NH_3) fue realizada en un Equipo BETCAT-B. Los materiales fueron desgasificados mediante un flujo de He (50 ml/min) con una velocidad de calentamiento de 5 °C/min hasta 300 °C y a esta temperatura se mantiene durante 1 hora. Posteriormente se deja enfriar a temperatura ambiente y se pasa por los distintos materiales (por separado) la mezcla de 10% NH_3 en balance con 90% Helio durante 1 hora. Para los distintos análisis de acidez fue utilizado como gas acarreador Helio con un flujo de 50

ml/min y una velocidad de calentamiento de 10°C/min hasta una temperatura de 700 °C.

2.3 Pruebas de actividad catalítica en la producción de biodiésel

La reacción de transesterificación se llevó a cabo utilizando aceite de canola y metanol anhidro como materias primas y los hidróxidos dobles laminares calcinados como catalizador heterogéneo. La reacción de transterificación se llevó a 65 °C a reflujo y con agitación constante. Al finalizar la reacción, el catalizador fue recuperado mediante filtración al vacío. Finalmente, el biodiésel obtenido se caracterizó determinando su viscosidad y densidad, con el propósito de evaluar la calidad del producto y establecer la relación molar del catalizador que presentó el mejor desempeño catalítico.

3. Resultados y discusión

3.1 TGA/DSC

En la Figura 2a) se puede observar que los diferentes hidróxidos dobles laminares Co/Fe presentan evoluciones térmicas similares. La fase correspondiente al oxido de cobalto se atribuye a una mayor actividad catalítica que generalmente se obtiene cerca de los 700 °C de acuerdo con lo que se observa en la Figura 2b) en el DSC.

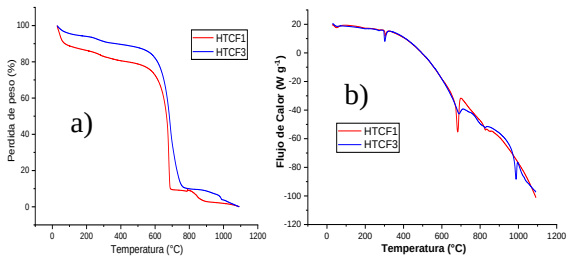


Figura 2. Termogramas de los hidróxidos dobles laminares Co/Fe: a) TGA y b) DSC.

Mientras que en la Figura 2b) se puede apreciar de una mejor manera las temperaturas precisas a las cuales se están generando las evoluciones del material. Para la relación 1:1 es más notorio el pico de la reacción endotérmica atribuida a la perdida de agua interlaminar lo que significa que tienen un mayor contenido de agua que la de relación 3. La siguiente reacción que se puede relacionar es la perdida de hidroxilos y carbonatos entre 200 a 400 °C. La fase con mayor actividad catalítica para las relaciones 1 se obtiene a 600 °C, 100 °C por debajo que para las relaciones 3, lo cual se atribuye a la relación molar Co/Fe, las siguientes reacciones describen que ocurren durante el proceso de calcinación y la formación de óxidos de cobalto y ferrita de cobalto.

$Co_6Fe_2(OH)_{16}CO_3 \cdot 4H_2O \rightarrow Co_6Fe_2(OH)_{16}CO_3 + 4H_2O\uparrow$ 25 a 300°C

$Co_6Fe_2(OH)_{16}CO_3 \rightarrow Co_6Fe_2O_8(OH)_2 + 7H_2O\uparrow + CO_2\uparrow$ 300-600°C

$Co_6Fe_2O_8(OH)_2 \rightarrow CoFe_2O_4 + Co_3O_4 + 2CoO_4 + 2H_2O\uparrow$ 600 a 1000°

3.2 DRX

La Figura 3 muestra los Difractogramas de rayos X de las muestras HTCF1 y HTCF3, correspondientes a las hidrotalcitas Co/Fe con relaciones molares 1:1 y 3:1, respectivamente, después del tratamiento de calcinación a 700 °C. En ambas muestras se identificaron las fases cristalinas $CoFe_2O_4$ y Co_3O_4, lo que confirma la formación de fases cristalinas que pueden hacer sinergia durante la reacción de transesterificación en función de la relación molar Co/Fe.

