

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



**DESARROLLO DE UNA NUEVA METODOLOGÍA PARA LA PRODUCCIÓN DE
BIOCOMBUSTIBLE MARÍTIMO A PARTIR DE LODOS RESIDUALES**

Por:

I.P.Q. HEIDY RAMOS MALPICA

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO EN:
**MAESTRO EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN PROCESOS
SUSTENTABLES**

ASESOR

DR. JOSÉ JULIÁN CANO GÓMEZ.

CO-ASESORES

DR. PASIANO RIVAS GARCÍA.
DR. MITCHEL ABRAHAM RUÍZ ROBLES.

Marzo 2026, Monterrey, Nuevo León, México.

DESARROLLO DE UNA NUEVA METODOLOGÍA PARA LA PRODUCCIÓN DE
BIOCOMBUSTIBLE MARÍTIMO A PARTIR DE LODOS RESIDUALES

Revisión de tesis:

**DR. GERARDO ANTONIO FLORES
ESCAMILLA
Comité tutorial**

**DR. IVÁN ALONSO SANTOS LÓPEZ
Comité tutorial**

**DR. HÉCTOR JAVIER AMÉZQUITA GARCÍA
Comité tutorial**

**DR. JAVIER RIVERA DE LA ROSA
Subdirector de Posgrado**

DESARROLLO DE UNA NUEVA METODOLOGÍA PARA LA PRODUCCIÓN DE
BIOCOMBUSTIBLE MARÍTIMO A PARTIR DE LODOS RESIDUALES

Asesores de tesis:

DR. JOSÉ JULIÁN CANO GÓMEZ
Asesor

DR. PASIANO RIVAS GARCÍA
Co-asesor

DR. MITCHEL ABRAHAM RUÍZ ROBLES
Co-asesor

AGRADECIMIENTOS

Al Creador del Universo, por concederme inteligencia y sabiduría para transitar este camino y culminar con éxito esta etapa de mi vida.

A mi amado esposo, Andriy, mi compañero de vida y de ciencia. Gracias por recorrer esta travesía a mi lado y por demostrarme, con tu apoyo incondicional, que siempre es posible alcanzar la mejor versión de uno mismo.

A mi madre Zory, por ser la luz que me guio hacia mi verdadera pasión; gracias por el orgullo de llamarme siempre “mi hija, la científica”. A mi padre, Fernando, y a mis hermanos, Antonio y Kevin, cuya fe constante en mis capacidades ha sido mi mayor fortaleza.

A mi amada hija que viene en camino: gracias por ser mi motor en la recta final de esta tesis y por acompañarme desde tu dulce espera hasta altas horas de la madrugada.

A mis amigos, los realitos, por ser mi refugio de risas y de felicidad en medio del esfuerzo. Y a mis queridos sobremesinos, por enseñarme que la ciencia también se construye tras pasar largas horas de sobremesa, compartiendo las frustraciones y los éxitos de cada experimento.

Para mi asesor, el Dr. Julián Cano, por ser un ejemplo de entrega y de vocación científica. Le agradezco el esfuerzo y la dedicación invertidos en la guía de este proyecto, pero, sobre todo, guardo una especial gratitud por haberme brindado su

confianza desde aquel primer verano de investigación: gracias por “adoptarme” como su estudiante y por abrirme las puertas en el camino de la ciencia.

A mis coasesores, el Dr. Pasiano Rivas y el Dr. Mitchel Abraham, por guiarme en sus respectivas líneas de investigación con tanta vocación y empeño. Además de sus valiosos consejos de vida, que guardaré con mucho aprecio.

Al Dr. Gerardo Flores, al Dr. Iván Santos y al Dr. Héctor Amezcuita por su apoyo y su labor como miembros de mi comité tutorial. Gracias por su orientación y guía en cada etapa de este proyecto.

Al Dr. Ángel Martínez, por ser un mentor excepcional. Gracias por transmitirme sus conocimientos sobre catálisis con tanta paciencia, acompañados de detalles curiosos y de una buena taza de café y chocolates.

Al Dr. Magín Lapuerta y al Dr. Laureano Canoira, por recibirme en la estancia de investigación de la Universidad de Castilla-La Mancha y brindarme su conocimiento y apoyo durante ella.

A la Dra. María Guadalupe, por ser un pilar fundamental en mis estudios de licenciatura. Gracias por su apoyo incondicional, por la dedicación que demostró durante todas las clases que me impartió y por estar siempre dispuesta a resolver mis dudas, por más pequeñas que fueran.

A mis alumnos de servicio social, por brindarme la oportunidad de compartir mi conocimiento con ustedes. Gracias por su disposición y ayuda en el laboratorio. Gracias, mi servicio social fav.

A la División de Estudios de Posgrados por la facilidad brindada en cuanto a la instalación, los equipos y el conocimiento.

A la Dirección de Intercambio Académico por brindarme la oportunidad y la facilidad para realizar mi estancia de investigación en España.

A SECIHTI por la beca otorgada.

RESUMEN

Heidy Ramos Malpica
Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ciencias Químicas

Título del estudio: Desarrollo de una nueva metodología para la producción de biocombustible marítimo a partir de lodos residuales.

Número de páginas: 127

Candidato al grado de Maestro en Ciencias con Orientación en Procesos Sustentables.

El transporte marítimo mueve alrededor del 80% de las mercancías a nivel mundial y contribuye con el 3% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera. Esta situación impulsa la producción de biocombustibles marinos (BM) como estrategia viable para mitigar las GEI. Estos biocombustibles pueden producirse a partir de aceites vegetales o de grasas residuales como los lodos de aguas residuales (LAR). Los LAR representan una alternativa como fuente de producción de BM debido a su alto contenido de ácidos grasos libres (AGL) del 60%. El BM puede ser producido por hidroprocesamiento de ácidos grasos y ésteres (HEFA por sus siglas en inglés) utilizando catalizadores heterogéneos, que sean selectivos hacia rutas de descarbonilación y/o descarboxilación. Para asegurar la viabilidad fisicoquímica de este biocombustible, sus propiedades deben contrastarse con los límites establecidos en la norma marítima vigente (ISO 8217:2017). No obstante, si se produce un biocombustible adecuado para motores marítimos, empleando materias primas residuales para su producción y

promoviendo la economía circular, es importante evaluar el impacto ambiental asociado a todo el proceso. En este sentido, el análisis de ciclo de vida (ACV) permite elucidar las cargas ambientales asociadas a este proceso de producción.

En la presente investigación se produjo bicomcombustible marítimo a partir de AGL, utilizando Al-MCM-41, Co/Al-MCM-41, Mo/Al-MCM-41 y W/Al-MCM-41 (al 3%, 5% y 10%) como catalizadores. Se determinaron y analizaron las propiedades fisicoquímicas del biocomcombustible obtenido, y se evaluó el cumplimiento de los límites establecidos por la norma marítima ISO 8217. Asimismo, el estudio incluyó la elucidación de los isómeros de hexanol como aditivos para verificar el cumplimiento de la normativa marítima. Finalmente, se completó este proyecto mediante un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de la producción del BM, con el objetivo de cuantificar el impacto ambiental asociado al proceso.

LISTA DE ABREVIATURAS

AGL: Ácidos grasos libres

BM: Biocombustible marino

CMD: Combustible marino destilado

DCO: Descarbonilación

DCO₂: Descarboxilación

FAMES: Ácidos grasos de metil ésteres

FT-SPK: Queroseno parafínico sintetizado mediante hidroprocesamiento Fischer-Tropsch

HDO: Hidodesoxigenación

HEFA: Hidroprocesado de ésteres y ácidos grasos

HFO: Fueloil pesado

HT: Hidrotratamiento

LAR: Lodos de agua residual

PC: Pirólisis catalítica

PTAR: Planta de tratamiento de aguas residuales

RK: Redlich Kister

SIP: Isoparafina sintética

CONTENIDO

RESUMEN	1
LISTA DE ABREVIATURAS	3
CONTENIDO	4
TABLAS	8
FIGURAS	10
1. INTRODUCCIÓN	14
2. ANTECEDENTES	22
2.1. Métodos de producción de biocombustibles de cadenas largas	22
2.2. Catalizadores selectivos para la obtención de cadenas largas de biocombustibles	25
2.3. Incorporación de aditivos en combustibles y biocombustibles	29
2.4. Evaluación de Impacto Ambiental	33
3. HIPÓTESIS, OBJETIVOS Y APORTACIÓN CIENTÍFICA	37
3.1. Hipótesis	37
3.2. Objetivos	37
3.2.1. Objetivo general	37
3.2.2. Objetivos específicos	37
3.3. Aportación científica	38

4. METODOLOGÍA.....	39
4.1. Materiales y equipo de laboratorio.....	40
4.2.1. Extracción y pretratamiento de ácidos grasos libres	42
4.2.2. Caracterización de ácidos grasos esterificados (biodiésel)	43
4.3. Síntesis y caracterización de catalizadores	44
4.3.1. Síntesis del soporte (Al-MCM-41)	44
4.3.2. Síntesis de los catalizadores: cobalto (Co), molibdeno (Mo) y tungsteno (W) soportados en Al-MCM-41	45
4.3.3. Caracterización de los catalizadores: cobalto (Co), molibdeno (Mo) y tungsteno (W) soportados en Al-MCM-41	46
4.4. Producción y caracterización del biocombustible marino (BM).....	48
4.4.1 Producción del biocombustible marino (BM)	48
4.4.2. Caracterización del biocombustible marino (BM)	50
4.5. Producción y caracterización de mezclas de biocombustible marino (BM) + aditivos a base de isómeros de hexanol	52
4.5.1. Producción del BM + aditivos a base isómeros de hexanol.....	52
4.5.2. Determinación de las propiedades fisicoquímicas del BM + aditivos a base de alcoholes	53
4.6. Propiedades de exceso y derivadas de las mezclas BM + aditivos.	54
4.6.1. Ajuste de las propiedades de exceso y derivadas para las mezclas BM+ isómeros hexanol	56

4.7. Análisis de Ciclo de Vida (ACV)	56
4.7.1. Definición de objetivo y alcance	57
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
5.1. Extracción de los ácidos grasos libres del lodo residual	59
5.1.1. Pretratamiento de la grasa: producción de biodiésel	60
5.2. Caracterización de catalizadores	60
5.2.1. Caracterización de la zeolita Al-MCM-41	60
5.3. Caracterización de los catalizadores: cobalto (Co), molibdeno (Mo) y tungsteno (W) soportados en Al-MCM-41	66
5.4.1. Producción de biocombustibles marino (BM)	81
5.5.2. Conversión de AGL a hidrocarburos lineales.....	84
5.5.2. Densidad de las mezclas de biocombustible marino e isómeros de hexanol.....	89
5.5.3. Viscosidad cinemática de las mezclas de biocombustible marino (BM) y sus mezclas con isómeros de hexanol	91
5.5.3. Índice de refracción de las mezclas de biocombustible marino (BM) y sus mezclas con isómeros de hexanol	93
5.5.4. Caracterización de las mezclas de biocombustible marino e isómeros de hexanol.....	95
5.7. Evaluación de impacto ambiental	104

5.7.1. Comparación del BM frente a la referencia internacional sobre combustibles fósiles.....	106
7. CONCLUSIONES.....	107
8. BIBLIOGRAFÍA	109

TABLAS

Tabla 1. Métodos de producción de biocombustibles de cadenas largas propuestos por otros autores.	25
Tabla 2. Recopilación de los catalizadores empleados en la producción de hidrocarburos de cadena larga.	29
Tabla 3. Reactivos de pureza y datos de identificación.	40
Tabla 4. Equipos utilizados y sus sedes.	41
Tabla 5. Clave de los experimentos: variar la relación biodiésel-catalizador y las temperaturas.	49
Tabla 6. Clave de experimentos variando catalizadores.	49
Tabla 7. Límites y métodos establecidos por la norma internacional ISO 8217:2017 para combustibles marinos destilados.	51
Tabla 8. Rendimiento del proceso de extracción de ácidos grasos mediante el método de jeringa.	59
Tabla 9. Perfiles de FAMES presentes en el biodiésel. ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 10. Composición de Al-MCM-41 obtenida mediante EDX.	65
Tabla 11. Comparación del tamaño promedio de cristalito (D) para cada fase óxida de los catalizadores con molibdeno y wolframio.	73
Tabla 12. Área superficial, volumen y tamaño de poro de todos los catalizadores sintetizados en este trabajo.	74
Tabla 13. Composición atómica y nominal de los catalizadores con cobalto y molibdeno obtenidos mediante análisis EDX.	80

Tabla 14. Comparación de las propiedades fisicoquímicas del BM y del CMD con sus límites establecidos en la norma ISO 8217:2017..... 87

Tabla 15. Resultados obtenidos sobre las propiedades fisicoquímicas de las mezclas BM + isómeros de hexanol y su comparación con la norma marítima.
.....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 16. Inventario de análisis de ciclo de vida.....**¡Error! Marcador no definido.**

FIGURAS

Figura 1. Metodología propuesta y su relación con los objetivos específicos de este trabajo.	39
Figura 2. Síntesis de Al-MCM-41.....	45
Figura 3. Etapas del análisis de ciclo de vida.	57
Figura 4. Diagrama de fronteras de ACV del proceso de producción de biocombustible marítimo.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 5. Difractograma de rayos X (DRX) de la zeolita Al-MCM-41 sintetizada en este trabajo.....	61
Figura 6. Isotherma de adsorción-desorción obtenida de la zeolita Al-MCM-41.....	62
Figura 7. Imagen SEM de la zeolita Al-MCM-41.....	63
Figura 8. SEM-EDX de la zeolita Al-MCM-41.	65
Figura 9. Perfil de temperaturas de reducción obtenido mediante TPR de los catalizadores.	67
Figura 10. Difractograma obtenido en ángulo bajo de los catalizadores con cobalto.	68
Figura 11. Difractograma obtenido a un ángulo bajo de los catalizadores con molibdeno.....	69
Figura 12. Difractograma obtenido a un ángulo bajo de los catalizadores con wolframio.	70
Figura 13. Difractogramas obtenidos de los catalizadores de cobalto, molibdeno y wolframio soportados en Al-MCM-41.	72

Figura 14. Micrografías SEM obtenidas de los catalizadores con Cobalto/Al-MCM-41.	77
Figura 15. Micrografías SEM de los catalizadores con Molibdeno/Al-MCM-41. ...	78
Figura 16. Micrografías SEM de los catalizadores de Wolframio/Al-MCM-41.	79
Figura 17. Rendimientos obtenidos al variar el porcentaje de carga de Al-MCM-41 en la producción de BM.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 18. Rendimientos obtenidos del efecto de la temperatura sobre la producción del BM.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 19. Rendimientos obtenidos en las reacciones de producción de BM con catalizadores de Co/Al-MCM-41.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 20. Rendimientos obtenidos en las reacciones de producción de BM con catalizadores de Mo/Al-MCM-41.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 21. Rendimientos obtenidos en las reacciones de producción de BM con catalizadores de W/Al-MCM-41.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 22. Distribución de las cadenas de hidrocarburos obtenidas mediante catalizadores de Co, Mo y W soportados en Al-MCM-41	¡Error! Marcador no definido.
Figura 23. Conversiones obtenidas variando relaciones biodiésel-catalizador	¡Error! Marcador no definido.
Figura 24. Conversiones obtenidas al variar el efecto de la temperatura.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 25. Conversiones obtenidas con catalizadores impregnados con Co, Mo y W al 3%, 5% y 10%, soportados en Al-MCM-41.....	¡Error! Marcador no definido.

Figura 26. Densidad de las mezclas: a) 2-etil-1-butanol, b) 1-hexanol, c) 4-metil-2-pentanol a diferentes temperaturas. ■, 288.15; ●, 293.15; ▲, 298.15; ▼, 303.15; ◆, 308.15; ◀, 313.15; ●, 323.15; ★, 328.15; ◆, 333.15; ●, 338.15.	90
Figura 27. Viscosidades de las mezclas: a) 2-etil-1-butanol, b) 1-hexanol, c) 4-metil-2-pentanol a diferentes temperaturas. ■, 288.15; ●, 293.15; ▲, 298.15; ▼, 303.15; ◆, 308.15; ◀, 313.15; ●, 323.15; ★, 328.15; ◆, 333.15; ●, 338.15.	92
Figura 28. Índices de refracción de las mezclas: a) 2-etil-1-butanol, b) 1-hexanol, c) 4-metil-2-pentanol a diferentes temperaturas. ■, 288.15; ●, 293.15; ▲, 298.15; ▼, 303.15; ◆, 308.15; ◀, 313.15; ●, 323.15; ★, 328.15; ◆, 333.15; ●, 338.15.	94
Figura 29. Comparación entre la densidad obtenida de las mezclas de BM+ isómeros de hexanol y el límite máximo establecido por la norma ISO 8217.	95
Figura 30. Comparación entre las viscosidades obtenidas de las mezclas de BM+ isómeros de hexanol y el límite máximo y mínimo establecido por la norma ISO 8217.	96
Figura 31. Comparación entre los valores experimentales de volumen en exceso molar (VE) y los calculados por el modelo de Redlich-Kister. a) 2-etil-1-butanol, b) 1-hexanol, c) 4-metil-2-pentanol a diferentes temperaturas. ■, 288.15; ●, 293.15; ▲, 298.15; ▼, 303.1; ◆, 308.15; ◀, 313.15; ●, 323.15; ★, 328.15; ◆, 333.15; ●, 338.15.	99
Figura 32. Comparación entre los valores experimentales de desviación de viscosidad ($\Delta\eta$) y los calculados por el modelo de Redlich-Kister. a) 2-etil-1-butanol, b) 1-hexanol, c) 4-metil-2-pentanol a diferentes temperaturas. ■, 288.15; ●, 293.15;	

▲, 298.15; ▼, 303.15; ◆, 308.15; ◀, 313.15; ●, 323.15; ★, 328.15; ◆, 333.15; ●, 338.15. 101

Figura 33. Comparación entre los valores experimentales de desviación del índice de refracción (Δn_D) y los calculados por el modelo de Redlich-Kister . a) 2-etil-1-butanol, b) 1-hexanol, c) 4-metil-2-pentanol a diferentes temperaturas. ■, 288.15; ●, 293.15; ▲, 298.15; ▼, 303.15; ◆, 308.15; ◀, 313.15; ●, 323.15; ★, 328.15; ◆, 333.15; ●, 338.15. 103

Figura 34. Diagrama de Sankey de la demanda energética de la producción del BM. ¡Error! Marcador no definido.

Figura 35. Evaluación de impacto ambiental del proceso de producción del BM evaluado es escenario de escala laboratorio en indicador de cambio climático (ICC). 105

Figura 36. Comparación del impacto ambiental entre el escenario estudiado, las regulaciones RED II y CORSIA y los combustibles fósiles. -, referencia RED II; -, referencia CORSIA. 106

1. INTRODUCCIÓN

El transporte marítimo, pilar del comercio mundial, representa el 80% del comercio internacional transportado y el 70% del valor comercial de los bienes. (El Transporte Marítimo, 2012). Desde 1960, esta industria ha dependido del fueloil pesado (HFO, por sus siglas en inglés), compuesto por extensas cadenas de hidrocarburos ($C_{>20}$), y el fueloil ligero (LFO), cuyas cadenas oscilan entre C_{20} - C_{70} , debido a su bajo costo y alta disponibilidad. No obstante, estos combustibles están compuestos por residuos pesados de refinería que concentran contaminantes como el azufre y los metales pesados. [2]. En consecuencia, el sector marítimo se ha convertido en un emisor de contaminantes antropogénicos, aportando cerca del 13% de las emisiones globales de óxidos de azufre (SO_x) y el 15% de óxidos de nitrógeno (NO_x) [3].

La magnitud de este impacto se ve amplificada por el volumen de actividad actual, lo que implica un consumo estimado de combustible en buques de entre 300 y 320 millones de toneladas (Mt) para el año 2022 [4]. Debido a esto, las proyecciones de la Organización Internacional Marítima (OMI) prevén un incremento de hasta un 250% en las emisiones de CO_2 para el año 2050 [5]. Ante este panorama, y en consonancia con los objetivos del Acuerdo de París, la Organización Internacional Marítima (OMI) ha definido una estrategia crítica para alcanzar la neutralidad climática en el sector. El objetivo central establece lograr cero emisiones netas de gases de efecto invernadero (GEI) para el año 2050, integrando puntos de control intermedios que aseguren reducir las emisiones totales de GEI en al menos un 20% para el 2030, con la ambición de alcanzar el 30% y el 70% para el 2040, tomando

como base los niveles registrados en 2008. La estrategia también enfatiza que para el año 2030, entre el 5% y el 10% de la energía utilizada por la flota marítima mundial debe provenir de tecnologías, combustibles o fuentes renovables con emisiones nulas o casi nulas. Estos compromisos han puesto al sector marítimo bajo la inspección y presión ambiental. [3]. [5].

La producción y uso de biocombustibles emergen como alternativa a los combustibles de origen fósil, para reducir la dependencia de estos y minimizar las emisiones (GEI) [6]. Entre las materias primas ideales en la producción de biocombustible marítimo (BM) se ha considerado biomasa de primera generación, como cultivos comestibles, y biomasa de segunda generación, como residuos forestales, agrícolas y desechos municipales [7].

Otro ejemplo de materia prima destacable son los lodos de aguas residuales (LAR), un subproducto generado en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), cuya disposición final representa aproximadamente el 50% de los costos operativos de una instalación convencional. Tradicionalmente, la gestión de estos residuos se limita al confinamiento en rellenos sanitarios; sin embargo, se han comenzado a explorar nuevas alternativas que permitan una gestión integral más sostenible [8]. La importancia de revalorizar los LAR radica en su composición, integrada principalmente por microorganismos, materia orgánica y materia no biodegradable. Además, poseen un alto contenido de ácidos grasos libres (aproximadamente 60%). Ante esto, los LAR tienen un valor estratégico para ser

transformados en materia prima de bajo costo, orientada a la producción de biocombustibles [9] [10].

Aunque la literatura describe múltiples rutas para la síntesis de biocombustibles, la investigación enfocada en la producción de biocombustibles tipo búnker sigue siendo escasa. No obstante, estudios recientes han identificado dos vías principales para la obtención de biocombustibles de cadena larga: pirólisis catalítica y el hidroprocesamiento.

El proceso de pirólisis catalítica (PC) se caracteriza por la descomposición térmica de la biomasa en un ambiente inerte, a presión atmosférica, en un rango de temperaturas de 300-800 °C. Esta técnica se destaca por elevados coeficientes de transferencia de calor y aceleradas tasas de calentamiento [11]. Si bien el proceso de PC alcanza altos rendimientos en la producción de líquidos con una composición rica en hidrocarburos, la selectividad hacia el rango búnker (C_{20} - C_{70}) es notablemente baja. En su lugar, los productos obtenidos se concentran mayoritariamente en la fracción de gasóleo (C_{14} - C_{20}), con proporciones menores destinadas a los rangos de gasolina (C_{8-11}), queroseno (C_8 - C_{16}) y presencia mínima de combustible en el rango búnker ($C_{>20}$) [12].

Por otro lado, el hidroprocesamiento ofrece una ruta alternativa que puede ejecutarse a distintos niveles de presión (2-10 Mpa) y en regímenes de temperatura considerablemente menores (280-350 °C). El biocombustible obtenido en este proceso destaca por su elevado índice de octano, lo que permite integrar sus fracciones como componentes de fueloil con bajo contenido de azufre en el sector del transporte marítimo. Sin embargo, este producto aún presenta desafíos

significativos, como alta densidad y elevado contenido de compuestos aromáticos, clasificando sus propiedades por debajo de los estándares exigidos en la normativa EN 590 [13]. El hidropocesamiento de ésteres y ácidos grasos (HEFA, por sus siglas en inglés) se posiciona actualmente como la ruta más consolidada para la obtención de biocombustibles [14].