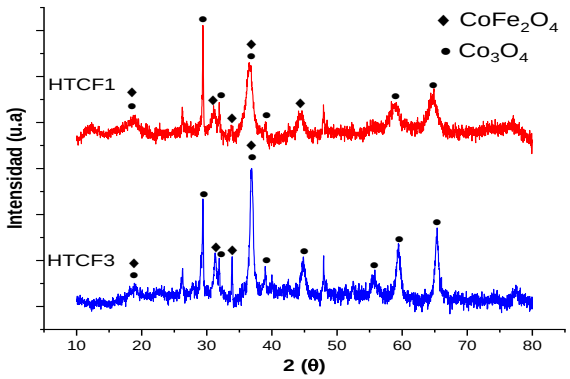


Figura 3. Difractogramas de rayos X (DRX) de las muestras calcinadas HTCF1 y HTCF3, con la identificación de sus dos fases cristalinas.

La formación de estos óxidos es particularmente importante porque genera sitios ácido-base y propiedades redox que favorecen la activación del metanol y de los triglicéridos durante la reacción de transesterificación para la producción de biodiésel (Cavani y col., 1991; Di Cosimo y col., 1998). Al comparar ambos Difractogramas se observa que la muestra HTCF3 presenta picos de difracción más intensos y estrechos que HTCF1, especialmente en la región comprendida entre 30 y 40° de 2θ y en las reflexiones localizadas alrededor de 59 y 65°. Este comportamiento indica un mayor grado de cristalinidad y un crecimiento más pronunciado de los dominios cristalinos cuando aumenta la proporción de cobalto. En contraste, la muestra HTCF1 presenta señales ligeramente más anchas y de menor intensidad, lo que sugiere una menor cristalinidad. En materiales catalíticos, una menor cristalinidad suele asociarse con un mayor número de defectos estructurales y una mejor accesibilidad de los sitios activos, factores que pueden favorecer la actividad catalítica al incrementar la interacción entre el catalizador y los reactivos durante la transesterificación (Vaccari, 1998).

Las posiciones en 2θ evidencian la formación de la fase correspondiente a Co_3O_4 después de la calcinación. Este óxido de cobalto posee una reconocida actividad catalítica debido a la coexistencia de especies Co^{2+} y Co^{3+}, las

cuales participan en procesos de transferencia electrónica y contribuyen al desarrollo de propiedades ácido-base superficiales (Gao y col., 2024; Hong y col., 2024). Por otra parte, la presencia simultánea de la fase $CoFe_2O_4$ (ferrita de cobalto) indica que la incorporación del hierro modifica la estructura del material, favoreciendo la formación de óxidos mixtos capaces de proporcionar una distribución más uniforme de los sitios catalíticos. La interacción entre ambas fases puede generar un efecto sinérgico que incremente la estabilidad térmica del catalizador y mejore su desempeño durante la reacción de transesterificación, además de facilitar su recuperación y reutilización frente a los catalizadores homogéneos convencionales (Di Cosimo y col., 1998).

3.3 FTIR

En la Figura 4, se observan los espectros FT-IR de los óxidos derivados de la calcinación de los hidróxidos dobles laminares. En todos los óxidos Co/Fe se logra observar un modo vibracional cerca de 3300 cm^{-1} lo cual se atribuye a la hidratación de estos óxidos. En el caso del HTCF3 los carbonatos son libres. Para la relación 3 se pueden observar las 4 bandas entre 500-950 cm^{-1} que pertenecen a los enlaces Fe-O y Co-O, estas señales son características de un espectro infrarrojo de la ferrita de cobalto (Khataee y col., 2024). Las 4 señales características de la ferrita de cobalto no se observan con claridad en el HTCF1 lo que puede significar que se están sobreponiendo algunas señales de óxidos simples de hierro u óxidos simples de cobalto.

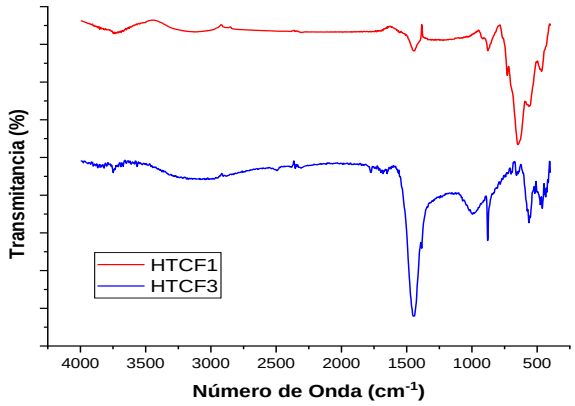


Figura 4. Espectros FT-IR de HTCF1 y HTCF3.