La ruta HEFA permite aprovechar una amplia variedad de materias primas como: *i)* aceites vegetales, *ii)* aceite de cocina residual, *iii)* grasas animales y *iv)* ácidos grasos libres (AGL). Esto permite la conversión de ésteres y ácidos grasos en hidrocarburos lineales mediante la eliminación de átomos de oxígeno en presencia de hidrógeno (H_2) [15]. Los productos son predominantemente líquidos parafínicos libres de azufre y compuestos aromáticos con cadenas de carbono entre C_8 - C_{16} y C_8 - C_{22} [16] [9]. El alto contenido parafínico de estos biocombustibles confiere una estabilidad térmica superior en comparación con los combustibles convencionales. Además, debido a la baja tendencia de formar depósitos en los sistemas de combustible del motor a altas temperaturas, los vuelven clave para su implementación en el sector marino [17].

El proceso de conversión de ésteres y ácidos grasos en hidrocarburos se produce mediante tres vías de reacción principales: hidrodeshoxigenación (HDO), descarbonilación (DCO) y descarboxilación (DCO_2) [18]. El proceso HDO elimina oxígeno presente en los AGL mediante la formación de moléculas de H_2O , en temperaturas de 280-340°C y presiones de 5-10 MPa. Además, el HDO demanda condiciones de operación elevadas, lo que conlleva un alto consumo de insumos y energía. Por su parte, la DCO se desarrolla en condiciones más moderadas, con

temperaturas de 300-350 °C y presiones de 2-4 MPa, empleando una atmósfera menor de H₂. La limitación de H₂ provoca el consumo de átomos de carbono de los AGL, generando CO y H₂O como coproductos. Por su lado, la DCO₂ se caracteriza por desarrollarse en ausencia de H₂ bajo parámetros de presión y temperatura similares a la DCO en temperaturas de 300-350 °C y 2-4 MPa, en este caso, debido a la falta de hidrógeno, el oxígeno se remueve en forma de CO₂ [19].

Generalmente, estos procesos son mediados por un catalizador heterogéneo, destacando los metales nobles (Pt, Ru, Rh, Re), debido a su alta eficiencia. No obstante, investigaciones recientes han demostrado que el empleo de metales no nobles (Co, Mo, W, Cu, Zr) puede lograr rendimientos comparables, lo que mejora la viabilidad económica del proceso. Sin embargo, la actividad catalítica no depende exclusivamente del centro metálico, sino que el sitio ácido del soporte desempeña un papel determinante en la selectividad del producto final. Bajo este enfoque, el diseño de catalizadores bifuncionales (metal-soporte) permite potenciar la actividad catalítica y reducir significativamente el consumo de hidrógeno [14]. Si bien las zeolitas son reconocidas por sus propiedades versátiles como soportes, el aluminosilicato mesoestructurado Al-MCM-41 resulta de interés como soporte debido a sus características intrínsecas. Su notable área superficial de 858– 1200 m²/g, un tamaño de poro susceptible a modificación (2.27 nm) y la presencia de sitios ácidos de Brønsted. Dichas propiedades sugieren que Al-MCM-41 es un candidato idóneo para su uso en reacciones de hidrotratamiento, lo que favorece las rutas de DCO y DCO₂ [20]. La incorporación de materiales metálicos (Co, Mo,

W) en zeolitas mejora el rendimiento de la reacción; además, el uso de catalizadores bifuncionales favorece la actividad catalítica [21].

Sin embargo, a pesar del elevado potencial de los biocombustibles obtenidos mediante el hidrogenación HEFA, su implementación en motores de combustión interna enfrenta desafíos derivados de sus propiedades fisicoquímicas. Factores como una baja densidad energética, elevada tensión superficial y punto de inflamación que incumple con los rangos normativos impactan negativamente en el sistema de inyección, el rendimiento termodinámico y la estabilidad de combustión [22]. Asimismo, otras propiedades fisicoquímicas como la viscosidad, el punto de congelamiento y el índice de cetano suelen incumplir con los lineamientos mínimos y máximos establecidos por la norma estándar de combustibles destilados y residuales marinos ISO 8217-2017 [23]. En consecuencia, la incorporación de aditivos se presenta como una alternativa necesaria para restaurar y mitigar las diferencias fisicoquímicas entre las propiedades del biocombustible y el combustible marino de origen fósil [24].

En la literatura, se ha reportado el uso de aditivos basados en alcoholes de cadena corta, principalmente etanol e isopropanol, para mejorar las propiedades de los combustibles. Sin embargo, estos presentan desventajas como baja lubricidad, bajo número de cetano, alta temperatura de autoignición, alta energía de vaporización y problemas de solubilidad a altas concentraciones [25]. Como estrategia para mitigar las limitaciones asociadas a los alcoholes simples, se ha recomendado sustituirlos por alcoholes de cadena larga, como el 1-butanol, el alcohol isobutílico o el 2-

butanol. Estos alcoholes reducen la densidad y la viscosidad de los biocombustibles [26].

Asimismo, el estudio de alcoholes de cadena larga como el 1-hexanol, el 4-metil-2-pentanol y el 2-etil-1-butanol ha permitido corroborar una disminución significativa en la densidad, viscosidad, poder calorífico, y flash point de las mezclas [27]. Es relevante destacar que los valores de viscosidad cinemática obtenidos en dichas investigaciones cumplen estrictamente con los requisitos establecidos por la normativa internacional, demostrando que su incorporación permite mantener las propiedades críticas dentro de los estándares internacionales [28].

Actualmente, la literatura se ha enfocado principalmente en el estudio de aditivos para combustibles diésel y biodiésel; sin embargo, existe una brecha de conocimiento en la evaluación de aditivos para biocombustibles marítimos. Por lo anterior, resulta de interés científico el estudio de aditivos para biocombustibles marítimos que compensen las diferencias fisicoquímicas respecto de su homólogo fósil.

Si bien la producción de biocombustible marítimo puede representar una alternativa sustentable a los combustibles marinos, factores como la metodología y la materia prima empleadas en el proceso limitan su potencial de beneficio ambiental. Por ello, es necesario realizar una evaluación del impacto ambiental mediante el análisis de ciclo de vida (ACV). Esta metodología está reconocida por las Naciones Unidas como una herramienta estandarizada por la ISO 14040 y 14044, que se basa en el

concepto de ciclo de vida del producto para evaluar el impacto ambiental desde la obtención de materias primas hasta su disposición final [29].

Además, la realización de este tipo de estudios constituye una estrategia que permite estimar los requerimientos de masa y energía a una escala mayor, proporcionando la información necesaria para el análisis de impacto ambiental de los nuevos procesos previo a su instalación en campo. Este tipo de análisis permite la proposición e implementación de alternativas de eco-concepción relacionadas con el diseño de la planta y diferentes mejoras del proceso [30].

Este proyecto se centra en la producción de biocombustible marítimo a partir de lodos residuales provenientes de la Planta de Tratamientos de Agua Residual (PTAR) de Nuevo León, mediante el proceso de hidroprocesamiento HEFA, utilizando catalizadores de Co, Mo y W soportados en Al-MCM-41. Además, se analiza la influencia de la adición de los isómeros de hexanol (1-hexanol, 2-etil-1-butanol y 4-metil-1-pentanol) sobre las propiedades fisicoquímicas del biocombustible. Con el objetivo de evaluar el impacto ambiental asociado.

2. ANTECEDENTES

2.1. Métodos de producción de biocombustibles de cadenas largas

En la última década, el desarrollo de los biocombustibles ha logrado diversificar tanto las materias primas como las rutas de producción, consolidando su viabilidad frente a los combustibles de origen fósil. No obstante, este desarrollo se ha centrado principalmente en la obtención de biodiésel y de combustibles sostenibles para la aviación (SAF). Esta tendencia ha dejado en segundo plano la producción y mejoramiento de biocombustibles tipo búnker, representando una limitación crítica para la descarbonización del transporte marítimo [31].

En la literatura, recientemente se han propuesto diversas rutas de producción de biocombustibles con rangos específicos de cadenas de hidrocarburos.

Asnadi et al (2020) buscaron sintetizar combustibles con cadenas (C_8 - C_{16}) a partir de aceite de coco mediante hidrodeshidrogenación (HDO) e hidroisomerización (HDI). Los autores reportaron una distribución predominante de hidrocarburos en el rango C_{10} - C_{14} , con un rendimiento líquido del 76.1%. [32].

De igual manera, Summers et al. (2025) desarrollaron una vía para convertir bioaceite derivado de residuos alimentarios en combustibles con rangos de cadenas (C_8 - C_{16}) mediante un hidrotratamiento de una sola etapa. A rangos de temperaturas de 250-340 °C y de 350-400 °C, estableciendo una presión constante de 40 bar. Obtuvieron rendimientos del 84.7% en productos líquidos. Asimismo, evidenciaron que el incremento de la temperatura favorece las reacciones de isomerización y de craqueo, lo que modifica la distribución de hidrocarburos e incrementa la presencia

de cicloalcanos, isoalcanos y compuestos aromáticos. Observaron un mayor rendimiento del aceite y una mejora en la distribución de fracciones, con un 40% de compuestos en el rango C₈-C₁₆, un 20% en el rango C₁₇-C₂₀ y un 10% en cadenas superiores a C₂₀ [33].

Por su parte, Contretas-Vázquez et al. (2025) realizaron la producción de un biocombustible con un rango de hidrocarburos de C₈-C₁₆ a partir de AGL provenientes de LAR. Emplearon el proceso HEFA a 300 °C y 20 bar de presión de reacción durante 5 h, en atmósfera de 100% de N₂. Obtuvieron un rendimiento del 57% en el biocombustible líquido [34].

No obstante, la producción de un biocombustible respetuoso con el medio ambiente que integre las propiedades fisicoquímicas exigidas por la normativa marítima ISO 8217 para combustibles marinos destilados (CMD) para motores de alta y baja velocidad aún no se ha explorado lo suficiente. Un estudio reciente de Eremeeva et al. (2025) propone sustituir el diésel fósil por biodiésel derivado de aceite de maíz, ya que sus propiedades son similares a los indicadores de calidad de la fracción de diésel compatible con motores marinos. Estudiaron la reacción de transesterificación de aceites comestibles no alimentarios con alcoholes monoatómicos, a presión atmosférica en un rango de 70-75 °C. A pesar de que las propiedades tipo búnker y los parámetros críticos fueron similares, la densidad energética sigue siendo reducida. Los autores atribuyen el comportamiento a la composición del producto, que consiste en una mezcla de ésteres de ácidos grasos en el rango de C₁₆ - C₁₉ [35].

Asimismo, destaca la investigación de Victoria Víctor-Soares (2022), quien evaluó la viabilidad de diversas reacciones de pirólisis empleando aceite de ricino. Realizaron el proceso a 350 °C durante 4 h, lo que permitió alcanzar rendimientos del 80.3% en la fracción de hidrocarburos tipo queroseno con cadena media (C₁₄-C₁₈), complementados con un 9.5% en presencia de cadenas largas (C₁₉-C₂₅), del rango típico de fueloil ligero, consolidando la eficiencia térmica del método propuesto. [12].

El análisis de estos antecedentes evidencia que persiste una brecha en la investigación sobre la producción de biocombustible marino (C₂₀-C₇₀), debido a la carencia de estudios centrados en el hidroprocesamiento de ácidos grasos recuperados de LAR para su obtención, aun cuando se han logrado avances significativos en la optimización del hidroprocesamiento. Esta oportunidad de investigación constituye el punto de partida del presente estudio. Sin embargo, para que esta vía de valorización sea técnicamente viable, no basta con definir los parámetros generales de operación. Se exige la implementación de sistemas catalíticos altamente selectivos que permitan orientar las reacciones hacia la obtención eficaz de hidrocarburos específicos. En este contexto, resulta fundamental analizar el papel de los catalizadores y cómo sus propiedades influyen en la eficiencia del hidroprocesamiento y en la selectividad de las cadenas de hidrocarburos (C₁₆-C₂₂), tema que se aborda a continuación. Los métodos, condiciones operativas y rendimientos reportados en la literatura para la producción de biocombustibles de cadena larga se sintetizan en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Métodos de producción de biocombustibles de cadenas largas propuestos por otros autores.

MATERIA PRIMA	MÉTODO DE PRODUCCIÓN	CONDICIONES DE OPERACIÓN	RENDIMIENTO (%)	AUTOR
ACEITE DE COCO	HDO HDI	NA	76.1	Asnadi et al., (2020)
BIOACEITE DE RESIDUOS ALIMENTARIOS	HDO	40 bar de H ₂ 350 – 400°C	84.7	Summers et al., (2025)
ÁCIDOS GRASOS DE LODO RESIDUAL	HEFA	20 bar de N ₂ 300°C	57%	Contreras-Vázquez et al., (2025)
ACEITE DE MAÍZ	Transesterificación	70-75 °C	NA	Eremeeva et al., (2025)
ACEITE DE RICINO	Pirólisis catalítica	350°C – 4h	80.3%	Victória Victor-Soares (2022)

2.2. Catalizadores selectivos para la obtención de cadenas largas de biocombustibles

En la actualidad, el empleo de diversos catalizadores es fundamental para la producción de biocombustibles, ya que optimizan las reacciones, incrementan la selectividad y mejoran los rendimientos del proceso.

García-Dávila et al. (2014) evaluaron la implementación de catalizadores comerciales de hidrodesulfuración (HDS), CoMo/Al₂O₃ y NiMo/Al₂O₃, utilizando aceite vegetal como materia prima. Los resultados mostraron conversiones de hasta el 65%, destacando una notable producción de hidrocarburos en el rango diésel (C₁₂-C₂₆). Aunque los autores no observaron una selectividad específica, se

determinó que el catalizador de NiMo favorece el rendimiento de hidrocarburos, mientras que el catalizador CoMo promueve la formación de compuestos saturados al incrementar la temperatura del proceso [36]

Por otra parte, las zeolitas, que son sólidos porosos cuya composición principal es de aluminosilicatos, han sido empleadas en diversas reacciones catalíticas debido a su estructura porosa y a sus canales geométricos específicos [37]. Dentro de esta categoría, las zeolitas microporosas destacan por su alta acidez y selectividad en la obtención de hidrocarburos lineales (C_{8-16}), lo que evidencia una actividad excepcional en la conversión de AGL. Variantes como la USY y HZSM-5 se aplican con frecuencia en procesos de craqueo; suelen presentar limitaciones, alcanzan altos rendimientos de gas y tienden a desactivarse rápidamente debido a la formación de coque, lo que reduce significativamente la obtención del producto líquido deseado [38]. Por el contrario, los materiales mesoporosos, como la Al-MCM-41, han demostrado ser más aptos para la conversión de moléculas de AGL de gran tamaño, ya que su estructura ofrece una mayor accesibilidad a los poros y una mayor selectividad hacia productos líquidos, lo que se traduce en una mejora frente a las restricciones disfuncionales de los materiales microporosos tradicionales [39]. En este contexto, Twaig et al. (2003) estudiaron la funcionalidad del tamiz molecular mesoporoso MCM-41 en reacciones de craqueo de aceite de palma, encontrando que este material muestra alta selectividad para el craqueo catalítico, específicamente en la formación de hidrocarburos lineales (C_{13}). El estudio realizado a 450 °C y bajo presión atmosférica reveló que el rendimiento máximo del producto líquido fue del 52%, con un área superficial de 513 m²/g,

mientras que dicho rendimiento disminuyó hasta un 25% al aumentar el área superficial. Asimismo, los autores observaron que la selectividad para la gasolina aumentó con el incremento del área superficial, mientras que la del diésel disminuyó la conversión, destacando que la selectividad específica de los hidrocarburos líquidos dependía estrechamente del tamaño de poro y del área superficial del catalizador. Además, se observó la formación de coque sobre este catalizador durante la reacción [40]. Cabe destacar que la funcionalización de zeolitas mesoestructuradas, como Al-MCM-41, mediante la incorporación de metales nobles, de transición o de transición interna, permite modular su desempeño catalítico y fortalecer su estabilidad. Diversas investigaciones sugieren que la incorporación de metales de transición potencia las propiedades de hidrogenación y deshidrogenación del material; paralelamente, este tipo de dopaje incrementa el número de sitios ácidos y mejora la estructura de la zeolita [41].

Wang et al. (2021). Optimizaron la producción de hidrocarburos mediante el craqueo catalítico del ácido oleico a 400 °C, empleando el soporte mesoporoso Al-MCM-41 incorporado con metales de transición (La, Ni, P, Zr y Ce). Los resultados confirmaron que, cada dopante aportó beneficios específicos al proceso, el catalizador de P/Al-MCM-41 destacó por obtener el mayor rendimiento desoxigenante gracias a su alta acidez de Brønsted, logrando un 82.3% de hidrocarburos totales y un 64% en el rango diésel (C₁₀-C₁₈) con una eliminación total de AGL por su parte, el Ni/Al-MCM-41 sobresalió por su capacidad de deshidrogenación y desoxigenación con un 63% de selectividad hacia el rango diésel, mientras que las adiciones de Zr y Ce favorecieron la actividad

desoxigenante mediante la formación de óxidos metálicos oxófilos, alcanzando niveles del 60-61%. Asimismo, el dopado con La presentó una notable resistencia a la formación de coque, manteniendo un 56% de hidrocarburos en la fracción de interés. En conjunto, la alta área superficial y la distribución de sitios ácidos de estos materiales permitieron conversiones de hasta el 90% [42].

En la misma línea, Victoria Victór – Soares (2022) sintetizó la zeolita Al-MCM-41 mediante la incorporación de metales activos (Ni, Mo y NiMo) para evaluar su desempeño catalítico en la pirólisis de aceite de ricino a 350 °C. A pesar de la funcionalidad metálica, los resultados revelaron una posible deficiencia en la estabilidad de los catalizadores dopados. Mediante un análisis cinético, los autores determinaron que la energía de activación más baja se obtuvo con el catalizador Al-MCM-41. Por el contrario, la presencia de níquel y molibdeno incrementó la energía de activación de la reacción. Los autores atribuyen este suceso a una probable obstrucción de los poros del soporte, debida a la aglomeración de las fases metálicas durante el proceso de impregnación. En cuanto a la selectividad obtenida, el catalizador Al-MCM-41 alcanzó rendimientos máximos del 80.3% hacia hidrocarburos en el rango C₁₄-C₁₈ y un 9.5% en el rango C₁₉-C₂₅. El catalizador bimetalico MoNi/Al-MCM-41 mostró un rendimiento inferior, obteniendo un 78.2% para el rango C₁₄-C₁₈ [12].

La Tabla 2 presenta la recopilación de los catalizadores empleados en la producción de hidrocarburos de cadena larga.

Tabla 2. Recopilación de los catalizadores empleados en la producción de hidrocarburos de cadena larga.

MATERIA PRIMA	CATALIZADOR	CONDICIONES DE REACCIÓN	RENDIMIENTO	SELECTIVIDAD	AUTOR
ACEITE VEGETAL	CoMo/Al ₂ O ₃	350°C	69.9%	C ₁₂ -C ₂₆	García-Dávila et al., (2014)
	NiMo/Al ₂ O ₃		68%		
ACEITE DE PALMA	MCM-41	450°C	52%	C ₁₃	Twaig et al., (2003)
ÁCIDO OLEICO	P/Al-MCM-41	400°C	64%	(C ₁₀ -C ₁₈)	F. Wang et al., (2021)
ACEITE DE RICINO	Al-MCM-41	350°C	80.3%	C ₁₄ -C ₁₈	Victória – Victor Soares (2022)

2.3. Incorporación de aditivos en combustibles y biocombustibles

A pesar de que diversos investigadores respaldan la viabilidad de las mezclas diésel-biodiésel, su uso se limita a sustituciones parciales debido a deficiencias técnicas, como baja estabilidad oxidativa, elevado punto de fluidez, bajo rango de viscosidad y densidad, y puntos flash incompatibles. Esta deficiencia es aún más notable en el sector marítimo, donde la investigación sobre los biocombustibles y su interacción con los combustibles convencionales sigue siendo insuficiente.

Aunque los biocombustibles poseen un alto potencial, siguen enfrentando desafíos críticos que obstaculizan su implementación en motores de combustión interna. Según Vargas-Ibáñez et al. (2018), propiedades como una baja densidad energética, una elevada tensión superficial y un punto de inflamación fuera de los

rangos normativos afectan negativamente al sistema de inyección, al rendimiento del motor y a la estabilidad de la combustión [22]. En respuesta a estas limitaciones, estudios como el de Asnadi et al. (2020) han caracterizado mezclas de biocombustibles (C_{10} - C_{14}) con queroseno al 2%, 5% y 10% v/v, evaluando parámetros fundamentales. Los resultados mostraron que tanto la densidad a 15 °C como el índice de acidez total (TAN) se mantuvieron dentro de los rangos establecidos por la norma SIN:8674. Sin embargo, el punto de congelamiento exhibió un comportamiento crítico con valores entre 7.15 y 8.0 °C, excediendo el límite máximo permitido. Por otro lado, el punto de inflamación fue registrado en 44.8 °C, ligeramente por encima del estándar. Los autores concluyeron que todas las mezclas cumplieron con la Norma de Defensa probada de Biocombustibles de Aviación 91-91 en todos los parámetros [32].

Asimismo, (Vozka et al. (2019) realizaron mezclas con Jet A y cuatro diferentes biocombustibles sintéticos producidos por (FT-SPK, HEFA, SIP y ATJ). Midieron las principales propiedades fisicoquímicas, la densidad, el punto de inflamación, la viscosidad, y el punto de congelamiento. Las mezclas se realizaron al 100%, 95%, 90%, 85%, 80%, 70%, 60%, 50% y 40% v/v respecto del Jet A para cada uno de los biocombustibles sintetizados. Los valores de densidad obtenidos no cumplieron con el límite mínimo establecido (0.775 a 0.840 g/cm³) por la norma ASTM D7566, esto es atribuido directamente a la ausencia de compuestos aromáticos en la composición de los biocombustibles. A -20 °C, todas las mezclas cumplieron con el límite máximo de 8 mm²/s establecido por la normativa. No obstante, se registraron variaciones significativas entre los biocombustibles; la viscosidad del SIP (13.72

mm²/s) fue notablemente superior a la de FT-IPK (3.44 mm²/s), HEFA (5.20 mm²/s) y ATJ (5.23 mm²/s). Resulta relevante destacar que, aunque FT-IPK, HEFA y ATJ mostraron densidades similares, la viscosidad de FT-IPK fue un 30% menor que la de los demás; los autores atribuyen este fenómeno principalmente a su composición química: mientras que HEFA y ATJ están constituidos mayoritariamente por isoparafinas, FT-IPK presenta un alto contenido de n-parafinas.

El análisis del punto de congelamiento reveló que las mezclas de SIP, ATJ y FT-IPK estuvieron por debajo del límite establecido por la norma, con valores inferiores a -70 °C debido a su nula concentración de n-parafinas. Por otro lado, HEFA mostró un punto de congelamiento de -55 °C debido a su cantidad insignificante de compuestos parafínicos (8.53%). No obstante, los autores destacan que todos los resultados se sitúan significativamente por debajo de los límites máximos establecidos por la normativa ASTM para la aviación, que exige un máximo de -40 °C para el combustible Jet A y de -47 °C para el Jet A-1. Los resultados del punto de inflamabilidad de las mezclas con biocombustible mostraron un incremento lineal progresivo que comenzó con el FT-IPK, seguido del HEFA y del ATJ, mientras que el punto de inflamabilidad del SIP no pudo determinarse experimentalmente. Se observó que los valores de inflamabilidad para el FT-IPK y el HEFA resultaron similares entre sí, 43.96 y 44.55 °C, registrando una diferencia de apenas 1 °C, mientras que la totalidad de los valores obtenidos para las mezclas se situó en un rango comprendido entre 43 °C y 48 °C. Debido a este comportamiento, los biocombustibles con puntos de inflamación inferiores a los del Jet A,

específicamente FT-IPK y HEFA, provocaron una disminución del punto de inflamación final de sus respectivas mezclas [43].

Ante las limitaciones presentadas por diversos autores sobre las propiedades fisicoquímicas de las mezclas binarias (biocombustible – combustible fósil) reportadas. Se propone integrar alcoholes para su evaluación como aditivos. Con la finalidad de mitigar las diferencias actuales entre los biocombustibles y los límites establecidos por las normas ASTM.

Imdadul et al. (2016) destacan el potencial de los alcoholes de cadena corta, como el metanol y el etanol, al incorporarlos como aditivos en mezclas de biocombustibles. Sin embargo, hasta el momento su implementación presenta desafíos críticos que dificultan el cumplimiento de la norma EN 590. Entre sus principales deficiencias se encuentran su baja lubricidad, una solubilidad restringida en concentraciones elevadas y una reducción significativa del índice de cetano [44]. Para superar estos inconvenientes, se propone sustituirlos por alcoholes de cadena larga. Diversos autores confirman que la mezcla de estos alcoholes con biocombustibles permite que propiedades como la tensión superficial, la densidad y la viscosidad se mantengan dentro de los límites establecidos por la norma [28].

Vargas-Ibañez et al. (2018) realizaron un análisis termodinámico entre 288.15 K y 388.15 K de mezclas binarias de biodiésel con 1-pentanol, 2-pentanol y 2-metil-1-butanol. En cuanto al cumplimiento de la norma europea EN 590, las densidades se ajustaron a los límites de 0.82 a 0.845 g·cm⁻³ (a 288.15 K) en fracciones de masa de alcohol de 0.5 a 0.8 mm²·s⁻¹ (a 313.15 K) [45].

Vargas-Ibáñez et al. (2020) extendieron el análisis de los alcoholes de cadena larga como aditivos, evaluando el comportamiento de mezclas a presión atmosférica (288.15 K – 388.15 K). Se observó una disminución lineal de la densidad con el aumento de la temperatura. En términos de cumplimiento normativo (EN 590), las densidades se ajustaron a los límites establecidos para las fracciones de masa de alcohol de 0.6 a 1.0 para el 1-hexanol, de 0.5 a 0.8 para el 4-metil-2-pentanol y de 0.8 a 1.0 para el 2-etil-1-butanol. La viscosidad cinemática cumplió los estándares en todas las mezclas, presentando valores óptimos en el rango de 0.4 a 0.9 según el aditivo [28].

Estos hallazgos ratifican la viabilidad de implementar alcoholes de cadena larga como aditivos y demuestran que su incorporación permite mantener las propiedades críticas dentro de los estándares internacionales.

2.4. Evaluación de Impacto Ambiental

A pesar de que se han evaluado diversos métodos de síntesis y una amplia gama de materias primas para la obtención de biocombustibles, la optimización de estos procesos no garantiza una reducción efectiva del impacto ambiental en comparación con los combustibles de origen fósil. En este contexto, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) emerge como una herramienta metodológica y estandarizada para cuantificar los impactos ambientales. Sin embargo, existe un vacío en la literatura sobre ACV que evalúe la producción y el uso de biocombustibles en el sector marítimo. Por consiguiente, la presente investigación se centra en el ACV de diversos biocombustibles.

Wahyono et al. (2022) realizaron un ACV comparativo para la producción de 1 tonelada de biodiésel. El estudio determinó que el aceite de palma es una buena opción sostenible, con un impacto de 1840 kg de CO₂ eq, en comparación con los valores de la soja (2172 de Co₂ eq), aceite de canola (2252 de CO₂ eq) y girasol (2475 kg de CO₂ eq). La ventaja del aceite de palma puede radicar en un menor consumo de urea 86.5 kg en comparación con otras oleaginosas (144 kg), lo que minimiza las emisiones de N₂O [46]. Asimismo, Gupta et al. (2022) evaluaron el impacto ambiental de la producción de biodiésel a partir de aceite de colza en el Reino Unido; contrastaron los sistemas a gran escala >50,000 tBD/año en comparación con pequeñas escalas <50,000 tBD/año. Los autores destacan que el cultivo de la materia prima y el proceso de transesterificación del biodiésel constituyen las etapas críticas del consumo energético. En cuanto al impacto climático, la eficiencia económica de escala resultó determinante; el Potencial de Calentamiento Global (PCA) para los sistemas de gran escala fue de 2.63 t de CO₂ eq, mientras que la pequeña escala presentó una huella superior de 2.89 t de CO₂ eq [47]. Por otra parte, Wang et al. (2024) realizaron un análisis de ciclo de vida (ACV) de la producción de biocombustible para aviación a partir de tallos de maíz residuales, una materia prima no competitiva en términos de tierras de cultivo. Seleccionaron una unidad funcional de 1 MJ; el estudio integró las fases agrícolas, de producción y de utilización. La etapa agrícola abarcó desde la siembra hasta el transporte, considerando insumos como agroquímicos y combustibles, con datos de emisiones de la Oficina Nacional de Estadística de China (2019). Para la fase de producción, emplearon Aspen Plus para simular el inventario de emisiones desde la preparación de precursores hasta la hidrogenación. El procesamiento de impactos

ambientales se realizó con el software eBalance. El estudio destacó una reducción beneficiosa del Potencial de Oxidantes Fotoquímicos (POCP), con valores de 0.00781 g, 0.00678 g y 0.0057 g de C_2H_3 eq/MJ. Los autores atribuyen estos resultados a la eficiencia energética del biocombustible y a la menor demanda de aire durante la combustión de los residuos [48] .

Saad et al. (2024) llevaron a cabo la evaluación del ciclo de vida y un análisis económico con el fin de determinar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la demanda energética, la ocupación del suelo, el agotamiento del agua y el costo de producción de combustible sintético para la aviación en Suiza. El estudio evaluó tres procesos de síntesis de metanol utilizando agua y CO_2 atmosférico o biomasa, revelando que la hidrogenación directa de CO_2 a metanol presenta las mayores reducciones en emisiones de GEI, alcanzando casi un 50% en comparación con el combustible convencional, además de registrar el menor costo de producción, de 7.86 EUR $kgJF^{-1}$. A pesar de estos beneficios ambientales, este costo resulta ser aproximadamente siete veces mayor que el de su contraparte derivada del petróleo. La investigación subraya que la energía eléctrica es el factor crítico para la captura de CO_2 y la conversión de agua en hidrógeno, y representa el 79% de la demanda eléctrica total. En consecuencia, los autores observaron variaciones significativas en los costos y emisiones al alternar entre fuentes de electricidad de distintos países, y concluyeron que la escalabilidad de estos combustibles depende de cadenas de suministro eficientes, capacidad energética de baja emisión de carbono, políticas climáticas sólidas y análisis ambientales exhaustivos [49] .

3. HIPÓTESIS, OBJETIVOS Y APORTACIÓN CIENTÍFICA

3.1. Hipótesis

- La implementación de catalizadores heterogéneos (Mo, Co y W) soportados en Al-MCM-41 favorecerá la producción de un biocombustible marítimo (C₁₆-C₂₂), como sustituto parcial del combustible fósil marino, obtenido a partir de lodos de agua residual.
- La producción de biocombustible marítimo tendrá un impacto ambiental menor o igual al establecido de las normas internacionales (RED II) para biocombustibles.

3.2. Objetivos

3.2.1. Objetivo general

Desarrollar una nueva metodología para la producción de biocombustible marítimo a partir de ácidos grasos provenientes de lodos residuales mediante HDT, implementando catalizadores de Mo, Co y W soportados en Al-MCM-41. Elucidando el efecto de la incorporación de aditivos en el biocombustible producido, así como evaluando el impacto ambiental del proceso mediante la metodología ACV.

3.2.2. Objetivos específicos

- Extraer y caracterizar los ácidos grasos libres presentes en los lodos
- Sintetizar y caracterizar los catalizadores de Co, Mo y W soportados en Al-MCM-41.
- Sintetizar y caracterizar el biocombustible marítimo mediante HDT.

- Elucidar el efecto de las propiedades fisicoquímicas del biocombustible obtenido mediante la incorporación de los aditivos: 1-hexanol, 2-etil-1-butanol y 4-metil-1-pentanol.
- Evaluar el impacto ambiental del proceso de producción del biocombustible marítimo mediante el ACV.

3.3. Aportación científica

- Propuesta de una nueva metodología para producir biocombustible marítimo a partir de lodos residuales mediante catalizadores a base de Mo, Co y W soportados en Al-MCM-41.
- Elucidación del efecto de los aditivos 1-hexanol, 2-etil-1-butanol y 4-metil-1-pentanol sobre las propiedades fisicoquímicas del biocombustible marítimo.
- Disponer de la evaluación del impacto ambiental del proceso de producción del biocombustible marítimo.

4. METODOLOGÍA

Este capítulo detalla los procedimientos y materiales propuestos que fundamentan la elaboración de este proyecto, con el fin de cumplir los objetivos generales y específicos planteados. La Figura 1 esquematiza las 5 etapas que integran la metodología de esta investigación. La que se explicará detalladamente en las secciones posteriores (4.2 – 4.5).

La disposición de los residuos generados en las distintas etapas de la metodología se realizó conforme a los lineamientos establecidos por el Departamento de Medio Ambiente y Seguridad de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

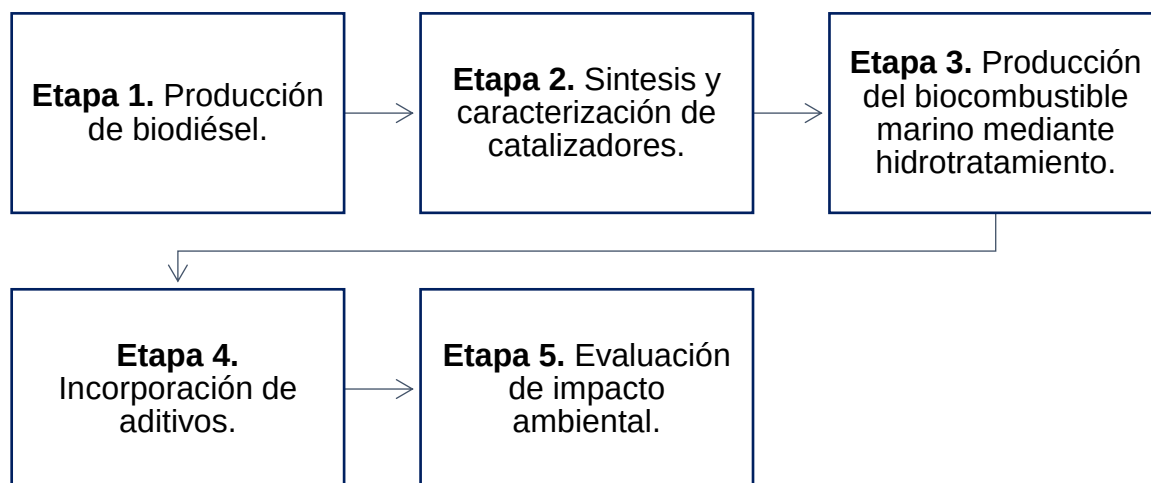


Figura 1. Metodología propuesta y su relación con los objetivos específicos de este trabajo.

4.1. Materiales y equipo de laboratorio

La producción del BM se llevó a cabo a partir del biodiésel obtenido a partir de la esterificación-transesterificación (de un solo paso) de los AGL presentes en los LAR. Los LAR se recolectaron en la planta de tratamiento de Agua y Drenaje del Noroeste de Monterrey, México. Las especificaciones de los reactivos utilizados, con su pureza y datos de identificación, se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Reactivos de pureza y datos de identificación.

REACTIVOS	PUREZA (FRACCIÓN MASA)	MARCA	NO. CASS
TETRAETILORTOSILICATO	0.98	Sigma-Aldrich	70-10-4
BROMURO DE HEXADIMETRILCETILAMONIO	0.98	Sigma-Aldrich	57-09-0
CAOLÍN	NA	Sigma-Aldrich	1332-58-7
HEPTAMOLIBDATO DE AMONIO TETRAHIDRATADO	NA	Sigma-Aldrich	12054-85-2
ÓXIDO DE TUNGSTENO (IV)	0.99	Sigma-Aldrich	12036-22-5
NITRATO DE COBALTO HEXAHIDRATADO	0.99	Sigma-Aldrich	10026-22-9
ESTÁNDAR DE ALCANOS DE CALIBRACIÓN (C ₈ -C ₄₀)	NA	Sigma-Aldrich	4945-7

Los equipos utilizados, especificaciones técnicas y las sedes donde se encuentran localizados se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4. Equipos utilizados y sus sedes.

EQUIPOS	SEDES
DIFRACTÓMETRO DE RAYOS-X D2-PHASE.	Laboratorio de combustibles y motores ETSII – Universidad de Castilla-La Mancha.
CROMATÓGRAFO DE GASES VARIÁN 3350 CON FID Y TCD.	Laboratorio de reactores FCQ – División de Estudios de Posgrado.
EQUIPO DE FISISORCIÓN-MICROMETRICS TRISTAR II SYSTEM.	Laboratorio de materiales II FCQ – División de Estudios de Posgrado:
DENSÍMETRO DE TUBO VIBRANTE DMA 5000 ANTONPAAR.	Laboratorio de fisicoquímica FCQ – División de Estudios de Posgrado.
VISCOSÍMETRO CANNON-FENSKE.	Laboratorio de fisicoquímica FCQ – División de Estudios de Posgrado.
MUFLA THERMO SCIENTIFIC THERMOLYNE FB1410M-33.	Laboratorio de fisicoquímica FCQ – División de Estudios de Posgrado.
REFRACTÓMETRO ABBEMAT 300 PENSKEY-MARTENS DE COPA CERRADA-K16203.	Laboratorio de fisicoquímica FCQ – División de Estudios de Posgrado.
REACTOR BATCH DE ALTA PRESIÓN AMAR.	Laboratorio de fisicoquímica FCQ – División de Estudios de Posgrado.
MICROSCOPIO ZEISS GEMINISEM 500	Laboratorio de química ETSIM – Universidad Politécnica de Madrid.

4.2. Extracción, pretratamiento y caracterización de ácidos grasos libres

A continuación, se detallan las metodologías experimentales a lo largo de las cinco fases de este proyecto.

4.2.1. Extracción y pretratamiento de ácidos grasos libres

Siguiendo el planteamiento de la metodología propuesta por Moreno-Caballero (2023). El procedimiento comenzó con el calentamiento y el filtrado de la muestra (tamiz de 500 μm). Posteriormente, el lodo se mezcló con una solución acuosa de ácido sulfúrico al 6% v/v (en una relación 1:1) y se calentó a 80 °C durante 60 minutos. Tras pasada la hora de sedimentación, se observó la separación de los componentes contenidos en la mezcla de lodos en tres estratos, la fase superior constituida por ácidos grasos libres (AGL), la fase intermedia compuesta por materia orgánica y en la fase inferior o sedimento se concentraron sales metálicas. Este proceso permitió aislar los AGL para su posterior caracterización. Para la extracción de los AGL, se empleó el método de separación por jeringa bajo condiciones de temperatura controladas. Una vez alcanzada una temperatura de 80 °C en la mezcla, se extrae cuidadosamente la capa superior [27].

Utilizando los AGL previamente extraídos, se empleó la producción de biodiésel para su uso posterior como materia prima en la síntesis del biocombustible marítimo. Este se llevó a cabo siguiendo la metodología propuesta por Contreras- Vázquez et al. (2024) [9].

La producción de biodiésel se llevó a cabo en un sistema por lotes (discontinuo) empleando un matraz de bola; se añadieron metanol, grasa y disolvente eutéctico profundo compuesto por cloruro de colina y ácido tolueno sulfónico (ChCl:PTSA) (DES) como catalizador, manteniendo una relación molar de 10:1 Mp-Catalizador. El proceso se realizó a 60 °C con una agitación de 350 rpm durante 4 horas. Una vez finalizada la reacción, el biodiésel se purificó mediante decantación y lavados

con agua destilada para eliminar restos de metanol, catalizador y el glicerol generado.

4.2.2. Caracterización de ácidos grasos esterificados (biodiésel)

La composición del biodiésel obtenido se determinó mediante cromatografía de gases (GC) con detector de ionización de flama (FID). Se empleó una columna capilar Stabilwax GC column (30 m x 0.32 mmID x 0.25 μ m) para la separación e identificación de compuestos. Las condiciones cromatográficas consistieron en una temperatura inicial de la columna de 40 °C y una rampa de calentamiento de 2 °C/min hasta 220 °C. Las temperaturas del inyector y del detector se fijaron en 220 °C, utilizando N₂ como gas de arrastre a 10 psi. Para identificar y cuantificar los componentes, se empleó el estándar Supelco 37 “Component FAME Mix”, partir del cual se construyeron las curvas de calibración correspondientes. Para la determinación de los componentes se empleó la siguiente ecuación:

$$x_i(\%) = \frac{n_{i, inicio} - n_{i, final}}{n_{i, inicio}} \times 100 \quad (1)$$

Donde x_i es la fracción molar de biodiésel convertido; $n_{i, inicio}$, son los moles antes de la reacción HEFA y $n_{i, final}$ son los moles resultantes de la reacción de producción.

Posteriormente, este fue almacenado para su uso como materia prima en la producción del biocombustible marítimo.

4.3. Síntesis y caracterización de catalizadores

4.3.1. Síntesis del soporte (Al-MCM-41)

La síntesis del material mesoporoso Al-MCM-41 se llevó a cabo siguiendo la metodología propuesta por Wang et al. (2009), con ligeras modificaciones. El procedimiento se realizó con una relación Si/Al = 5, ajustando el gel de síntesis para obtener una composición molar final de: $1\text{SiO}_2:0.1\text{Al}_2\text{O}_3:0.3\text{NaOH}:0.2\text{CTAB}:80\text{H}_2\text{O}$. En la Figura 2 se presenta el esquema del proceso de síntesis empleado para obtener Al-MCM-41. Inicialmente, se activó el caolín en metacaolín a 950 °C durante 3 horas. Posteriormente, se añadieron 0.9450 g de metacaolín a una solución alcalina de hidróxido de sodio (NaOH) que contenía 0.510522 g de NaOH y 40.33 ml de agua destilada. La mezcla se dejó agitarse durante media hora a temperatura ambiente. Consecutivamente, se añadieron gota a gota, bajo agitación constante, 9.4 ml de tetraetilortosilicato (TEOS) disperso en 20 ml de agua desionizada durante 30 minutos, hasta observar la formación del gel; se midió el pH = 11. Para posteriormente agregar 3.16 g de CTAB, disueltos en una pequeña cantidad de agua desionizada (1-2 ml), mediante goteo durante una hora a 750 rpm, hasta observar que el gel se volvió una dispersión. La dispersión se calentó en una autoclave de acero con revestimiento de teflón a 130 °C durante 24 horas. Después, se dejó enfriar a temperatura ambiente para recuperar el sólido obtenido mediante centrifugación y lavados con agua desionizada. El sólido se secó al aire a 80 °C durante 16 horas; luego, se calcinó a 540 °C durante 6 horas. El sólido resultante es Al-MCM-41 [50].

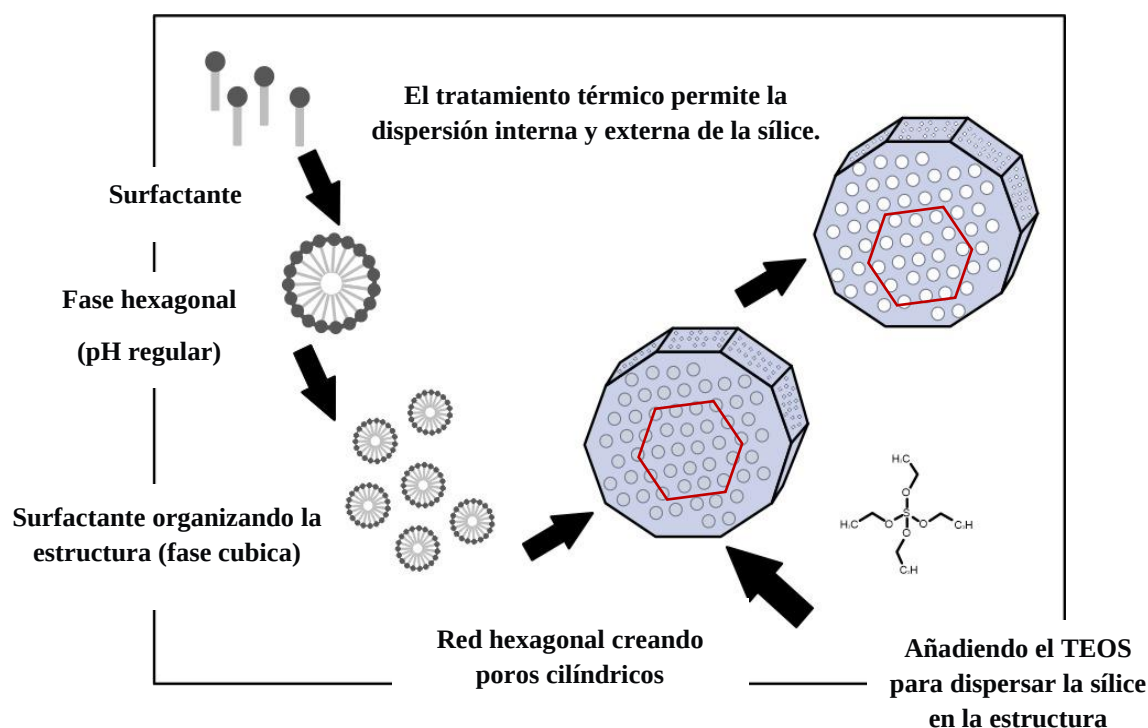


Figura 2. Síntesis de Al-MCM-41.

4.3.2. Síntesis de los catalizadores: cobalto (Co), molibdeno (Mo) y tungsteno (W) soportados en Al-MCM-41

Se sintetizaron catalizadores soportados de Co, Mo y W sobre Al-MCM-41 mediante la técnica de impregnación por exceso de solución. Se emplearon precursores de alta pureza: $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ($\geq 98\%$, Sigma-Aldrich) y WO_3 (todos con pureza $\geq 98\%$, Sigma-Aldrich). Las soluciones se prepararon ajustando las concentraciones para obtener cargas metálicas nominales del 3, 5 y 10% en peso (%p/p). La masa de cada precursor se calculó en función de la carga objetivo. La impregnación por exceso se llevó a cabo suspendiendo el soporte en 25 ml de agua desionizada, bajo agitación suave. Paralelamente, los precursores metálicos se disolvieron en agua desionizada y se llevaron a un volumen final de 25 ml en un matraz de aforo. Esta solución se adicionó gota a gota a la suspensión del soporte

con el fin de favorecer la dispersión de los centros metálicos. Tras su adición, el sistema se dejó bajo agitación rigurosa durante 10 minutos. Finalmente, el solvente se evaporó mediante tratamiento térmico a 200 °C bajo agitaciones rigurosas durante un periodo de 4 horas, hasta obtener el sólido seco. Posteriormente, los catalizadores fueron secados en horno a 80 °C durante 12 horas para continuar con su calcinación en mufla a 500 °C, con una rampa de calentamiento de 2 °C/min durante 6 horas. Los catalizadores calcinados fueron sometidos a activación mediante reducción térmica. El procedimiento se llevó a cabo en un equipo de reducción a temperatura programada (TPR), manteniendo la temperatura a 500 °C durante 2 horas. Para los catalizadores basados en Co se empleó una mezcla reductora de 10%H₂:90%Ar con un flujo volumétrico de 20mL/min. En contraste, la reducción de los catalizadores de Mo se realizó bajo una atmósfera de 100%H₂ con un caudal de 40 mL/min. Por su parte, los catalizadores de W no pudieron someterse a este tratamiento, preservando su estructura en fase de óxido.

4.3.3. Caracterización de los catalizadores: cobalto (Co), molibdeno (Mo) y tungsteno (W) soportados en Al-MCM-41

Los catalizadores sintetizados (Al-MCM-41, Co/Al-MCM-41, Mo/Al-MCM-41 y W/Al-MCM-41) fueron sometidos a diversas caracterizaciones. Con el propósito de corroborar la integridad estructural del soporte mesoporoso tras la incorporación de las fases metálicas, así como de determinar la eficiencia de los métodos de impregnación empleados. Asimismo, se pudieron identificar las propiedades texturales y morfológicas, así como el estado de oxidación de las especies activas dispersas en la matriz de la zeolita. La identificación de las fases cristalinas se

realizó mediante difracción de rayos X (DRX) en un equipo Philips X'PERT MPD. Se empleó la radiación Cu-K α con una longitud de onda (λ) de 1.54056 Å, a una potencia de aceleración de 40kV y una corriente de emisión de 40 mA. El registro de los difractogramas se realizó en dos intervalos del ángulo 2θ : un barrido a ángulos bajos de 0° a 10° para la resolución de la estructura mesoporosa, y un barrido a ángulos altos de 10° a 70° para identificar las fases metálicas y el grado de cristalinidad del soporte. El análisis morfológico y las propiedades superficiales texturales de los catalizadores se realizaron mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). Las micrografías se obtuvieron con un microscopio Zeiss GeminiSEM 500, operando en condiciones de alto vacío con una potencia de aceleración de 2 kV. Para su exploración detallada, se capturaron imágenes a diversos niveles de magnificación, abarcando un rango de 5.000× a 10 kV. La composición elemental de las muestras se determinó mediante un microscopio electrónico de barrido con espectrometría de energía dispersiva (EDS/EDX). Los análisis se realizaron con un sistema de microanálisis de Oxford Instruments, equipado con un detector de 80 mm². Para garantizar una generación eficiente de rayos X característicos y una cuantificación precisa de los metales soportados, se empleó un potencial de aceleración de 10 kV.