3.4 XPS

En la Figura 5 se muestran los espectros de barrido amplio (XPS) de los catalizadores HTCF1 y HTCF3, y se encuentran las señales correspondientes a los elementos Co 2p, Fe 2p y O 1s lo cual evidencia la composición elemental de las fases cristalinas observadas en análisis térmico y difracción de rayos X.

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

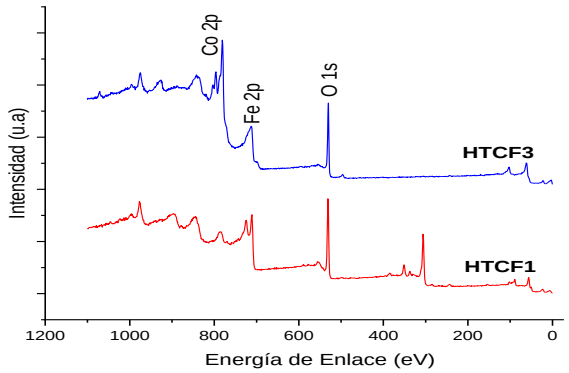


Figura 5. Espectros XPS de barrido amplio de HTCF1 y HTCF3.

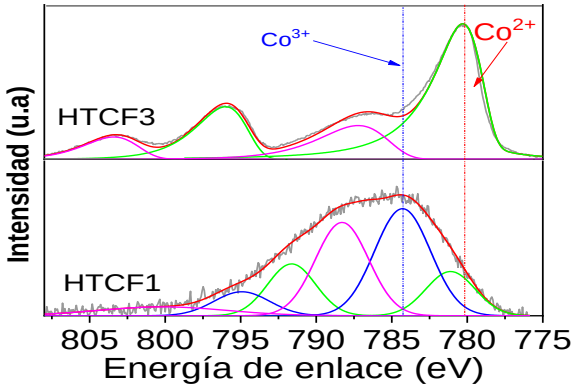


Figura 6. Espectros XPS de alta resolución de Co 2p de HTCF1 y HTCF3.

En la Figura 6 se observa la deconvolución de los espectros XPS de alta resolución de Co 2p de los catalizadores HTCF1 y HTCF3 y se observa que en el catalizador HTCF3 solo se presenta el estado de oxidación correspondiente a Co^{2+} con una energía de enlace localizada en 780.30 eV y una abundancia relativa de 100% (Gao y col., 2024; Hu y col., 2025). Sin embargo, para el catalizador HTCF1 presenta la coexistencia de dos estados de oxidación Co^{2+} y Co^{3+}, sus respectivas energías de enlace son localizadas en 781.11 eV y 784.30 eV y sus respectivas abundancias relativas 43.25% y 56.75% (Gao y col., 2024; Hu y col., 2025).

En la Figura 7, se puede observar la deconvolución de los espectros XPS de alta resolución de Fe 2p correspondientes a los catalizadores HTCF1 y HTCF3. En los espectros se pueden observar la contribución de dos estados de oxidación en ambos catalizadores y corresponden a Fe^{2+} y Fe^{3+}, sus energías de enlace y abundancia relativa (%) para HTCF1 fueron localizadas en 710.39 eV (53.65%) y 712.73 eV (46.35%) y para HTCF3 710.17 eV (44.6%) y 712.63 eV (55.4%) (Gao y col., 2024; Huang y col., 2024). El desplazamiento a baja energía de enlace de ambos estados de oxidación de Fe^{2+} y Fe^{3+} presentes en HTCF3 y al compararlo con las energías de enlace de HTCF1 puede ser atribuido a la fuerte interacción entre la hidrotalcita (Co-Fe), espinela formada y óxidos de hierro formados por el tratamiento térmico.

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

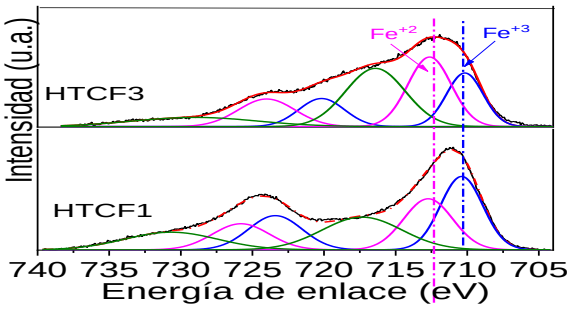


Figura 7. Espectros XPS de alta resolución de Fe 2p de HTCF1 y HTCF3.

En la Figura 8 se muestran los espectros de alta resolución de O 1s de los catalizadores HTCF1 y HTCF3. Para el catalizador HTCF1 se observa que se tienen cuatro energías de enlace y su abundancia relativa correspondientes a oxigeno de la red estructural (O_R, 530.19 eV, 44.7%), oxigeno de los grupos OH en superficie (O_S, 531.55 eV, 34.4%) y oxigeno atribuido a carbonatos (O_C, 532.6 eV, 14.5%) y agua (533.87 eV, 6.4%). Para HTCF3 posee tres energías de enlace correspondientes a oxígeno en la red estructural (Os, 530.19 eV, 76%) y oxígenos provenientes de grupos -OH (531.71 eV, 18.7%) y carbonatos (O_c, 532.47 eV, 5.3%) (Hong y col., 2024; Hu y col., 2025; Huang y col., 2024).

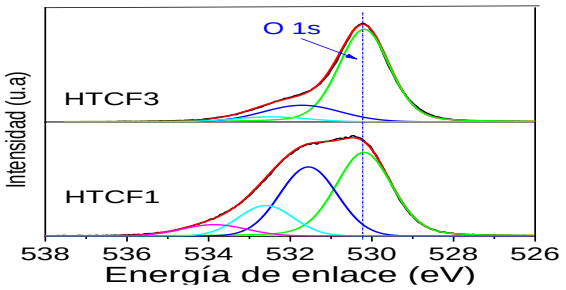


Figura 8. Espectros XPS de alta resolución de O 1s de HTCF1 y HTCF3.

La diferencia entre las energías de enlace y de abundancias de oxígeno de las distintas especies debe ser correlacionado a las distintas especies presentes debido al tratamiento térmico realizado.

3.5 TPD-NH_3

La caracterización de la fuerza de sitios ácidos en los materiales HTCF1 y HTCF3 fueron realizadas mediante la técnica de termodesorción de amoniaco en función de la temperatura. En la Figura 9 se pueden observar las distintas temperaturas de termodesorción de amoniaco las cuales son asociadas y clasificadas al tipo de fuerza y abundancia relativa de los sitios ácidos presentes en ambos materiales.

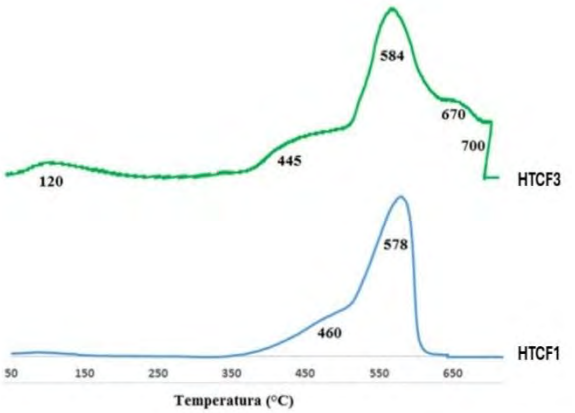


Figura 9. Perfiles de desorción de NH_3 para los óxidos mixtos de diferente relación molar Co/Fe.

La presencia de diferentes sitios ácidos está relacionada con las diferentes especies que se pueden formar, por ejemplo, en la relación 1 y 3. La presencia de óxidos simples de hierro (HTCF1) generan un tipo de sitio y los diferentes óxidos simples de cobalto generar un sitio distinto como se pueden ver en función de la temperatura de desorción y fuerza ácida relativa (ver Figura 9 y Tabla 1). Sin embargo, al incrementar la cantidad de cobalto (relación 3) se diversifica la cantidad de sitios y fuerza ácida relativa en función de la temperatura de desorción, debido a la obteniendo óxidos simples de hierro, óxidos simples de cobalto, óxido mixto Cobalto/Fierro y el óxido mixto Sodio/Cobalto.

Tabla 1. Resultados de la desorción de amoniaco sobre los hidróxidos dobles laminares con relación molar Co/Fe = 1 y 3.