Además, se realizó el análisis de fisisorción de N₂ utilizando un equipo de porosimetría de la marca Micrometrics Gemini V a una temperatura de 77 K. Las muestras fueron previamente desgasificadas mediante flujo de nitrógeno a 375 °C durante 3 horas. Se analizó el área superficial, diámetro y volumen de poro de todos

los catalizadores mediante el método de Brunauer-Emmett-Teller (BET) y Barret-Joyner-Halenda (BJH).

Finalmente, los catalizadores fueron evaluados mediante reducción a temperatura programada (TPR-H₂). El análisis se llevó a cabo en un reactor de lecho fijo de cuarzo, empleando una masa de muestra de 1 mg. El perfil de reducción se registró aplicando una rampa de calentamiento lineal de 5°C/min, utilizando una mezcla gaseosa de 10%H₂:90%Ar.

4.4. Producción y caracterización del biocombustible marino (BM)

4.4.1 Producción del biocombustible marino (BM)

La producción del biocombustible marino (BM) se llevó a cabo a partir del biodiésel obtenido mediante la esterificación-transesterificación de AGL presentes en los LAR (sección 4.2). Para la fase inicial de esta investigación, se utilizó Al-MCM-41 como catalizador para establecer la base del diseño de experimentos. El proceso se llevó a cabo en dos etapas: primero, se evaluó el efecto de la relación biodiésel-catalizador sobre el rendimiento de la reacción, a una temperatura de 350 °C. Una vez definida la mejor relación biodiésel-catalizador, se estudió la influencia de la temperatura de operación, evaluando 200, 250, 300 y 350 °C.

Las condiciones experimentales con este catalizador se detallan en la Tabla 5.

Tabla 5. Clave de los experimentos: variar la relación biodiésel-catalizador y las temperaturas.

VARIANDO RELACIÓN BIODIÉSEL – CATALIZADOR		
CLAVE	Relación Biodiésel- Catalizador	Temperatura (°C)
BM1	20:1	350
BM2	20:0.5	350
BM3	20:0.1	350
BM4	20:0.05	350
VARIANDO TEMPERATURA		
BM5	20:0.1	350
BM6	20:0.1	300
BM7	20:0.1	250
BM8	20:0.1	200

Tras seleccionar previamente los parámetros, se evaluó la actividad catalítica de los catalizadores sintetizados. Las reacciones se llevaron a cabo utilizando una relación biodiésel – catalizador de 20:0.1. La selección de estos parámetros se basó en ensayos previamente realizados que demostraron que dicha combinación podía maximizar los rendimientos de las reacciones.

Los experimentos correspondientes a cada catalizador se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6. Clave de experimentos variando catalizadores.

VARIANDO CATALIZADOR	
CLAVE	Catalizador
BM9	3%Co/Al-MCM-41
BM10	5%Co/Al-MCM-41
BM11	10%Co/Al-MCM-41
BM12	3%Mo/Al-MCM-41
BM13	5%Mo/Al-MCM-41
BM14	10%Mo/Al-MCM-41
BM15	3%W/Al-MCM-41
BM16	5%W/Al-MCM-41

Posteriormente, la mezcla resultante se filtró para eliminar la fase sólida. Los hidrocarburos obtenidos se fraccionaron por destilación a puntos de ebullición.

4.4.2. Caracterización del biocombustible marino (BM)

La composición del BM se determinó mediante cromatografía de gases (GC) utilizando un detector de ionización de flama (FID) y una columna Agilent J&W GC colum (30 m x 0.25 mmID x 0.25 mm). El cromatógrafo se programó fijando una temperatura inicial de la columna en 45 °C y un tiempo de retención de 3 minutos. Seguido de una rampa de calentamiento a 20 °C/min hasta alcanzar 350 °C, que se mantuvo durante 10 minutos adicionales. Las condiciones de operación incluyeron una temperatura de inyección de 275 °C y una relación de Split de 100:1, mientras que el detector se mantuvo a 340 °C. El gas de arrastre empleado fue N₂ con un flujo constante de 1.3 mL/min.

Se llevó a cabo la caracterización de las propiedades fisicoquímicas y la evaluación termodinámica experimental del BM, con el fin de elucidar el efecto de la temperatura sobre su comportamiento. Para ello, se determinaron la densidad, la viscosidad y el índice de refracción en un intervalo térmico de 288.15 K a 338.15 K. Los resultados obtenidos se contrastaron con los límites operativos definidos por la norma internacional ISO 8217:2017 para combustibles marinos destilados. En la Tabla 7 se presentan detalladamente los valores normativos vigentes, junto con los métodos experimentales estandarizados y avalados por dicha norma para la determinación de las propiedades del BM analizadas en esta investigación.

Tabla 7. Límites y métodos establecidos por la norma internacional ISO 8217:2017 para combustibles marinos destilados.

PROPIEDAD	MÉTODOS PRUEBA Y	LÍMITE
	REFERENCIAS	MÁXIMO-MÍNIMO
VISCOSIDAD CINEMÁTICA 40 (°C)	ISO 3104	11,00-2,000
DENSIDAD A 15 (°C)	ISO 3675 or ISO 12185; see 6.1	900,0
ÍNDICE DE REFRACCIÓN	NA	NA
PODER CALORÍFICO (MJ/KG)	ISO 2719; see 6.4	43-60
PUNTO DE CONGELAMIENTO (°C)	ISO 3015; see 6.11	-16°C

La viscosidad cinemática se evalúa mediante viscosímetros capilares de vidrio (CANNON-FENSKE), tamaño 100, serie 347A). Con el fin de garantizar la estabilidad térmica durante el ensayo, el viscosímetro se sumergió en un baño de recirculación termostático (Isotemp 3016D) con control de temperatura de alta precisión. El procedimiento consistió en medir el tiempo de tránsito del fluido entre dos marcas de referencia, posteriormente, este valor se multiplicó por la constante de calibración del instrumento para obtener la viscosidad final, de acuerdo con los protocolos estándar de viscosimetría capilar.

La densidad fue determinada mediante un densímetro de tubo U oscilante Anton Paar (modelo DMA 5000). El procedimiento consistió en introducir la muestra en el capilar de vidrio, asegurando la ausencia de burbujas de aire para evitar desviaciones en la medición. El equipo registra los periodos de oscilación del tubo,

que guardan una relación directa con la densidad del fluido, conforme a los lineamientos de la norma ISO 3675.

El índice de refracción (IR) se determinó con un refractómetro digital automático (Abbermat 300). El procedimiento consistió en colocar la muestra sobre el prisma de vidrio, donde fue iluminada con un haz de luz LED desde distintos ángulos.

El poder calorífico superior (PCS) se determinó mediante una bomba de calorimetría a volumen constante, utilizando el equipo BK-1A.

El punto de congelamiento se determinó mediante un analizador de bajas temperaturas de la marca Labao. El procedimiento consistió en introducir la muestra necesaria en la celda de medición y programar el descenso térmico. Se monitoreó de manera continua la disminución de la temperatura hasta identificar el momento exacto de formación de los primeros cristales en el biocombustible, registrando dicho valor como el punto de congelamiento.

4.5. Producción y caracterización de mezclas de biocombustible marino (BM) + aditivos a base de isómeros de hexanol

4.5.1. Producción del BM + aditivos a base isómeros de hexanol

Las mezclas binarias compuestas por BM y los alcoholes + 4-metil-2-pentanol, 1-hexanol y 2-etil-1-butanol se prepararon gravimétricamente utilizando una balanza analítica de precisión (Ohas, OHAUS00240). La incertidumbre estándar estimada de la fracción másica fue de 0.002. Las muestras se prepararon cubriendo un rango

de concentraciones de 0.1 a 0.9 en fracción de peso, con incrementos de 0.1 para cada aditivo. Los reactivos utilizados se adquirieron de Sigma-Aldrich (Tabla 1). Las mezclas se conservaron en recipientes herméticamente sellados para evitar la evaporación hacia la atmósfera. Asimismo, se emplearon tamices moleculares de 5 Å durante el almacenamiento de las mezclas BM+aditivos para eliminar trazas de humedad y evitar el contacto con el agua.

4.5.2. Determinación de las propiedades fisicoquímicas del BM + aditivos a base de alcoholes

La determinación de las propiedades fisicoquímicas de estas mezclas se realizó de manera similar a la de la caracterización del BM puro. Las mezclas fueron medidas mediante densidad, viscosidad e índice de refracción en un intervalo de temperatura de 288.15 K a 338.15 K.

La viscosidad cinemática de las mezclas se determinó mediante viscosímetros capilares de vidrio tipo Cannon-Fenske. Para el intervalo térmico comprendido entre 288.15 K y 318.15 K, se empleó un viscosímetro de tubo capilar de vidrio de tamaño 100 (serie 347A), mientras que para las mediciones realizadas en el rango de 323.15 K a 338.15 K, se utilizó un viscosímetro de tamaño 50 (serie 576A). Las densidades se determinaron mediante un densímetro de tubo oscilante Anton Paar (modelo DMA 5000). Mientras que el índice de refracción (IR) se determinó con un refractómetro digital automático (Abbermat 300).

Los valores obtenidos de densidad y viscosidad se compararon con los límites máximos y mínimos establecidos por la norma internacional ISO 8217:2017 para combustibles marinos destilados.

4.6. Propiedades de exceso y derivadas de las mezclas BM + aditivos.

Se determinaron el volumen molar en exceso (V^E), la desviación de viscosidad ($\Delta\eta$) y la desviación del índice de refracción (Δn_D) para todas las mezclas del biocombustible marino con los aditivos (4-metil-2-pentanol, 1-hexanol y 2-etil-1-butanol) en todo el rango de composición y dentro del intervalo de temperatura de 288.15 a 338.15 K. Estas propiedades proporcionan información sobre su naturaleza química y el tipo de interacciones moleculares presentes entre los componentes de la mezcla.

El volumen molar en exceso se evaluó según la siguiente ecuación:

$$V^E/(\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}) = x_1 M_1 \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_1} \right) + x_2 M_2 \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_2} \right) \quad (2)$$

Donde V^E representa el volumen molar en exceso; ρ es la densidad de la mezcla; (x_1, x_2) , (ρ_1, ρ_2) y (M_1, M_2) son las fracciones molares, las densidades y la masa molar de los componentes puros 1 y 2, respectivamente.

La masa molar del biocombustible marino se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\bar{M}_{bio\ fuel}/(g \cdot mol^{-1}) = \sum_{i=1}^{C_i} x_i \cdot M_i \quad (3)$$

Dónde $\bar{M}_{bio\ fuel}$ es la masa molar promedio del biocombustible marino; M_i y x_i son la masa y la fracción molar de la cadena de hidrocarburos presente en la mezcla, respectivamente; y C_i se refiere a la cadena de hidrocarburos presente en el biocombustible marino.

Se calculó la desviación de la viscosidad ($\Delta\eta$) a partir de los valores medidos experimentalmente. Se utilizó la siguiente ecuación:

$$\Delta\eta/(mPa \cdot s) = \eta - \sum_{i=1}^2 x_i \eta_i \quad (4)$$

Donde η es la viscosidad dinámica de la mezcla; x_i y η_i son las viscosidades dinámicas y las composiciones molares de los componentes puros 1 y 2, respectivamente.

La desviación del índice de refracción (Δn_D) se calculó a partir de los valores experimentales utilizando la siguiente ecuación:

$$\Delta n_D = n_D - \sum_{i=1}^2 x_i n_{Di} \quad (5)$$

Donde n_D es el índice de refracción de la mezcla; y x_i y n_{Di} son la fracción molar y el índice de refracción de los compuestos puros 1 y 2.

4.6.1. Ajuste de las propiedades de exceso y derivadas para las mezclas BM+ isómeros hexanol

Para el ajuste de propiedades derivadas, se realizó el ajuste con el modelo de Redlich-Kister (RK) con la finalidad de obtener los parámetros del modelo para la predicción de las propiedades de exceso y derivadas de las mezclas binarias de biocombustible marino + isómeros de hexanol a distintas concentraciones. La siguiente ecuación muestra el modelo RK empleado para el ajuste:

$$J^E = x_1 x_2 \sum_{i=0}^n a_i (x_1 - x_2)^i \quad (6)$$

Donde J^E es el $V^E, \Delta\eta, \Delta n_D$; x_1 y x_2 es la fracción molar de BM (1) y de aditivo (2); a_i son los coeficientes ajustables del modelo.

4.7. Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

La evaluación de impacto ambiental se llevó a cabo siguiendo la metodología estandarizada establecida por las normas ISO 14040-14044. Para este trabajo se realizó un análisis de ciclo de vida atribucional con el fin de estimar las emisiones de contaminantes y la demanda de insumos necesarios para satisfacer una unidad funcional. El ACV consta de cuatro etapas.

1) La definición de objetivo y el alcance: se determinaron los límites del estudio, la unidad funcional y el objetivo del análisis.

2) Inventario: Se recolectaron los datos derivados de la estimación de la masa y la energía en todas las etapas del estudio, dentro de sus respectivos límites.

3) Evaluación del impacto ambiental: Medición de indicadores ambientales; se determinaron los impactos ambientales del proceso de producción del BM.

4) Interpretación: Análisis de los resultados de todo el proceso de producción, destacando las etapas críticas y los puntos clave que permitan reducir el impacto ambiental del proceso.

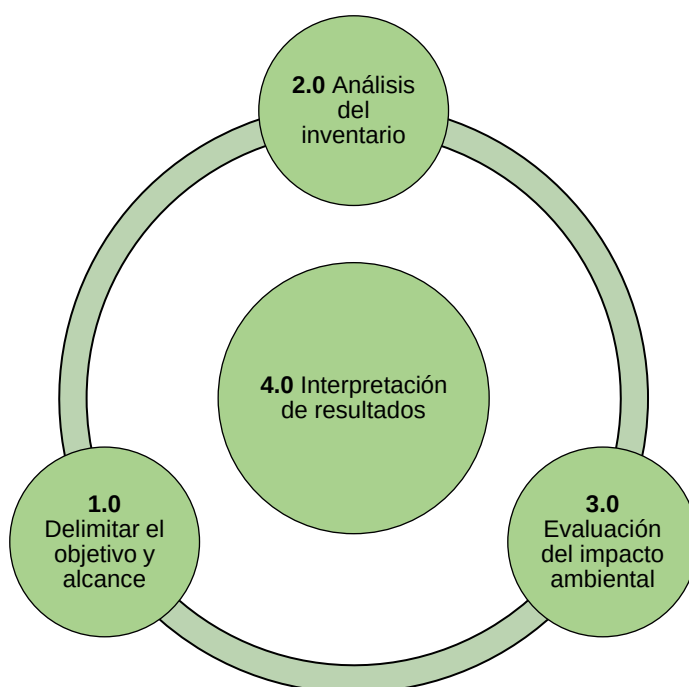


Figura 3. Etapas del análisis de ciclo de vida.

4.7.1. Definición de objetivo y alcance

El objetivo de este análisis es evaluar el impacto ambiental del proceso de producción del biocombustible marino a partir de grasas extraídas de lodos residuales a escala de laboratorio. Se delimitaron las fronteras de estudio que abarcan desde la recolección de lodos residuales hasta la producción del

biocombustible marino, como se muestra en la Figura 5. Se consideró como unidad funcional (UF) la valorización energética de 1 kg de lodo residual procedente de fluentes con alto contenido de grasa para la producción de biocombustible marino. Se consideró fuera de las fronteras de estudio el impacto ambiental asociado a los flujos elementales: construcción, infraestructura, mantenimiento y ensambles de equipos, dado que dicho impacto podría afectar los impactos ambientales producidos.

4.7.2. Evaluación del inventario ambiental de ciclo de vida: Escala laboratorio

En la elaboración del inventario de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) a escala de laboratorio de este proyecto, se siguió la metodología propuesta por Contreras-Vázquez et al. (2025). Para ello, se integraron los balances de materia y energía calculados teóricamente con los resultados experimentales obtenidos [51]. El cálculo de la demanda energética, desde la etapa de extracción de ácidos grasos hasta la destilación de los productos, se estimó mediante modelos matemáticos que contemplaron el calor sensible, el calor de mantenimiento y el calor de mezclado.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Extracción de los ácidos grasos libres del lodo residual

Tras las etapas de filtración y baño ácido, se extrajeron los ácidos grasos del lodo residual mediante el método de jeringa, cuya eficiencia se evaluó a partir de los rendimientos de ácidos grasos libres y triglicéridos presentados en la Tabla 9. Estos resultados se complementan con la caracterización previa de la materia prima realizada por Moreno-Caballero, quien reportó que el lodo residual utilizado en este estudio posee un contenido graso aproximado del 44.5% p/p.

Tabla 8. Rendimiento del proceso de extracción de ácidos grasos mediante el método de jeringa.

PRUEBA	LR (G)	LF (G)	GRASA TEÓRICA	GRASA EXTRAÍDA	RENDIMIENTO (%)
			(G)	(G)	
1	125	54	55	20	36
2	115	49	51	16	31

LR: Lodo residual (peso inicial del lodo antes de filtrar)

LF: Lodo filtrado (peso del lodo después de filtrar)

Los resultados del proceso de filtrado indican que el 45% de la masa del lodo residual se descarta como residuo sólido. La variación en la cantidad de masa desechada se atribuye a la presencia de especies sólidas, incluidos residuos sólidos urbanos y materia orgánica (madera, hojarasca, entre otros) en los distintos lotes de lodo. Mediante el método de extracción por jeringa, aplicado inmediatamente después del tratamiento ácido, se obtuvieron rendimientos promedio de 36% y 31%.

5.1.1. Pretratamiento de la grasa: producción de biodiésel

La grasa residual recuperada tras el tratamiento con baño ácido se empleó como materia prima en la reacción de un solo paso de esterificación-transesterificación. El proceso de producción de biodiésel alcanzó un rendimiento del 93%, lo cual concuerda con lo reportado por nuestro grupo de investigación [9].

Con el propósito de determinar el perfil de ésteres metílicos de ácidos grasos (FAMES) presentes en el biodiésel, se caracterizaron mediante cromatografía de gases con detector de ionización de llama (GC-FID). La composición se presenta en la Tabla 9.

El linoleato de metilo (C18:2n6c) y el palmitato de metilo (C16:0) fueron los compuestos con mayor fracción de peso en el biodiésel. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Mazlan et al. (2020), quienes identificaron un perfil predominante de ácidos grasos de metil éster (FAMES) derivado del aceite de palma. [52].

5.2. Caracterización de catalizadores

5.2.1. Caracterización de la zeolita Al-MCM-41

La Figura 5 muestra el difractograma obtenido mediante XRD de la zeolita Al-MCM-41.

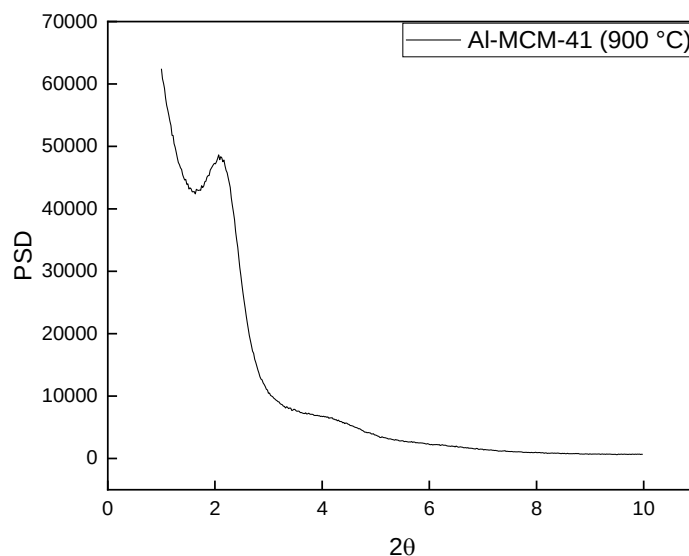


Figura 4. Difractograma de rayos X (DRX) de la zeolita Al-MCM-41 sintetizada en este trabajo.

La caracterización XRD de la Al-MCM-41 muestra una banda intensa en ángulos bajos, característica de los materiales mesoporosos con ordenamiento a largo alcance. Se identificó una difracción principal en el ángulo 3° en 2θ , correspondiente al plano (100), junto con una señal ancha en $\sim 4.5^\circ$, atribuible a la superposición de los planos (110) y (200). La ausencia del plano (210) y la baja intensidad de las difracciones en los demás planos pueden atribuirse a la incorporación de alúmina. Sin embargo, la presencia de las difracciones observadas confirma una estructura mesoporosa con ordenamiento hexagonal, lo cual es consistente con lo reportado por Wang et al. (2009). Los resultados obtenidos sugieren que la incorporación del metacaolín como fuente de alúmina puede actuar de manera efectiva para obtener estructuras MCM-41 estables con bajas relaciones Si/Al [50].

Al-MCM-41 fue sometida al análisis de fisisorción de nitrógeno, con el fin de generar las isothermas de adsorción-desorción y caracterizar la textura porosa de Al-MCM-

41. Este análisis se realizó mediante los métodos BET y BJH, calculando el área superficial, la porosidad, el tamaño y el volumen total de los poros. La Figura 6 muestra la isoterma de adsorción-desorción de N₂ de la zeolita Al-MCM-41.

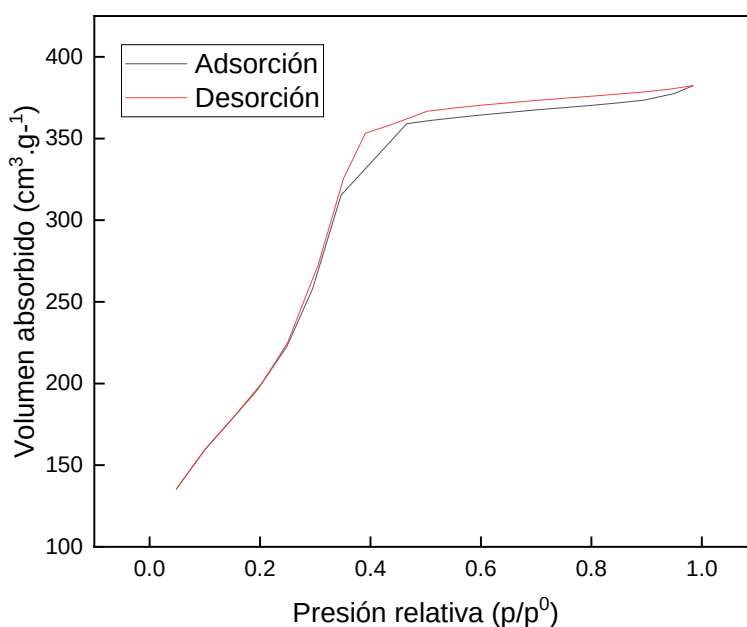


Figura 5. Isotherma de adsorción-desorción obtenida de la zeolita Al-MCM-41.

De acuerdo con la clasificación de la IUPAC, se obtuvo una isoterma de tipo IV, característica de materiales mesoporosos. La isoterma presenta tres etapas: inicialmente, la adsorción en monocapa en las paredes de los mesoporos a una presión relativa ($p/p^0 \leq 0.25$); seguida de un aumento pronunciado de la adsorción entre 0.25 y 0.45 de p/p^0 , donde ocurre la condensación capilar. Finalmente, una etapa de adsorción multicapa en la superficie externa. Mediante este mismo análisis se obtuvieron el área superficial BET (858.1571 m²/g), un volumen de poro de 0.60

cm³/g, y un tamaño de poro de 2.7573 nm. Los resultados obtenidos de este análisis son muy similares con lo reportado por Wang et al. (2009), quienes reportaron un área superficial BET 877 m²/g, un volumen de poro de 0.63 cm³/g y un tamaño de poro de 3.33 nm [50].

Al-MCM-41 fue caracterizada mediante SEM y SEM-EDX. La imagen obtenida mediante SEM se muestra en la Figura 7.

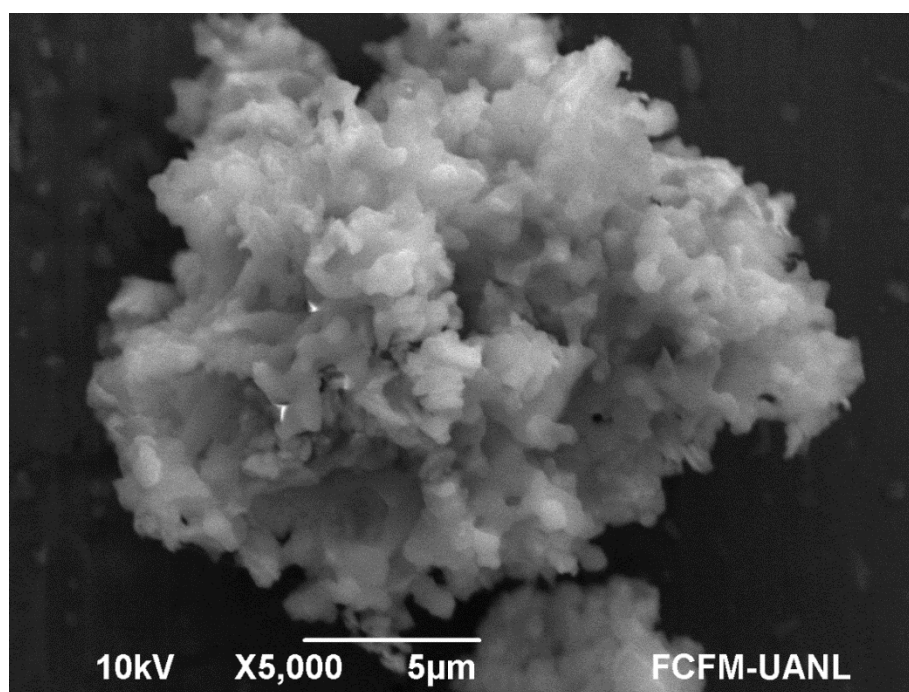
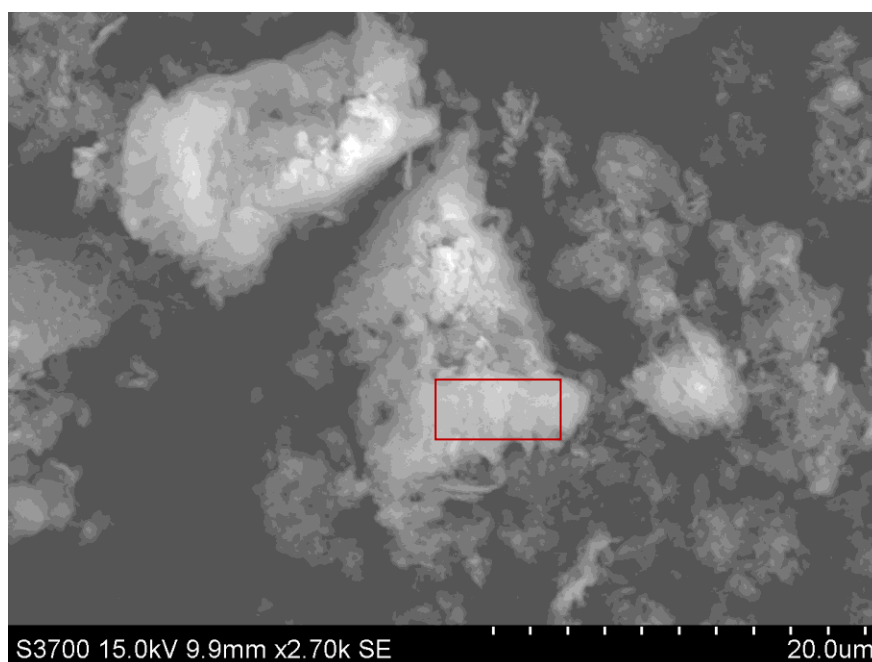


Figura 6. Imagen SEM de la zeolita Al-MCM-41.

Se observa una morfología típica de pseudoesferas aglomeradas, con una textura superficial porosa, caracterizada por una apariencia “esponjosa”; lo cual es consistente con lo reportado por Wang et al. (2009). Los autores atribuyen esta

morfología típica a un ordenamiento irregular, lo que indica la presencia de mesoporosidad interna en el material.

Una vez analizada la morfología superficial mediante SEM, se procedió al análisis SEM-EDX. Con el fin de corroborar la naturaleza química de Al-MCM-41 y evaluar la distribución de aluminio y silicio en la zeolita. La Figura 8 presenta las micrografías obtenidas mediante esta técnica, esas micrografías nos permitieron confirmar la morfología porosa característica de Al-MCM-41.



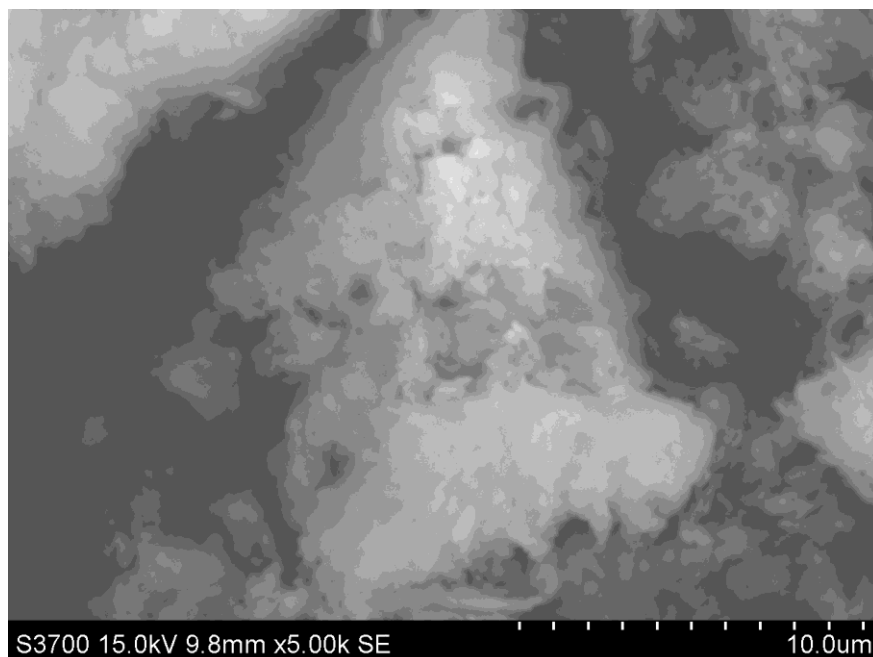


Figura 7. SEM-EDX de la zeolita Al-MCM-41.

Con el objetivo de confirmar la composición elemental de la zeolita Al-MCM-41, se realizó el análisis EDX en el área representativa de la muestra mostrada en la Figura 8. La cuantificación de la composición atómica y la composición normalizada se presentan en la Tabla 10. Estos resultados son similares a los reportados en la literatura [50].

Tabla 9. Composición de Al-MCM-41 obtenida mediante EDX.

COMPOSICIÓN DE AL-MCM-41								
COMPOSICIÓN NORMALIZADA					Composición atómica			
CATALIZADOR	C(%)	O(%)	Al(%)	Si(%)	C(%)	O(%)	Al(%)	Si(%)
AL-MCM-41	18.94	51.80	0.81	28.44	26.93	55.27	0.51	1.5

Mediante la composición EDX se determinó una relación atómica Si/Al de 2.93, con una desviación respecto al valor teóricamente esperado (Si/Al=5). Esta diferencia

puede atribuirse a dos factores principales: 1) Un fenómeno de enriquecimiento superficial de aluminio provocado durante el tratamiento térmico de la zeolita. 2) El EDX, al ser una técnica de análisis superficial, penetra hasta unos pocos micrómetros. Teniendo como consecuencia la detección de una mayor cantidad de átomos de aluminio, los cuales migran fácilmente a la zona superficial del soporte, lo que hace que el EDX detecte una mayor cantidad de Al de lo que hay en todo el material.

5.3. Caracterización de los catalizadores: cobalto (Co), molibdeno (Mo) y tungsteno (W) soportados en Al-MCM-41

Con el fin de determinar la temperatura de reducción de las especies metálicas impregnadas (Co, Mo y W) sobre Al-MCM-41, se realizó el análisis de reducción a temperatura programada (TPR). En la Figura 9 se detallan los perfiles obtenidos para los catalizadores preparados con una carga metálica del 5% en peso.

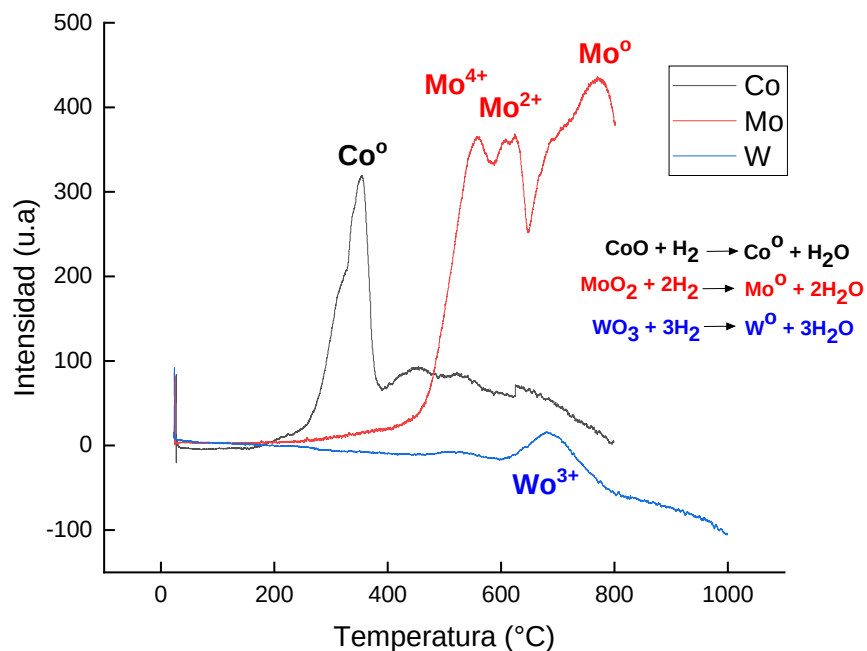


Figura 8. Perfil de temperaturas de reducción obtenido mediante TPR de los catalizadores.

Los perfiles de reducción muestran comportamientos distintos en cada fase metálica. En el caso del catalizador de cobalto, se observó un pico de reducción a Co^0 a 300 °C. Por su parte, el catalizador con molibdeno presentó múltiples picos de reducción, iniciando de MoO_4^{4+} a MoO_2^{2+} . Esta reducción ocurrió en un intervalo de temperaturas de 500 °C a 600 °C, mientras que la reducción completa a su estado metálico se alcanza a 800 °C. En contraste, el catalizador de wolframio presentó su primer pico de reducción a 700 °C, asociado a la fase WO_3 ; no obstante, la reducción total no pudo evidenciarse, ya que el análisis térmico se limitó a 1000 °C, sin observarse picos adicionales hasta esa temperatura.

Los catalizadores fueron caracterizados mediante DRX a ángulos bajos de 1 a 10° en 2θ , con el objetivo de evaluar la estructura mesoporosa de Al-MCM-41 tras la incorporación de los óxidos metálicos. En la Figura 10 se presentan los DRX a un ángulo bajo de 1 a 10° en 2θ para el soporte Al-MCM-41 y los catalizadores de cobalto (3, 5 y 10% en peso).

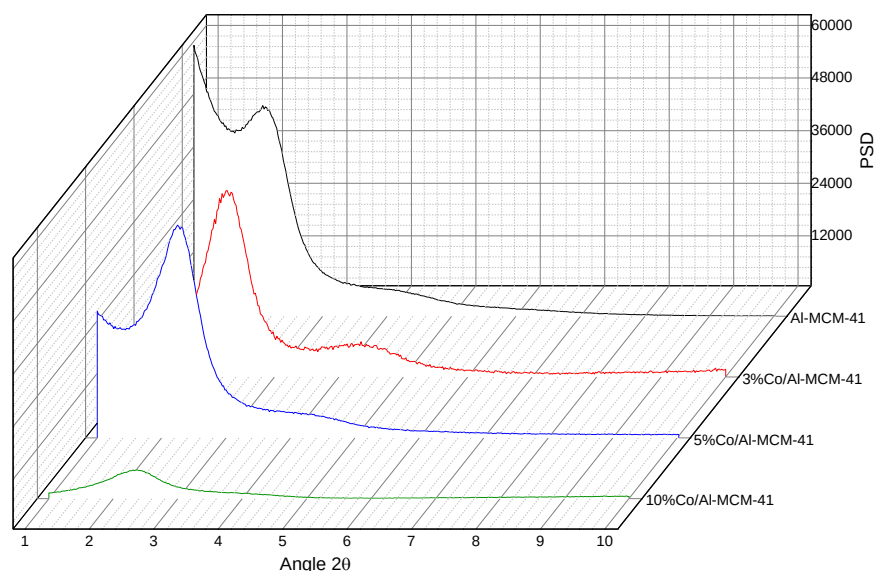


Figura 9. Difractograma obtenido en ángulo bajo de los catalizadores con cobalto.

Los patrones de DRX de bajo ángulo de los catalizadores de Al-MCM-41 con óxidos metálicos de cobalto presentan una difracción intensa en 3° en 2θ , correspondiente al plano cristalográfico (100). La permanencia de esta señal confirmó que la estructura mesoporosa del soporte se mantiene tras el proceso de impregnación con óxidos de cobalto. Sin embargo, se observó una disminución de la intensidad de esta difracción a medida que aumentó la carga metálica, lo que podría indicar un

llenado parcial de los canales mesoporosos. El catalizador 10%Co/Al-MCM-41 presentó una disminución drástica en la difracción característica de Al-MCM-41, lo que sugiere una ligera distorsión del ordenamiento hexagonal a largo alcance. Estos resultados son muy similares a lo reportado por [53] quienes describen un comportamiento similar en cuanto a la caracterización de este catalizador.

En la Figura 11 se muestran los difractogramas obtenidos de los catalizadores con molibdeno.

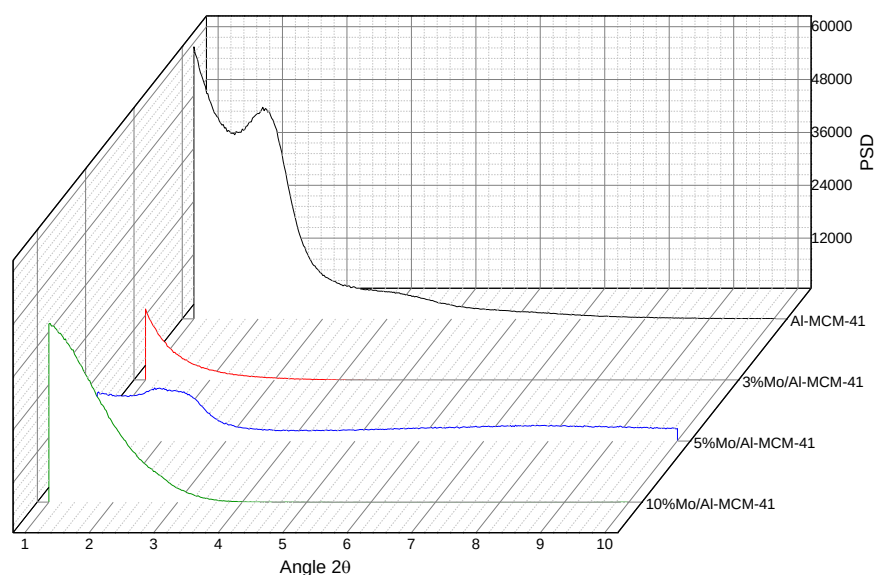


Figura 10. Difractograma obtenido a un ángulo bajo de los catalizadores con molibdeno.

Los difractogramas de los catalizadores con 3% y 5% de Mo/Al-MCM-41 presentan una reducción drástica de la intensidad de difracción (100). Esto se atribuye a la disminución del contraste de densidad electrónica entre las paredes de los mesoporos y las especies de Mo dispersas en los canales, lo que sugiere una

saturación de los poros. El catalizador 10%Mo/Al-MCM-41 conservó la difracción característica del soporte, con una disminución menor. Estos efectos son coherentes con los resultados de fisisorción de N_2 , que se discuten posteriormente, y concuerdan con lo reportado en [54].

En la Figura 12 se presentan los difractogramas obtenidos para los catalizadores con wolframio.

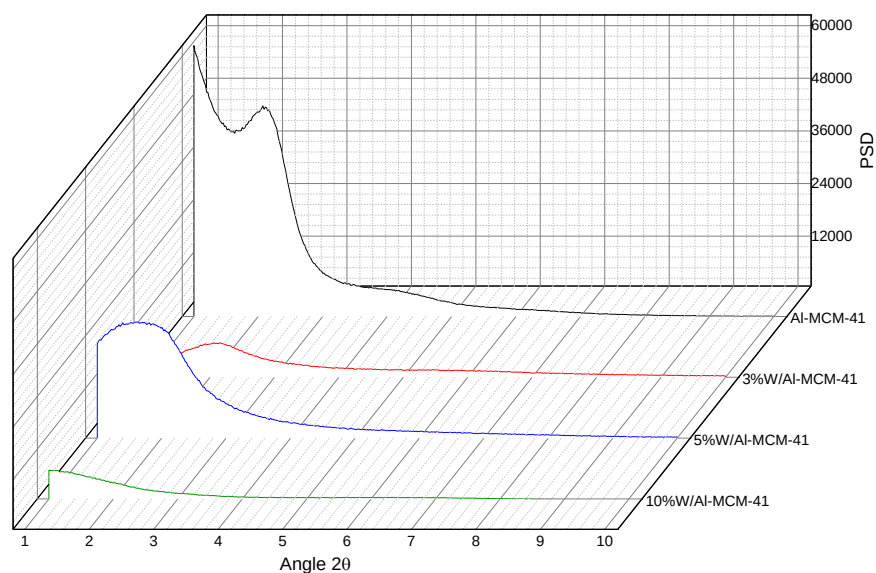
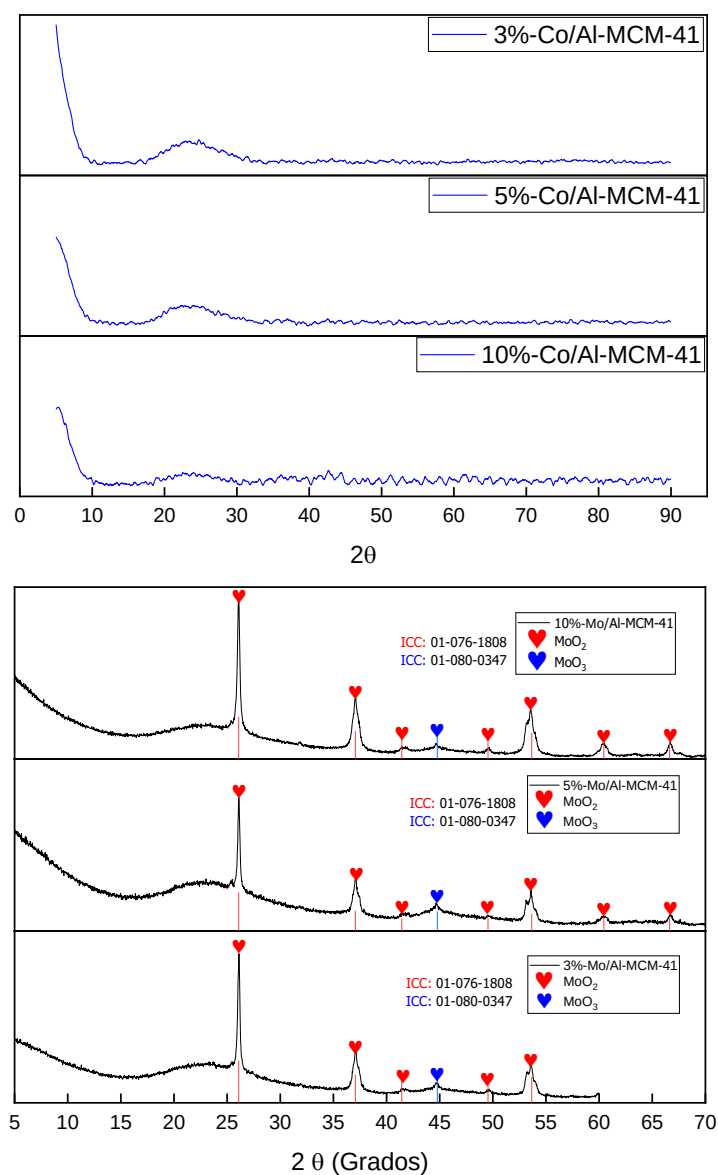


Figura 11. Difractograma obtenido a un ángulo bajo de los catalizadores con wolframio.

En el caso de los catalizadores con wolframio, el difractograma muestra una disminución inicial con el catalizador 3%W/Al-MCM-41. Sin embargo, el catalizador 5%W/Al-MCM-41 muestra un aumento en la difracción característica de Al-MCM-41. Mientras que el catalizador 10%W/Al-MCM-41 disminuye nuevamente la difracción confirmando la saturación de los canales, o incluso un posible desorden

estructural debido a las cargas metálicas. Cargas superiores de wolframio provocan una disminución de la intensidad de los picos de difracción [55].

Posteriormente, se procedió a analizar los difractogramas a 2θ entre 5° y 70° , con el fin de identificar las fases cristalinas de los óxidos metálicos presentes en el soporte. La Figura 13 muestra los difractogramas obtenidos para cada catalizador.



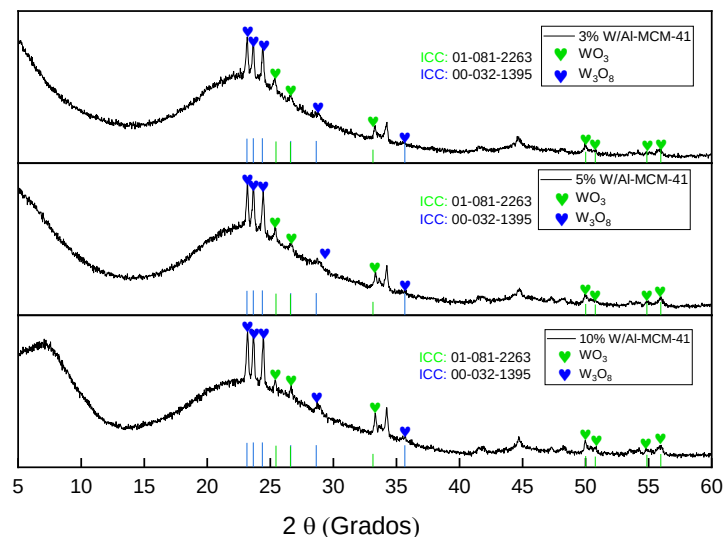


Figura 12. Difractogramas obtenidos de los catalizadores de cobalto, molibdeno y wolframio soportados en Al-MCM-41.

Los resultados de difracción de los catalizadores con cobalto presentan únicamente una banda ancha y difusa entre 20° y 30° en 2θ , correspondiente a especies del tipo aluminato de cobalto (CoAl_2O_4). Sin embargo, no se observa la presencia de difracciones correspondientes a fases cristalinas de óxidos de cobalto (Co_3O_4). Estos resultados sugieren que las especies metálicas poseen un tamaño de dominio inferior al límite de detección de la técnica (~ 3 nm) o bien se encuentran bien dispersas en los canales mesoporosos. Estos resultados son consistentes con el análisis EDX, que confirma la presencia del metal en todos los catalizadores.