Fuerza ácida relativa	HTCF1 (%)	HTCF3 (%)
Débil	0	4.85
Intermedia	26.31	18.75
Media	73.69	50.80
Fuerte	0	19.12
Muy fuerte	0	6.47

3.6 Área BET

Las propiedades texturales de los óxidos mixtos HTCF1 y HTCF3 fueron obtenidas mediante adsorción-desorción de nitrógeno y el método utilizado para la distribución de tamaño de poros fue el método BJH (ver Figura 10). La muestra HTCF3 presentó un área superficial específica de 8.36 m^2g^{-1}, un diámetro de poro de 83.2 nm y un volumen de poro de 0.0309 cm^3g^{-1}, valores superiores a los obtenidos para HTCF1, la cual presentó un área superficial de 1.93 $m^2\ g^{-1}$, un diámetro de poro de 54.3 nm y un volumen de poro de 0.0069 $cm^3\ g^{-1}$ como se observa en la Tabla 2. De acuerdo con la clasificación de la IUPAC, ambas muestras corresponden a materiales macroporosos, ya que su diámetro de poro es superior a 50 nm (Thommes y col., 2015).

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

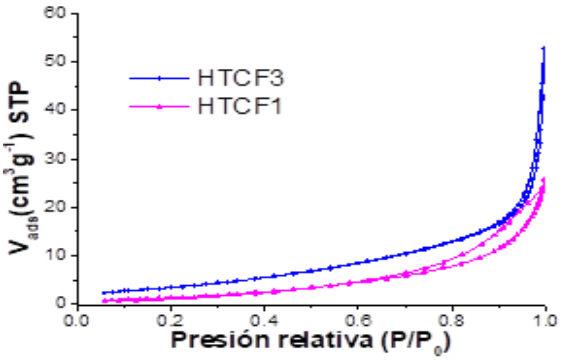


Figura 10. Isotermas de adsorción-desorción de N_2 de HTCF1 y HTCF3.

Tabla 2. Parámetros texturales de los hidróxidos dobles laminares calcinados.

Catalizador	Área específica (m^2 g^{-1})	Diámetro de poro (nm)	Volumen de poro (cm^3 g^{-1})
HTCF1	1.93	54.3	0.0069
HTCF3	8.37	83.2	0.0309

El incremento del área superficial y del volumen de poro observado en HTCF3 favorece una mayor disponibilidad de sitios activos y una mejor difusión de los reactivos hacia el interior del catalizador, facilitando la adsorción del metanol y de los triglicéridos durante la reacción de transesterificación. Estos resultados son consistentes con estudios realizados en hidrotalcitas calcinadas, donde se ha demostrado que las propiedades texturales influyen significativamente en la actividad catalítica y en la eficiencia de producción de biodiésel (Cavani y col., 1991).

3.7 Actividad Catalítica

Los resultados de viscosidad y densidad del biodiésel obtenido con las diferentes relaciones molares Co/Fe se muestran en la Tabla 3. La muestra HTCF3 (Co/Fe = 1:3) presentó una viscosidad de 3.8931 cP y una densidad de 0.8830 g mL^{-1}, valores que cumplen con las especificaciones de calidad establecidas en México para el biodiésel (B100). En contraste, HTCF1 registró viscosidades de 22.6793 cP, respectivamente, así como densidades superiores de 0.9203 g mL^{-1}, lo que sugiere una menor conversión de los triglicéridos a ésteres metílicos y la presencia de compuestos sin reaccionar, como mono-, di- y triglicéridos residuales (Knothe y col., 2015; Secretaría de Energía, 2018; Zeng y col., 2010).

Tabla 3. Parámetros del biodiésel obtenido de acuerdo con la normatividad ASTM.

Catalizador	Densidad (g mL^{-1})	Viscosidad (cP)
HTCF1	0.9355	22.6793
HTCF3	0.8830	3.8931

Ambos hidróxidos dobles laminares al ser calcinados presentan la formación de fases cristalinas (ferrita de cobalto y oxido de cobalto). Sin embargo, el mejor desempeño catalítico de HTCF3 se atribuye a una mayor relación molar Co/Fe en comparación a

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

HTCF1 ya que las señales obtenidas en el análisis térmico indican una sinterización de átomos de Co y Fe para HTCF1, en comparación HTCF3 donde la formación de los óxidos comienza a partir de los 700 °C, lo cual corrobora la variación del área específica.

4. Conclusiones

La relación molar Co/Fe demostró ser un parámetro determinante en la modificación de las propiedades fisicoquímicas de los hidróxidos dobles laminares y, en consecuencia, de su desempeño catalítico durante la transesterificación para la producción de biodiésel. El material con relación Co/Fe = 3 presentó propiedades texturales superiores, reflejadas en una mayor accesibilidad a los sitios activos y una mayor eficiencia catalítica en comparación con el catalizador Co/Fe = 1. Esta mejora estructural se tradujo en una conversión más eficiente de los triglicéridos y en la obtención de un biodiésel cuyas propiedades cumplieron con los requisitos establecidos por la norma ASTM, confirmando la idoneidad del catalizador para aplicaciones prácticas.

Referencias bibliográficas

ASTM International. (2024). *Standard specification for biodiesel fuel blend stock (B100) for middle distillate fuels* (ASTM D6751-24). https://doi.org/10.1520/D6751-24

Cavani, F., Trifirò, F., y Vaccari, A. (1991). Hydrotalcite-type anionic clays: Preparation, properties and applications. *Catalysis Today*, 11(2), 173-301. https://doi.org/10.1016/0920-5861(91)80068-K

Di Cosimo, J. I., Díez, V. K., Xu, M., Iglesia, E., y Apesteguía, C. R. (1998). Structure and surface and catalytic properties of Mg-Al basic oxides. *Journal of Catalysis*, 178(2), 499-510. https://doi.org/10.1006/jcat.1998.2161

Gao, D., Fang, F., Waterhouse, G. I. N., Han, F., y Li, Y. (2024). S, P modified CoFe-LDH derived CoFeS and CoFeP-400 catalysts efficiently catalyze the oxidation of HMF to FDCA. *Catalysis Science & Technology*, 14(5), 1191-1200. https://doi.org/10.1039/d4cy00010b

Hong, X., Shi, M., Li, L., Ding, Z., Zhao, Z., Du, P., Xia, M., y Wang, F. (2024). α-Fe_2O_3

nanorods on CoFe-LDH@MX via interfacial interactions for Congo red removal: Experimental and mechanistic studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(3), 113059. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113059

Hu, B., Yang, T., Peng, Y., Chen, F., y Liu, D. (2025). The high-temperature performance of Pt/Ba/$Co_xMg_{1-x}Al_2O_4$ catalysts for lean-burn NO_x removal. *Catalysis Letters*, 155(1), 37. https://doi.org/10.1007/s10562-024-04852-2

Huang, G., Wang, Y., Ma, X., Cao, Y., Wei, B., Zhang, L., Chen, W., Ye, F., Xu, C., y Du, X. (2024). Boosting electrocatalytic performance of CoFe hydroxide catalyst by P-doping for oxygen evolution. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 163, 105664. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105664

International Energy Agency. (2024). *World Energy Outlook 2024*. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024

Khataee, S., Dehghan, G., Shaghaghi, Z., y Khataee, A. (2024). An enzyme-free sensor based on La-doped CoFe-layered double hydroxide decorated on reduced graphene oxide for sensitive electrochemical detection of urea. *Microchimica Acta*, 191(3), 152. https://doi.org/10.1007/s00604-024-06221-7

Knothe, G. (2005). Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. *Fuel Processing Technology*, 86(10), 1059-1070. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.11.002

Knothe, G., Van Gerpen, J., y Krahl, J. (2015). *The biodiesel handbook* (2a ed.). AOCS Press.

Ma, F., y Hanna, M. A. (1999). Biodiesel production: A review. *Bioresource Technology*, 70(1), 1-15. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00025-5

Marinković, D. M., Stanković, M. V., Veličković, A. V., Avramović, J. M., Miladinović, M. R., Stamenković, O. S., Veljković, V. B., y Jovanović, D. M. (2016). Calcium oxide as a promising heterogeneous catalyst for biodiesel production: Current state and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1387-1408. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.007

Meher, L. C., Vidya Sagar, D., y Naik, S. N. (2006). Technical aspects of biodiesel

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

production by transesterification—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(3), 248-268. https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.09.002

Secretaría de Energía. (2018). *Lineamientos por los que se establecen las especificaciones de calidad y características para etanol anhidro (bioetanol), biodiésel y bioturbosina puros*. Diario Oficial de la Federación.

Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., y Sing, K. S. W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9-10), 1051-1069. https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117

Vaccari, A. (1998). Preparation and catalytic properties of cationic and anionic clays. *Catalysis Today*, 41(1-3), 53-71. https://doi.org/10.1016/S0920-5861(98)00038-8

Zeng, H. Y., Feng, Z., Deng, X., y Li, Y. (2010). Activation of Mg-Al hydrotalcite catalysts for transesterification of palm oil to biodiesel. *Fuel*, 89(8), 2211-2216. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.03.014