Para los catalizadores con molibdeno, se observaron difracciones en 2θ a 26.83° , 37.059° , 41.42° , 49.54° , 53.43° , 60.43° y 66.63° ; estas se asociaron con la fase MoO_2 . Se encontró una única difracción en 44.76° , asociada a MoO_3 .

Los DRX con wolframio presentaron difracciones en 23.19°, 24.37°, 40.29°, y 58.56°, en 2θ estas se asociaron a la fase WO₃. Se encontraron difracciones en 25.37°, 26.58°, 33.25°, 49.95°, las cuales fueron asociadas a W₃O₈.

La identificación de estas fases cristalinas se realizó mediante la indexación de los picos de difracción con sus respectivas cartas cristalográficas de referencia (ICDD).

Mediante los DRX obtenidos, se determinó el tamaño promedio de cristalito para cada óxido metálico presente en los catalizadores. Este se determinó mediante la ecuación de Scherrer:

$$D = \frac{K \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos(\theta)} \quad (7)$$

Donde D corresponde al tamaño de cristalito promedio; K es el factor de forma adimensional relacionado con la geometría del cristalito; λ es la longitud de onda de la radiación de rayos X utilizada en el difractómetro; β es el ancho del pico a la mitad de su altura máxima y θ corresponde al ángulo Bragg. La Tabla 11 muestra el tamaño promedio de cristalito (D) para cada fase óxida de los catalizadores.

Tabla 10. Comparación del tamaño promedio de cristalito (D) para cada fase óxida de los catalizadores con molibdeno y wolframio.

CATALIZADOR	FASE OXIDA	D (NM) PROMEDIO
3%MO/AL-MCM-41	MoO ₂	20
	MoO ₃	3.5
5%MO/AL-MCM-41	MoO ₂	38
	MoO ₃	4.5
10%MO/AL-MCM-41	MoO ₂	15

3%W/AL-MCM-41	MoO ₃	43
	WO ₃	50
	W ₃ O ₈	20
5%W/AL-MCM-41	WO ₃	49
	W ₃ O ₈	54
10%W/AL-MCM-41	WO ₃	49
	W ₃ O ₈	34

Se observó que los catalizadores impregnados con wolframio presentan un tamaño de cristalito promedio ligeramente mayor que el de los catalizadores impregnados con molibdeno. Esto puede deberse a la mayor movilidad superficial de los óxidos de W, probablemente durante la etapa de calcinación, lo que favoreció el crecimiento de cristalitos de WO₃ en comparación con los de MoO₂.

Los catalizadores Co, Mo y W también fueron caracterizados mediante la fisisorción de N₂. La Tabla 12 muestra los resultados obtenidos en comparación con los de la zeolita Al-MCM-41.

Tabla 11. Área superficial, volumen y tamaño de poro de todos los catalizadores sintetizados en este trabajo.

CATALIZADOR	ÁREA SUPERFICIAL	VOLUMEN TOTAL DE	TAMAÑO DE PORO
	BET (M ² /G)	PORO (CM ³ G ⁻¹)	(NM)
AL-MCM-41	858.15	0.48	2.27
3%CO/AL-MCM-41	625.20	0.44	2.08
5%CO/AL-MCM-41	525.95	0.36	2.07
10%CO/AL-MCM-41	342.99	0.22	2.05

3%MO/AL-MCM-41	100.63	0.10	4.12
5%MO/AL-MCM-41	509.06	0.43	3.40
10%MO/AL-MCM-41	80.85	0.075	3.73
3%W/AL-MCM-41	329.50	0.24	2.98
5%W/AL-MCM-41	261.25	0.21	3.21
10%W/AL-MCM-41	196.90	0.15	3.16

Los resultados del análisis textural indicaron que los catalizadores impregnados con cobalto mostraron una disminución progresiva del área superficial específica, acompañada de un ligero descenso del volumen y del tamaño de los poros. Por el contrario, los catalizadores impregnados con molibdeno presentaron una reducción abrupta de dichos parámetros a medida que aumentó el porcentaje de impregnación. Se destaca que el catalizador 5%Mo/Al-MCM-41 presentó un área superficial superior a la del catalizador 3%Mo/Al-MCM-41; este fenómeno podría deberse a una deficiencia de dispersión del catalizador en el soporte. Estos resultados concuerdan con las difracciones presentadas a bajas ángulos, donde se evidenció que la intensidad de la señal correspondiente a la estructura de Al-MCM-41 disminuye en la misma proporción que el área superficial. Finalmente, en el caso de los catalizadores impregnados con wolframio, se observó una disminución del área superficial, pero constante respecto del porcentaje de metal. Se observó un incremento en el tamaño de poro a medida que aumentó el porcentaje de impregnación.

Los catalizadores se sometieron a un análisis SEM-EDX con el fin de obtener micrografías SEM y el mapeo elemental, así como su composición química. La Figura 14 muestra las micrografías obtenidas de los catalizadores de cobalto.

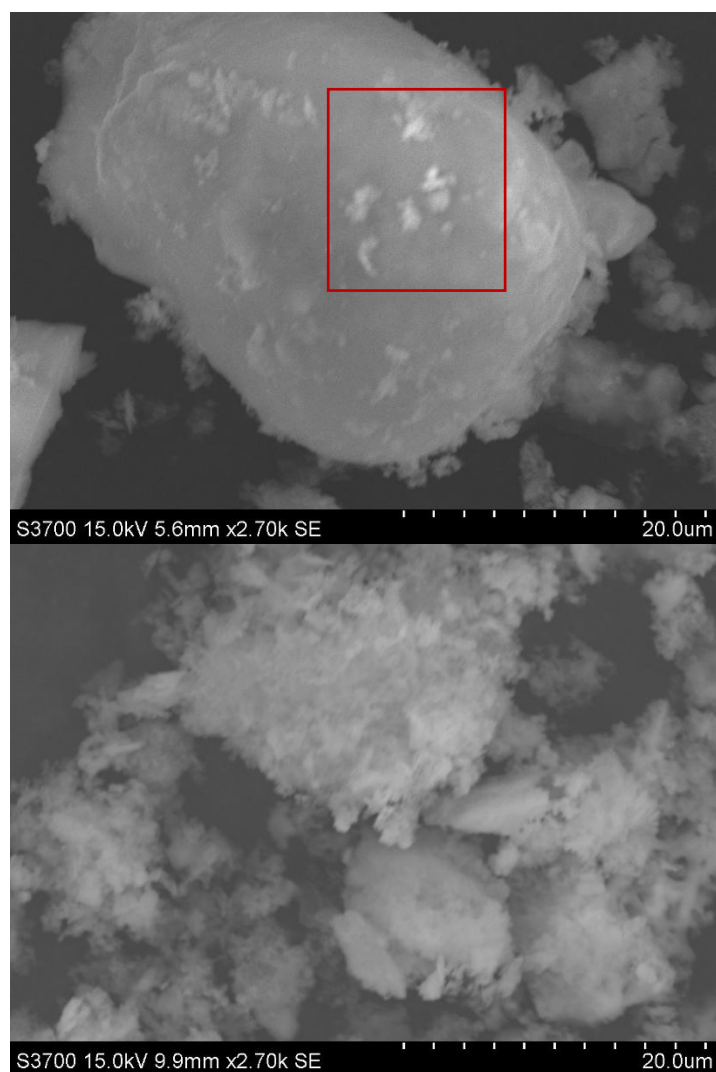
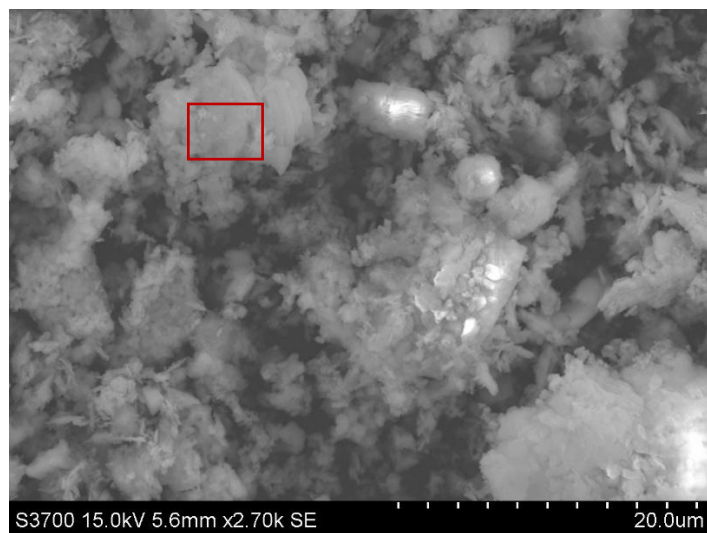




Figura 13. Micrografías SEM obtenidas de los catalizadores con Cobalto/Al-MCM-41.

La Figura 15 muestra las micrografías SEM obtenidas con los catalizadores de molibdeno.



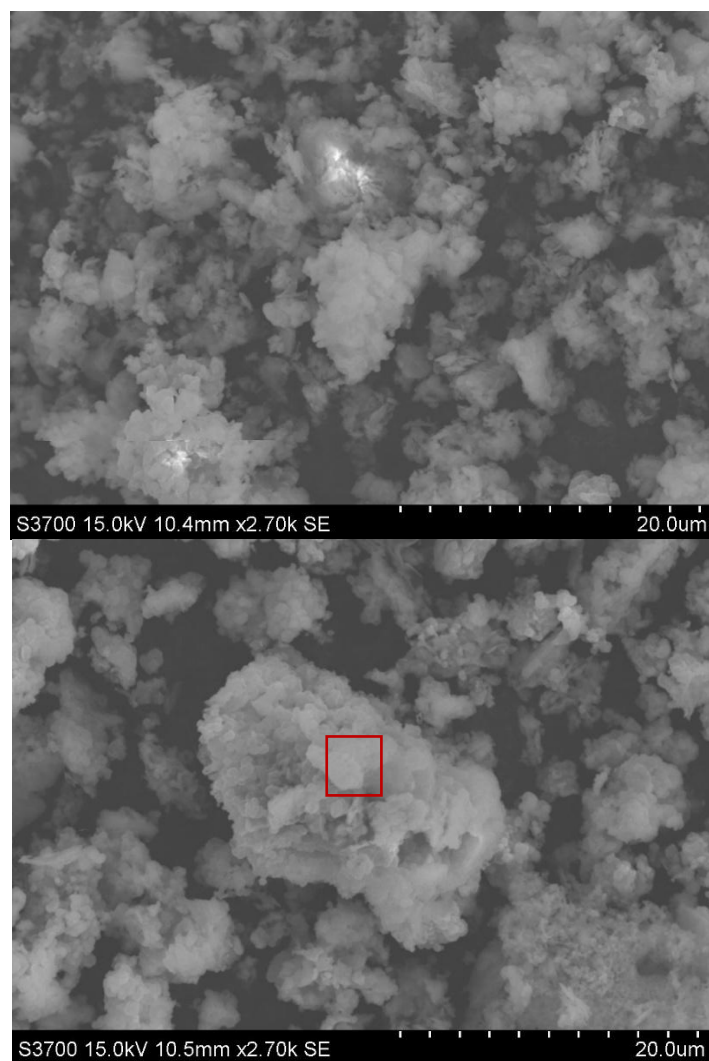


Figura 14. Micrografías SEM de los catalizadores con Molibdeno/Al-MCM-41.

La Figura 16 muestra las micrografías SEM de los catalizadores con wolframio.

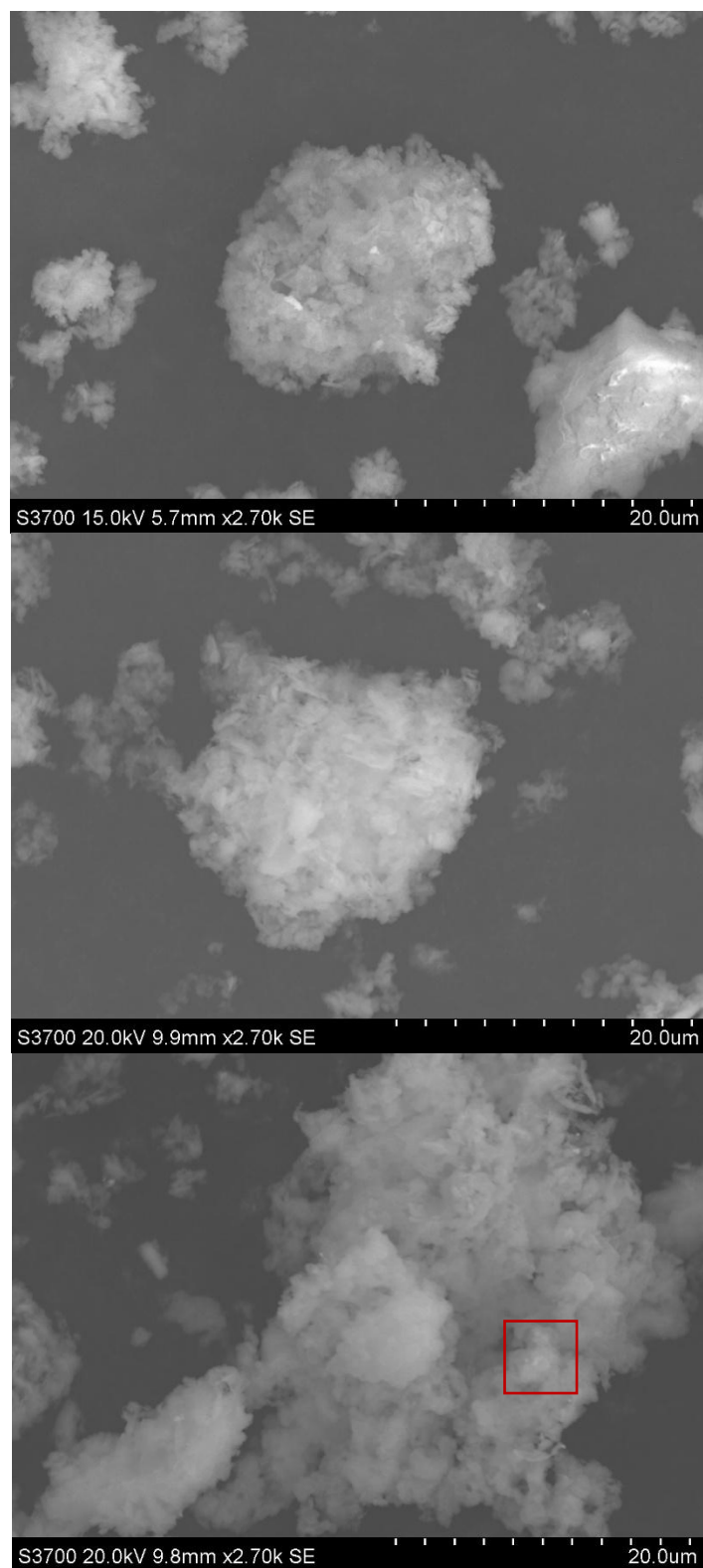


Figura 15. Micrográficas SEM de los catalizadores de Wolframio/Al-MCM-41.

Las micrografías muestran una buena dispersión de los óxidos impregnados sobre el soporte; además, se puede seguir apreciando la apariencia “esponjosa” de la estructura de Al-MCM-41.

Para confirmar la presencia de los metales sobre la Al-MCM-41, se determinó la composición de los catalizadores mediante SEM-EDX. La Tabla 13 muestra la composición atómica y nominal de los catalizadores con cobalto y molibdeno. Se exceptuaron los catalizadores con wolframio, cuya cuantificación quedó impedida por el solapamiento de sus señales energéticas con las de la sílice del soporte.

Tabla 12. Composición atómica y nominal de los catalizadores con cobalto y molibdeno obtenidos mediante análisis EDX.

CATALIZADORES CON COBALTO

COMPOSICIÓN NORMALIZADA						Composición atómica				
CATALIZADOR	Co(%)	C(%)	O(%)	Al(%)	Si(%)	Co(%)	C(%)	O(%)	Al(%)	Si(%)
AL-MCM-41	0.00	18.95	51.80	0.81	28.44	0.00	26.93	55.27	0.51	1.5
3%CO/AL-MCM-41	0.86	21.80	49.79	0.95	26.60	0.25	30.63	52.53	0.60	15.99
5%CO/AL-MCM-41	2.96	18.48	49.31	5.18	23.56	0.88	26.88	53.85	3.36	14.66
10%CO/AL-MCM-41	7.65	15.58	47.88	5.65	23.24	2.38	23.77	54.85	3.84	15.16

CATALIZADORES CON MOLIBDENO

CATALIZADOR	Mo(%)	C(%)	O(%)	Al(%)	Si(%)	Mo(%)	C(%)	O(%)	Al(%)	Si(%)
3%MO/AL-MCM-41	8.65	16.18	49.61	2.29	22.62	1.65	24.70	56.87	2.00	14.77

5%MO/AL- MCM-41	9.78	11.42	45.17	4.64	28.98	2.01	18.72	55.57	3.39	20.31
10%MO/AL- MCM-41	20.85	0.00	48,67	6.45	24.03	4.99	0.00	69.87	5.49	19.65

Los resultados del análisis EDX confirmaron la correlación directa entre la carga nominal de los metales y su presencia en el soporte Al-MCM-41. Se observó que, a medida que aumentó el porcentaje de impregnación (3%, 5% y 10%) de los catalizadores de cobalto y de molibdeno, las fracciones atómica y nominal aumentaron. Estos resultados permitieron validar la eficacia del método de impregnación por exceso empleado en la síntesis de dichos catalizadores. Sin embargo, los resultados también evidencian la presencia de carbono en todas las muestras analizadas. Esto se debe a restos del agente director de estructura empleado durante el proceso de síntesis de la zeolita.

5.4. Producción y caracterización del biocombustible marino (BM)

5.4.1. Producción de biocombustibles marino (BM)

La producción de biocombustible marino se llevó a cabo variando la relación biodiésel-catalizador, empleando el soporte Al-MCM-41 como catalizador.

Para el cálculo del rendimiento de la producción del BM se utilizó la siguiente ecuación:

$$\gamma(\%) = \frac{PBM(g)}{PBM100_i(g)} \times 100 \quad (8)$$

Donde g se refiere al rendimiento de la reacción de producción del BM, expresado en porcentaje en peso. PBM es el peso del BM obtenido tras la destilación, considerando los rangos de temperatura de la destilación mencionados en la metodología. $PBM100_i$ es el peso del biodiésel en el reactor previo a la reacción de hidrotratamiento, en cada uno de los experimentos realizados.

La Figura 17 muestra los rendimientos obtenidos en estas reacciones.

Se observó que la mejor relación biodiésel-catalizador fue 20:0.1 (p/p), con un rendimiento máximo. Esto puede deberse a que las partículas del catalizador probablemente se encuentren mejor dispersas en el líquido durante la reacción, lo que favorece la interacción entre los reactivos y el catalizador.

Tras los resultados obtenidos en el rendimiento de las reacciones variando la relación biodiésel-catalizador, se evaluó el efecto de la temperatura sobre el rendimiento de la reacción a una relación de 20:0.1 (biodiésel:catalizador). Las reacciones se llevaron a cabo en un intervalo térmico de 200 a 350 °C (con incrementos de 50 °C), empleando Al-MCM-41 como catalizador en la relación previamente establecida de 20:0.1.

Los resultados obtenidos revelan que el aumento de la temperatura incrementa el rendimiento en la producción del BM. El máximo rendimiento se obtuvo del 75%.

Tras definir la mejor relación biodiésel-catalizador y la temperatura del proceso, se evaluó el desempeño de todos los catalizadores en las reacciones de hidrotratamiento para la producción de BM, acorde a la Tabla 7.

Los resultados obtenidos muestran que el catalizador 3 %Co/Al-MCM-41 alcanzó un rendimiento máximo. No obstante, se observó una disminución paulatina en los rendimientos al incrementar la carga de cobalto, registrándose en este último un rendimiento de apenas el 65%.

La Figura 20 muestra los rendimientos obtenidos de las reacciones con los catalizadores de Mo/Al-MCM-41.

Los resultados muestran que el rendimiento máximo se alcanzó con el catalizador 10%Mo/Al-MCM-41, seguido del catalizador 5%Mo/Al-MCM-41. En contraste, el catalizador con 3%Mo/Al-MCM-41 presentó una disminución del rendimiento del respecto al soporte original. Estos resultados concuerdan con la drástica reducción observada en el área superficial de este catalizador. La Figura 21 muestra los rendimientos obtenidos en las reacciones de producción de BM con catalizadores de W/ Al-MCM-41.

Los resultados muestran que el mayor rendimiento fue el del catalizador 10%W/Al-MCM-41, seguido del 3%W/Al-MCM-41, y el menor fue el de 5%W/Al-MCM-41. Estos resultados evidencian que el incremento del porcentaje de impregnación con wolframio mejora el rendimiento de la reacción.

5.5. Caracterización del BM producido

La composición de hidrocarburos del biocombustible marino se determinó mediante cromatografía de gases (GC). Se empleó un estándar de alcanos de Supelco (C₈-C₄₀), cuya curva de calibración permitió establecer con precisión el perfil de composición del biocombustible marino en este trabajo.

5.5.1. Distribución de hidrocarburos:

La Figura 22 muestra el gráfico de distribución de las cadenas de hidrocarburos obtenidas mediante catalizadores de Co, Mo y W soportados en Al-MCM-41.

Los resultados muestran una selectividad predominante hacia el nonadecano (C₁₉), con fracciones molares cercanas a 0.8, para todos los catalizadores y en todos los porcentajes de impregnación. Sin embargo, en los catalizadores con wolframio se observó, además, la aparición de hidrocarburos de cadena más larga (C₂₃ y C₂₄). Este suceso puede atribuirse a procesos de condensación durante la reacción o al acoplamiento de fragmentos, es decir, la interacción entre hidrocarburos de cadena larga y fragmentos generados por procesos de hidrocraqueo.

5.5.2. Conversión de AGL a hidrocarburos lineales.

La conversión de biodiésel se determinó tal como se presentó en la sección 4.2.2.

La Figura 23 presenta las conversiones obtenidas para la producción del BM, variando la relación biodiésel-catalizador, empleando el soporte Al-MCM-41 como catalizador.

Los resultados de conversión demuestran que la mayor conversión se obtuvo con una relación biodiesel-Al-MCM-41 de 20:0.1 (p/p). Estos resultados concuerdan con los valores de selectividad y rendimientos obtenidos para esta reacción. Se observa que el incremento de la proporción del catalizador disminuye progresivamente la conversión.

La Figura 24 muestra las conversiones obtenidas a partir de la evaluación del efecto de la temperatura en las reacciones.

El perfil de conversión obtenido demuestra que la conversión máxima se alcanzó a 350 °C. Este incremento térmico favoreció la transformación de los FAMES en los hidrocarburos lineales esperados. El aumento de la temperatura eleva la energía cinética de las moléculas del reactivo, lo que facilita que la reacción supere la barrera de energía de activación necesaria para la ruptura del enlace químico en el sitio activo.

La Figura 25 presenta las conversiones obtenidas mediante la evaluación de las reacciones catalizadas por Co/Al-MCM-41, Mo/Al-MCM-41 y W/Al-MCM-41.

Los resultados de conversión empleando los catalizadores de cobalto (3%, 5% y 10%) soportados en Al-MCM-41 mostraron que la máxima conversión se alcanzó con los catalizadores de carga 5%Co y 10%Co. Se observó un incremento progresivo en la conversión al aumentar la carga metálica; sin embargo, al pasar del 5% al 10% de Co, la conversión se estabilizó. Estos resultados confirmaron que la impregnación con cobalto sobre Al-MCM-41 mejora la ruptura de los FAMES, lo que favorece la conversión de biodiésel en biocombustible marino.

Los resultados con el catalizador 10%Mo/Al-MCM-41 presentaron la máxima conversión. Este comportamiento sugiere que el incremento de la carga de molibdeno favorece la formación de una mayor densidad de sitios activos metálicos en la superficie del soporte, los cuales favorecen la ruptura de las cadenas de FAMES. Es importante destacar los resultados obtenidos con soporte puro. Al-MCM-41 presentó una conversión base; no obstante, al incorporar una carga de 3% de Mo, la conversión disminuyó. Estos resultados sugieren que, a bajas concentraciones, las especies de molibdeno se depositan preferentemente sobre los centros activos del soporte, bloqueándolos y sin aportar suficiente actividad catalítica.

Asimismo, los catalizadores de wolframio mostraron una tendencia decreciente de la conversión en comparación con el soporte. Mientras que Al-MCM-41 presentó buenas conversiones, la incorporación de wolframio redujo dichas conversiones. Estos resultados sugieren que el wolframio presenta una dispersión deficiente en la superficie del soporte, lo que favorece la formación de aglomerados y obstruye los canales mesoporosos de Al-MCM-41.

Los resultados de esta sección demuestran que Al-MCM-41 no solo cumple la función de soporte, sino que también actúa como catalizador. La presencia de aluminio en la estructura de MCM-41 genera centros activos que facilitan la quimisorción de los reactivos. Además, al ser un material mesoporoso permite que las moléculas voluminosas presentes en los FAMES accedan y entren en contacto con dichos sitios activos. No obstante, podemos destacar que los metales de

transición modularon el rendimiento, la selectividad y las conversiones en las reacciones.

5.5. Propiedades fisicoquímicas del biocombustible marino (BM)

La Tabla 14 muestra los resultados obtenidos para la densidad, la viscosidad, el índice de refracción, el poder calorífico y el punto de congelamiento del biocombustible marino producido, así como la comparación con el combustible destilado marino y con los límites establecidos por la norma ISO 8217:2017.

Tabla 13. Comparación de las propiedades fisicoquímicas del BM y del CMD con sus límites establecidos en la norma ISO 8217:2017.

PROPIEDAD FISICOQUÍMICA	BIOMARINO (BM)	COMBUSTIBLE	MÉTODO Y REFERENCIA
		MARINO DESTILADO (CMD)	
VISCOSIDAD CINEMÁTICA (MM ² /S 40°C)	---	11-2	ISO 3104
DENSIDAD (KG/M ³ 15°C)	---	0.90	ISO 3675
ÍNDICE DE REFRACCIÓN	---	NA	NA
PODER CALORÍFICO (MJ/KG)	---	43	ISO 2719; see 6.4
PUNTO DE CONGELAMIENTO (°C)	10	-16	ISO 3015; see 6.11

BM: Biocombustible marino

CMD: Combustible marino destilado

La caracterización de las propiedades fisicoquímicas del biocombustible marino (BM) puro en comparación a la norma ISO 8217:2017 reveló un cumplimiento parcial

de los estándares de calidad. La viscosidad cinemática se mantuvo dentro de los límites permitidos. Por su parte, la densidad y el poder calorífico mostraron valores muy cercanos, situándose a solo 0.2 unidades y 3 MJ/kg de sus respectivos límites establecidos. No obstante, el punto de congelamiento representó una desviación crítica, superando el límite máximo establecido por la norma.

El elevado punto de congelamiento determinado para el BM (10 °C) puede atribuirse a la composición química detallada en los perfiles de selectividad de hidrocarburos (Figuras 24, 25 y 26). Donde se observa la predominancia de la formación de cadenas lineales (C₁₉-C₂₁). Estas n-parafinas lineales presentan un elevado punto de congelamiento. Una mayor presencia de estas parafinas lineales no solo aumenta el punto de congelamiento, sino que también incrementa la resistencia interna al flujo. Teniendo como consecuencia una viscosidad relativamente alta, aunque dentro de los límites de la norma.

No obstante, el poder calorífico obtenido fue ligeramente inferior al del combustible marino fósil (43 MJ/kg). Esta diferencia puede atribuirse a las diferencias en las cadenas de hidrocarburos presentes en la composición del BM en comparación con el fósil (tipo bunker), en el cual suelen distribuirse en hidrocarburos del tipo: 40% parafinas, 15% isoparafinas, 30% cicloparafinas y 15% aromáticos, los cuales aportan un valor energético superior.

El valor obtenido de la densidad se encuentra dentro de los rangos establecidos por la norma ISO 8217 para combustibles destilados marinos. El BM producido presentó una densidad ligeramente menor, característica de los biocombustibles oxigenados. Este resultado concuerda con el valor de poder calorífico obtenido. Las propiedades

fisicoquímicas que no cumplen con los límites establecidos por la normativa vigente podrían corregirse mediante la incorporación de aditivos.

5.5.1 Propiedades fisicoquímicas del biocombustible marino (BM) y sus mezclas con isómeros de hexanol

Esta sección presenta la densidad, viscosidad e índice de refracción de las mezclas biocombustible mariano + isómeros de hexanol como una función de la temperatura y composición.

5.5.2. Densidad de las mezclas de biocombustible marino e isómeros de hexanol

A continuación, se muestran los valores de densidad de las mezclas de BM con hexanol, 2-etil-1-butanol y 4-metil-1-pentanol en función de la composición y a una temperatura de 15 °C para densidad y 40 °C para viscosidad. Los valores de densidad y viscosidad han sido comparados con los límites establecidos en la norma ISO 8217: 2017.

Se presenta la Figura 26, que muestra la comparación de densidades de las mezclas de BM con: a) 2-etil-1-butanol, b) 1-hexanol y c) 4-metil-2-pentanol. Las mediciones se realizaron en un intervalo de temperatura de 288.15 a 338.15 K, con incrementos de 5 K entre cada punto experimental.

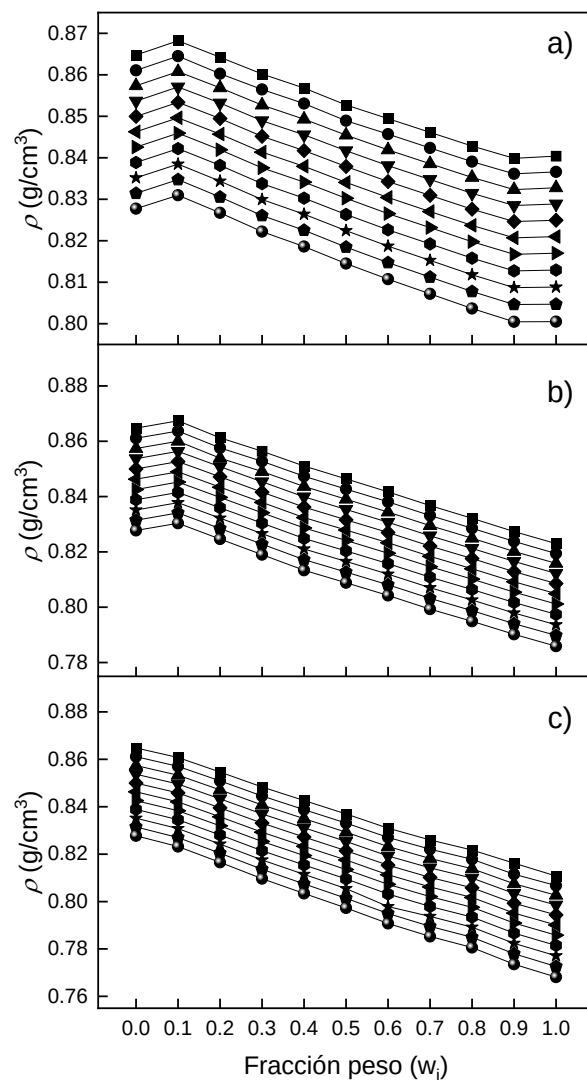


Figura 16. Densidad de las mezclas: a) 2-etil-1-butanol, b) 1-hexanol, c) 4-metil-2-pentanol a diferentes temperaturas. ■, 288.15; ●, 293.15; ▲, 298.15; ▼, 303.15; ◆, 308.15; ◄, 313.15; ●, 323.15; ★, 328.15; ◆, 333.15; ●, 338.15.

Se observa que la densidad disminuye linealmente a medida que aumenta la temperatura. Al incrementar la temperatura, el aumento de la energía cinética molecular provoca una mayor separación intermolecular, lo que reduce la densidad de las mezclas. No obstante, se identifica una desviación de la linealidad en

concentraciones bajas de aditivo <0.2 para los sistemas 2-etil-1-butanol y 1-hexanol. Este comportamiento puede atribuirse a que las moléculas de los alcoholes se acomodan en los espacios intermoleculares del BM, lo que mejora ligeramente la densidad. En contraste, el sistema 4-metil-2-pentanol genera mezclas menos densas debido a su estructura ramificada próxima al grupo hidroxilo, lo que le confiere un mayor volumen excluido. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Weng et al. (1999), donde se establece que el grado de ramificación y la posición del grupo OH influyen directamente en la magnitud de las fuerzas intermoleculares. [56].

Cabe destacar que la totalidad de las mezclas evaluadas se sitúa por debajo del límite máximo de densidad establecido por la normativa ISO 8217:2017. Este cumplimiento se mantiene de manera consistente pese al descenso progresivo de los límites de densidad observados al incrementar la temperatura de los sistemas.

5.5.3. Viscosidad cinemática de las mezclas de biocombustible marino (BM) y sus mezclas con isómeros de hexanol

En el caso de los aditivos puros (1-hexanol, 2-etil-1-butanol y 4-metil-1-pentanol), presentaron una viscosidad cinemática inferior a la del BM y a la del CMD. En la Figura 27 se presenta una comparativa de las viscosidades de las mezclas de BM con: a) 2-etil-1-butanol, b) 1-hexanol y c) 4-metil-2-pentanol. Las mediciones se realizaron en un intervalo de temperatura de 288.15 a 338.15 K, con incrementos de 5 K entre los puntos experimentales.

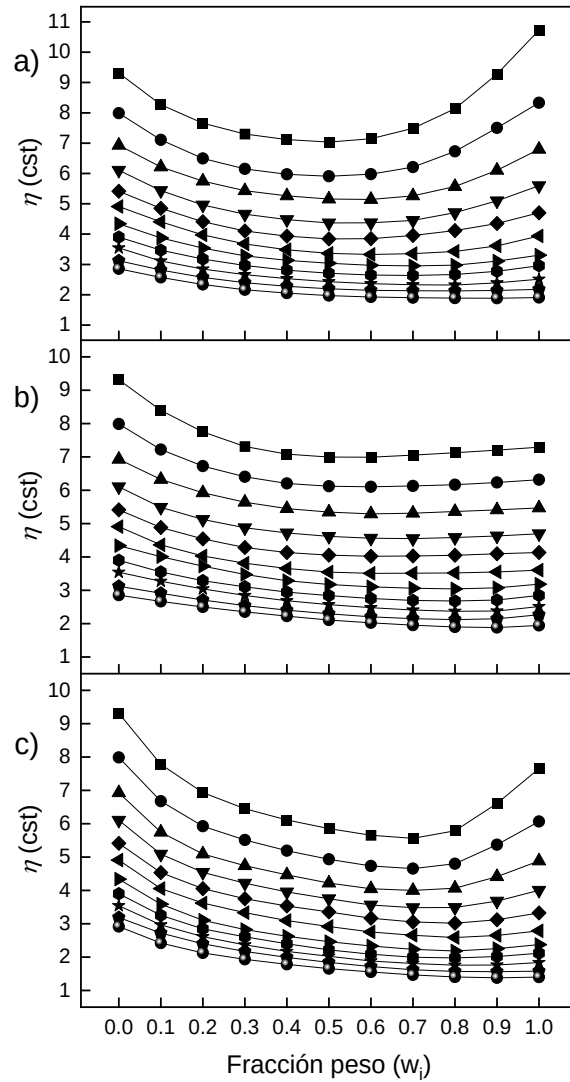


Figura 17. Viscosidades de las mezclas: a) 2-etil-1-butanol, b) 1-hexanol, c) 4-metil-2-pentanol a diferentes temperaturas. ■, 288.15; ●, 293.15; ▲, 298.15; ▼, 303.15; ◆, 308.15; ◄, 313.15; ●, 323.15; ★, 328.15; ◆, 333.15; ●, 338.15.

Los resultados experimentales muestran que la viscosidad cinemática de las mezclas presenta una dependencia inversa de la temperatura: disminuye a medida que aumenta la temperatura. Este comportamiento es esperable porque el aumento

de la energía cinética debilita las fuerzas intermoleculares. Entre los isómeros evaluados, el 2-etil-1-butanol mostró la mayor resistencia al flujo, fenómeno atribuido al efecto estérico de su composición molecular (ramificación lateral). Cabe destacar que todos los sistemas estudiados se mantienen dentro del rango establecido (2-11 cSt) y cumplen con las especificaciones de la norma ISO 8217:2017 para combustibles marinos destilados. Esto demuestra que la adición de estos isómeros de hexanol no compromete la integridad de los sistemas de inyección de los motores marinos, lo que garantiza una atomización adecuada en el motor.

5.5.3. Índice de refracción de las mezclas de biocombustible marino (BM) y sus mezclas con isómeros de hexanol

La medición de esta propiedad, aunque no es un requisito de la norma ISO 8217:2017, se incluyó como parámetro fundamental para una caracterización más robusta de la interacción entre el BM y los isómeros de hexanol.

En la Figura 28 se presenta una comparativa de los índices de refracción de las mezclas de BM con: a) 2-etil-1-butanol, b) 1-hexanol y c) 4-metil-2-pentanol. Las mediciones se realizaron en un intervalo de temperatura de 288.15 a 338.15 K, con incrementos de 5 K entre los puntos experimentales.

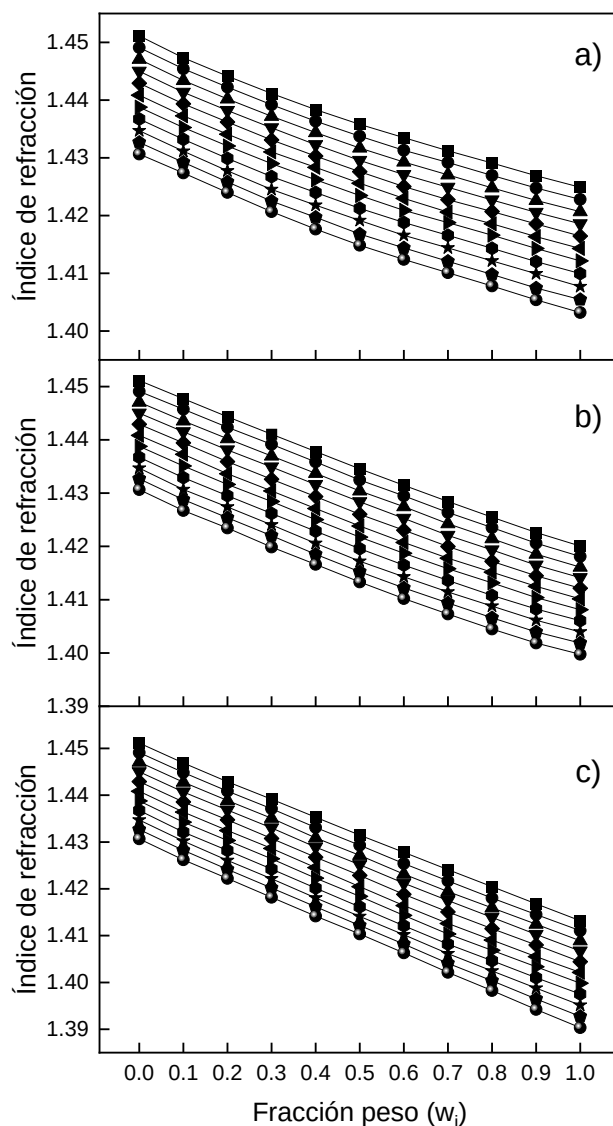


Figura 18. Índices de refracción de las mezclas: a) 2-etil-1-butanol, b) 1-hexanol, c) 4-metil-2-pentanol a diferentes temperaturas. ■, 288.15; ●, 293.15; ▲, 298.15; ▼, 303.15; ◆, 308.15; ◄, 313.15; ●, 323.15; ★, 328.15; ◆, 333.15; ●, 338.15.

Los resultados muestran que las curvas del índice de refracción son lineales con el aumento de la fracción de alcohol. Asimismo, a medida que aumenta la temperatura, disminuye proporcionalmente el índice de refracción, lo cual es consistente con los datos de densidad obtenidos. Esto puede ser atribuido a la expansión térmica del

volumen molar; al aumentar la temperatura, la separación intermolecular se incrementa, reduciendo así la densidad óptica, y por consiguiente la interacción de la radiación de la luz con la materia.

5.5.4. Caracterización de las mezclas de biocombustible marino e isómeros de hexanol

La Figura 29 muestra la comparación entre la densidad obtenida de las mezclas de BM+ isómeros de hexanol y el límite máximo establecido por la norma ISO 8217. Se observa que todas las mezclas obtenidas en todos los sistemas se ajustan a lo establecido.

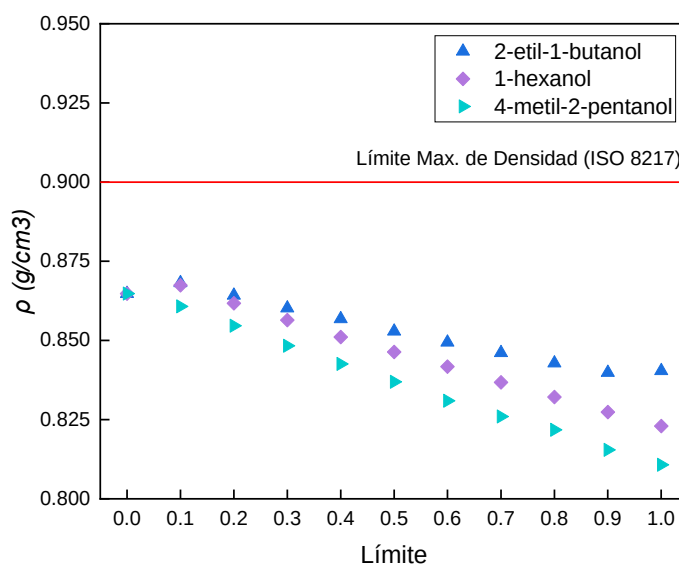


Figura 19. Comparación entre la densidad obtenida de las mezclas de BM+ isómeros de hexanol y el límite máximo establecido por la norma ISO 8217.

La Figura 30 muestra la comparación entre las viscosidades obtenidas de las mezclas de BM+ isómeros de hexanol y el límite máximo y mínimo establecido por la norma ISO 8217. Se observa que todas las mezclas obtenidas en todos los sistemas se ajustan a lo establecido.

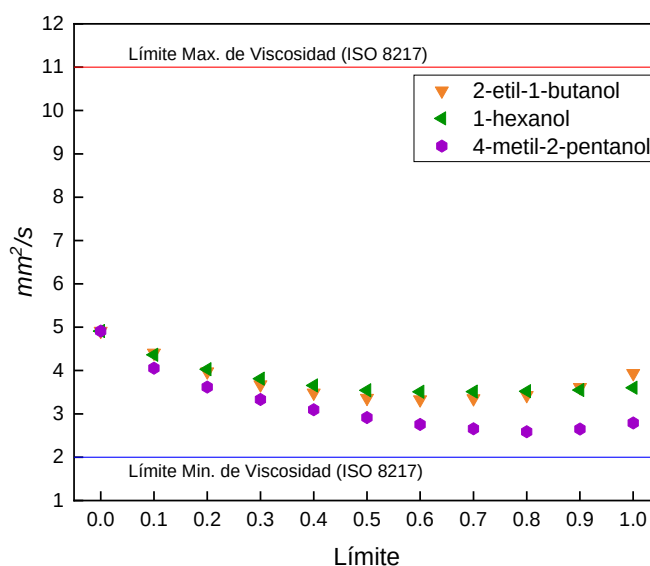


Figura 20. Comparación entre las viscosidades obtenidas de las mezclas de BM+ isómeros de hexanol y el límite máximo y mínimo establecido por la norma ISO 8217.

Una vez determinadas la densidad y la viscosidad en todas las concentraciones de los tres sistemas, se seleccionaron dos mezclas representativas de cada sistema para determinar su poder calorífico y el punto de congelamiento. Esta selección se basó en los valores máximos y mínimos de las propiedades previamente medidas. Con el objetivo de evaluar el comportamiento del biocombustible marino en sus límites operativos. Con el fin de garantizar que cualquier composición intermedia dentro del rango estudiado mantenga un desempeño predecible.

Los resultados experimentales indican que todas las mezclas de los tres sistemas estudiados cumplen con los límites máximos y mínimos establecidos por la norma marítima ISO 8217:2017. No obstante, se observó que el poder calorífico de las muestras está 3% por debajo del límite inferior normativo. Esta deficiencia sugiere que los isómeros de hexanol empleados no mejoran el poder calorífico. Esto puede deberse al bajo poder calorífico de los aditivos puros. Asimismo, se destaca que ninguna de las mezclas alcanzó el punto de congelamiento establecido por la normativa marítima, con una diferencia de 26 °C respecto del límite de cumplimiento. Por lo anterior, una alternativa es utilizar estas mezclas como aditivos del combustible marino fósil, buscando el cumplimiento de los límites establecidos por la norma ISO 8217:2017.

5.6. Ajuste de propiedades derivadas: volumen molar en exceso, desviación de la viscosidad y desviación del índice de refracción.

Las propiedades de exceso y desviación, tales como el volumen molar en exceso (VE), la desviación de la viscosidad ($\Delta\eta$) y la desviación del índice de refracción (Δn_D), se calcularon para todas las mezclas de BM+ isómeros de hexanol en todo el rango de concentraciones. Este estudio se realizó en un rango de temperatura de 288.15 K a 338.15 K, con incrementos de 5 K. La relevancia del cálculo de estas propiedades radica en la elucidación de la naturaleza de las interacciones moleculares que se dan entre las moléculas en solución. Además, se ajustó el modelo de Redlich-Kister (RK) a los datos experimentales y se observó hasta qué punto la mezcla BM + isómeros de hexanol se desvía del comportamiento ideal según dicho modelo.

La Figura 31 muestra los resultados obtenidos para el volumen molar en exceso en función de la fracción molar del aditivo, así como los calculados por el modelo RK.

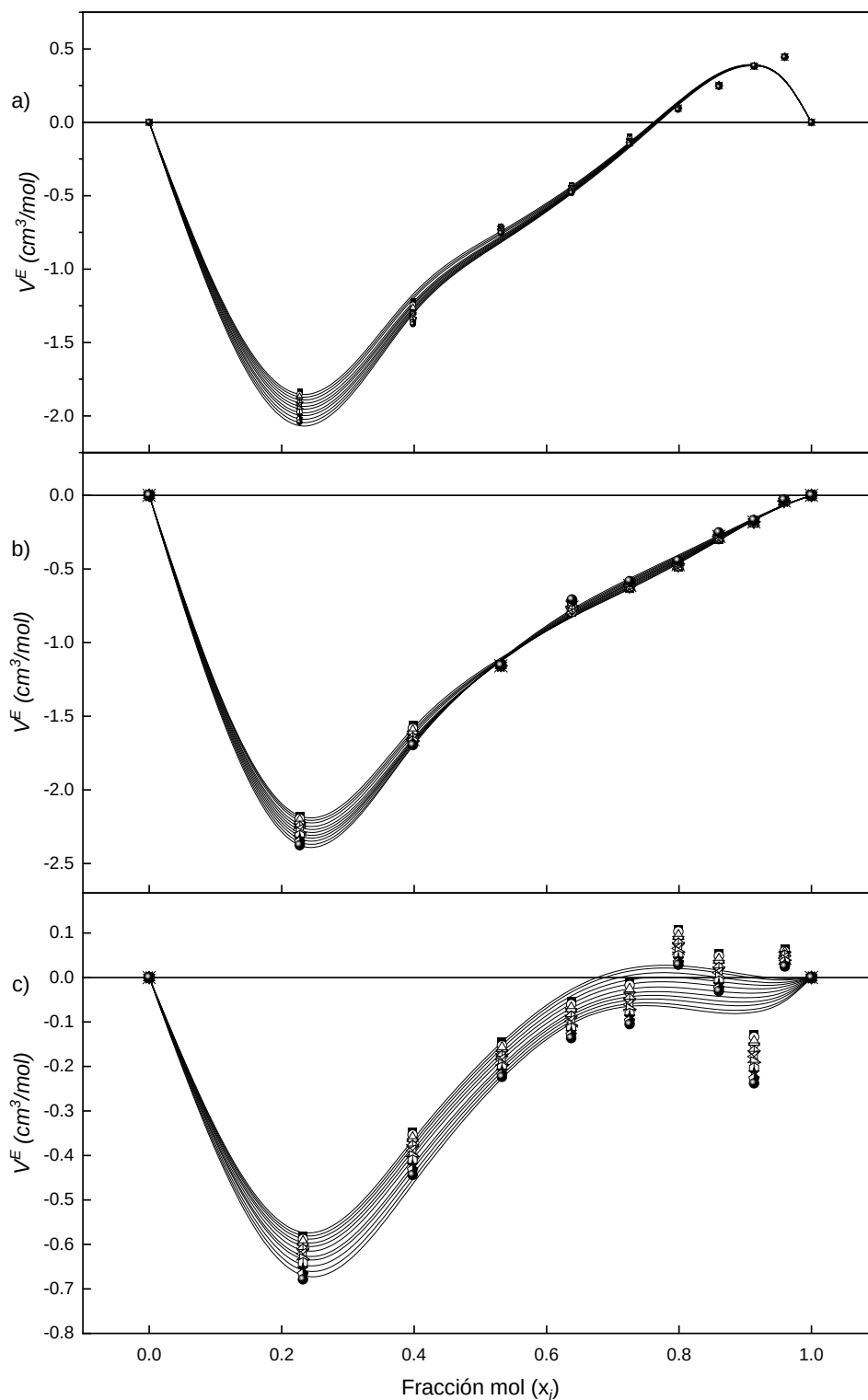


Figura 21. Comparación entre los valores experimentales de volumen en exceso molar (V^E) y los calculados por el modelo de Redlich-Kister. a) 2-etil-1-butanol, b) 1-hexanol, c) 4-metil-2-pentanol a diferentes temperaturas. ■, 288.15; ●, 293.15; ▲, 298.15; ▼, 303.1; ◆, 308.15; ◀, 313.15; ●, 323.15; ★, 328.15; ◆, 333.15; ●, 338.15.

El volumen molar en exceso V^E es una propiedad que nos indica la diferencia entre el volumen real de la mezcla y el volumen que tendría si se comportara como una disolución ideal. La gráfica obtenida muestra valores negativos con contracciones significativas, cercanos a $-2 \text{ cm}^3/\text{mol}$. Los sistemas a) y b) presentaron una correlación lineal y continua de tipo Redlich-Kister (RK) con los datos experimentales. En contraste, el sistema c) mostró un comportamiento disperso, lo que sugiere que las interacciones de esta mezcla no se ajustan estrictamente al modelo de RK.

La Figura 32 muestra los resultados obtenidos para el ajuste de la desviación de la viscosidad en función de la fracción molar del aditivo, así como los calculados por el modelo RK.

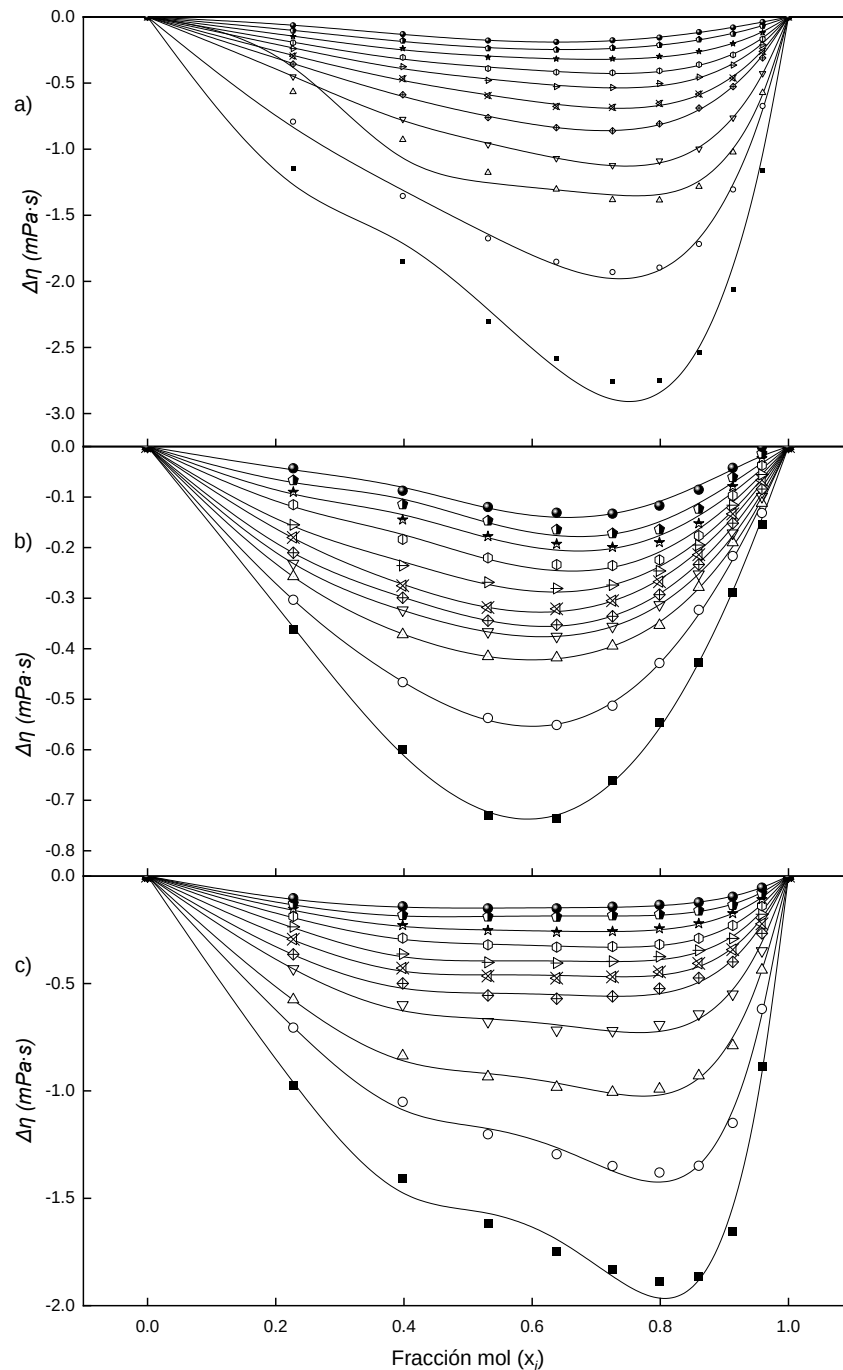


Figura 22. Comparación entre los valores experimentales de desviación de viscosidad ($\Delta\eta$) y los calculados por el modelo de Redlich-Kister. a) 2-etil-1-butanol, b) 1-hexanol, c) 4-metil-2-pentanol a diferentes temperaturas. ■, 288.15; ●, 293.15; ▲, 298.15; ▼, 303.15; ◆, 308.15; ◀, 313.15; ●, 323.15; ★, 328.15; ◆, 333.15; ●, 338.15.

Los resultados presentan las desviaciones de viscosidad $\Delta\eta$ y su correlación correspondiente mediante el modelo de Redlich-Kister (RK). Se observaron desviaciones negativas en todo el intervalo de composición [28].

La Figura 33 presenta los gráficos obtenidos para el ajuste de la desviación del índice de refracción (Δn_D) en función de la fracción molar del aditivo, así como los calculados por el modelo RK.

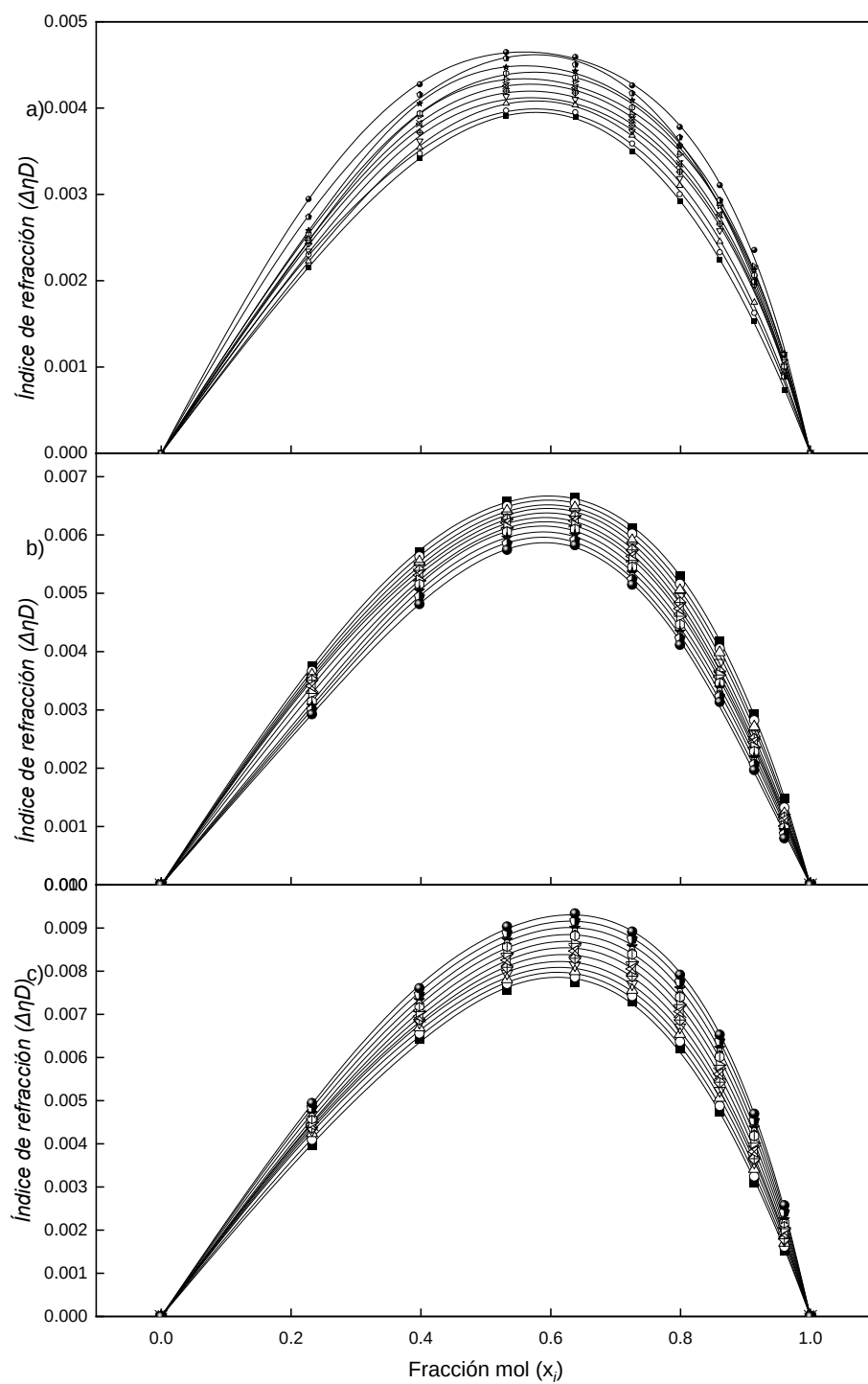


Figura 23. Comparación entre los valores experimentales de desviación del índice de refracción (Δn_D) y los calculados por el modelo de Redlich-Kister . a) 2-etil-1-butanol, b) 1-hexanol, c) 4-metil-2-pentanol a diferentes temperaturas. ■, 288.15; ●, 293.15; ▲, 298.15; ▼, 303.15; ◆, 308.15; ◀, 313.15; ●, 323.15; ★, 328.15; ◆, 333.15; ●, 338.15.

Los resultados muestran que la desviación del índice de refracción de los sistemas estudiados fue positiva en todo el rango de composición de la fracción molar. Además, se observa que el ajuste del modelo de RK está completamente correlacionado con los datos experimentales.

5.7. Evaluación de impacto ambiental

La Tabla 16 presenta la construcción del inventario correspondiente al proceso de producción del BM.

Los resultados obtenidos en esta fase de investigación corresponden a los inventarios de ciclo de vida de las etapas que conforman el proceso de producción del biocombustible marino, empleando específicamente el catalizador Co/Al-MCM-41. A partir de estos resultados se ha identificado que las etapas con mayor consumo energético son las: 1.3 (Baño ácido), seguida de la 3.1 (Ester/Transe), la 4.1 (Mix 1: activación del caolín) y la 5.1 (Síntesis del catalizador).

Si bien este proyecto se fundamenta en un proceso de revalorización de residuos, como los LAR, en su calidad de materia prima, el proceso de producción actual demanda un consumo de energía considerable. La detección de estos puntos críticos evidencia aspectos deficientes que deben optimizarse, a fin de reducir las cargas ambientales asociadas a la producción del biocombustible.

El diagrama de Sankey revela que el mayor consumo energético en la producción del biocombustible marino a escala de laboratorio corresponde a la síntesis del soporte mesoporoso Al-MCM-41, que representa el 57% del consumo energético total del proceso. Este elevado requerimiento energético se atribuye principalmente

a las condiciones de obtención de los precursores químicos y, en particular, a las etapas térmicas asociadas a la calcinación y la activación del material para consolidar sus propiedades catalíticas. Estos resultados identifican áreas clave de oportunidad orientadas a optimizar las rutas de síntesis catalíticas o, alternativamente, al diseño e implementación de sistemas catalíticos sustentables.

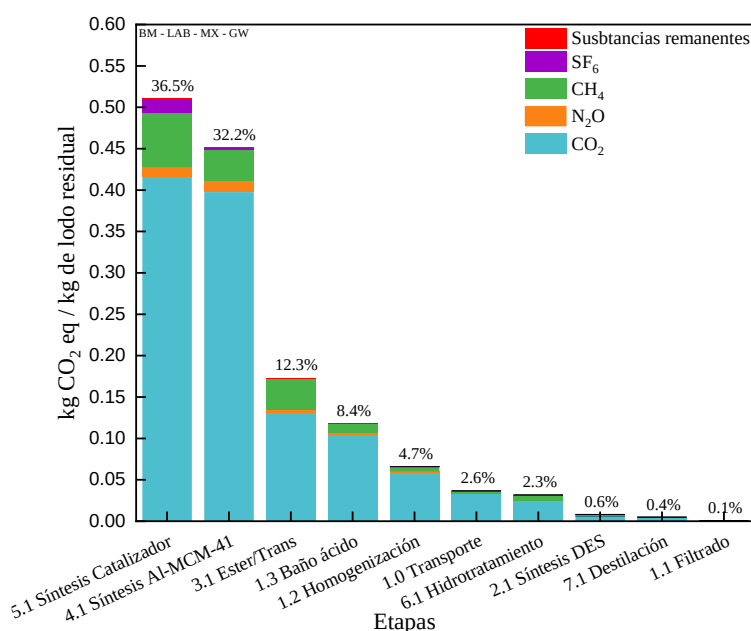


Figura 24. Evaluación de impacto ambiental del proceso de producción del BM evaluado es escenario de escala laboratorio en indicador de cambio climático (ICC).

Respecto al indicador de impacto ambiental del cambio climático, la evaluación determinó que las etapas 5.1 (síntesis del catalizador) y 4.1 (síntesis de Al-MCM-41) contribuyen de manera mayor a la huella de carbono del proceso de producción del BM. La síntesis del catalizador y la preparación del soporte registraron emisiones de 0.40 y 0.38 kg de CO₂ eq, respectivamente. Estos resultados demuestran que las mayores emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se concentran en la parte termoquímica destinada a las fases activas y a los soportes, lo que consolida

estas subetapas como los principales puntos críticos ambientales en este análisis de ciclo de vida.

5.7.1. Comparación del BM frente a la referencia internacional sobre combustibles fósiles

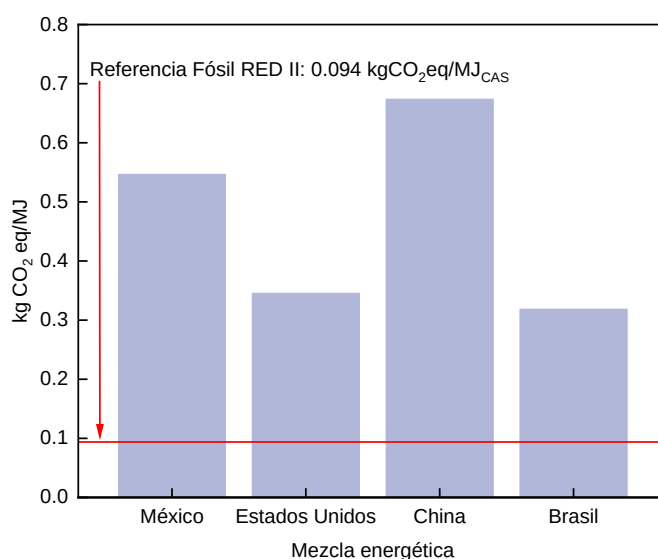


Figura 25. Comparación del impacto ambiental entre el escenario estudiado, las regulaciones RED II y CORSIA y los combustibles fósiles. -, referencia RED II; -, referencia CORSIA.

En la figura 36 se presenta un análisis comparativo del impacto ambiental obtenido para el proceso de producción del BM desarrollado en este trabajo y los límites máximos permisibles estipulados por el Reglamento Delegado (UE) 2023/1185, el cual complementa la Directiva (UE) 2018/2001 (RED II) relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables para combustibles avanzados. La evaluación de impacto ambiental determinó que el escenario actual no logra situarse por debajo de los umbrales de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) establecidos por la normativa europea. Consecuentemente, dentro de las fronteras

y consideraciones metodológicas establecidas en este estudio, el BM producido a partir de lodos residuales no califica rigurosamente como un combustible alternativo regulado para el transporte marítimo internacional. No obstante, este tipo de análisis permitió identificar los puntos críticos del proceso y propuestas para su viabilidad, con el fin de proponer estrategias de optimización y codiseño que viabilicen la sustentabilidad del proceso de producción.

7. CONCLUSIONES

- Los catalizadores de Co, Mo y W soportados en Al-MCM-41 demostraron una alta selectividad hacia rutas de descarboxilación durante las reacciones de hidrotratamiento, lo que favoreció la producción de hidrocarburos de cadenas largas (C₁₆-C₂₂).
- La incorporación de isómeros de hexanol como aditivos resultó efectiva, manteniendo la viscosidad y la densidad dentro de los máximos y mínimos establecidos por la norma marítima ISO 8217 2017.
- Las mezclas estudiadas presentaron un poder calorífico ligeramente inferior al establecido, situándose 3% por debajo del límite normativo.
- Los valores obtenidos para el punto de congelamiento exceden los límites permisibles establecidos en la normativa.
- El biocombustible marino obtenido presenta una distribución de cadenas de hidrocarburos (C₁₆-C₂₂) comparable a la de su homólogo fósil. Debido a sus propiedades fisicoquímicas, el biocombustible marino producido se considera apto para su implementación como sustituto parcial del combustible marino

fósil, incorporándose en mezclas que combinen biocombustible marino, isómeros de hexanol y combustible tipo búnker.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] “El transporte marítimo ,” El Orden Mundial .
- [2] M. Sofiev *et al.*, “Cleaner fuels for ships provide public health benefits with climate tradeoffs,” *Nat. Commun.*, vol. 9, no. 1, p. 406, Feb. 2018, doi: 10.1038/s41467-017-02774-9.
- [3] A. Foretich, G. G. Zaimes, T. R. Hawkins, and E. Newes, “Challenges and opportunities for alternative fuels in the maritime sector,” *Maritime Transport Research*, vol. 2, p. 100033, 2021, doi: 10.1016/j.martra.2021.100033.
- [4] R. Gutierrez Fraile, “Nuevos combustibles ecológicos para buques,” 2022.
- [5] “Biofuels as Marine Fuel,” *American Bureau Shipping*, pp. 1–32, 2021.
- [6] H. de Lasa, E. Salaices, J. Mazumder, and R. Lucky, “Catalytic Steam Gasification of Biomass: Catalysts, Thermodynamics and Kinetics,” *Chem. Rev.*, vol. 111, no. 9, pp. 5404–5433, Sep. 2011, doi: 10.1021/cr200024w.
- [7] H. Xing, C. Stuart, S. Spence, and H. Chen, “Alternative fuel options for low carbon maritime transportation: Pathways to 2050,” *J. Clean. Prod.*, vol. 297, p. 126651, May 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126651.
- [8] Ma. Laura ORTIZ-HERNÁNDEZ, Margarita E. GUTIÉRREZ-RUIZ, and Enrique SANCHEZ-SALINAS, “PROPUESTA DE MANEJO DE LOS LODOS RESIDUALES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LA CIUDAD INDUSTRIAL DEL VALLE DE CUERNAVACA, ESTADO DE MORELOS, MÉXICO,” *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* , vol. 11, 1995.

- [9] E. Contreras-Vázquez, “PRODUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS BIOTURBOSINA A PARTIR DE ÁCIDOS GRASOS LIBRES PRESENTES EN LODOS RESIDUALES: ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL,” Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey Nuevo León, 2024.
- [10] M. N. Siddiquee and S. Rohani, “Experimental analysis of lipid extraction and biodiesel production from wastewater sludge,” *Fuel Processing Technology*, vol. 92, no. 12, pp. 2241–2251, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.fuproc.2011.07.018.
- [11] D. Acosta-Rubio, L. Castro-Camacho, and C. A. Moreno-Arias, “Pirólisis rápida para producir biocombustibles con residuos sólidos urbanos: estudio de caso, Madrid, Cundinamarca,” *Gestión y Ambiente*, vol. 24, no. Supl3, pp. 47–58, Dec. 2021, doi: 10.15446/ga.v24nSupl3.97273.
- [12] VICTÓRIA VICTOR SOARES, “PIRÓLISE CATALÍTICA DO ÓLEO DE MAMONA PARA OBTENÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL MARÍTIMO (BUNKER RENOVÁVEL),” UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE, 2022.
- [13] P. Straka, M. Auersvald, D. Vrtiška, H. Kittel, P. Šimáček, and P. Vozka, “Production of transportation fuels via hydrotreating of scrap tires pyrolysis oil,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 460, p. 141764, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.cej.2023.141764.

- [14] R. R. C. Monteiro *et al.*, “Production of Jet Biofuels by Catalytic Hydroprocessing of Esters and Fatty Acids: A Review,” *Catalysts*, vol. 12, no. 2, p. 237, Feb. 2022, doi: 10.3390/catal12020237.
- [15] B. H. H. Goh *et al.*, “Progress in utilisation of waste cooking oil for sustainable biodiesel and biojet fuel production,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 223, p. 113296, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113296.
- [16] T. Kandaramath Hari, Z. Yaakob, and N. N. Binitha, “Aviation biofuel from renewable resources: Routes, opportunities and challenges,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 1234–1244, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.10.095.
- [17] J. Yang, Z. Xin, Q. (Sophia) He, K. Corscadden, and H. Niu, “An overview on performance characteristics of bio-jet fuels,” *Fuel*, vol. 237, pp. 916–936, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2018.10.079.
- [18] J. Yang, Z. Xin, Q. (Sophia) He, K. Corscadden, and H. Niu, “An overview on performance characteristics of bio-jet fuels,” *Fuel*, vol. 237, pp. 916–936, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2018.10.079.
- [19] E. Santillan-Jimenez and M. Crocker, “Catalytic deoxygenation of fatty acids and their derivatives to hydrocarbon fuels via decarboxylation/decarbonylation,” *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, vol. 87, no. 8, pp. 1041–1050, Aug. 2012, doi: 10.1002/jctb.3775.

- [20] A. Srifa, K. Faungnawakij, V. Itthibenchapong, N. Viriya-empikul, T. Charinpanitkul, and S. Assabumrungrat, "Production of bio-hydrogenated diesel by catalytic hydrotreating of palm oil over NiMoS₂/γ-Al₂O₃ catalyst," *Bioresour. Technol.*, vol. 158, pp. 81–90, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.biortech.2014.01.100.
- [21] Victor - Soares Victoria, "PIRÓLISE CATALÍTICA DO ÓLEO DE MAMONA PARA OBTENÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL MARÍTIMO (BUNKER RENOVÁVEL)," UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE, 2022.
- [22] L. T. Vargas-Ibáñez, G. A. Iglesias-Silva, J. J. Cano-Gómez, C. Escamilla-Alvarado, and M. A. Berrones-Eguiluz, "Densities and Viscosities for Binary Liquid Mixtures of Biodiesel + 1-Pentanol, 2-Pentanol, or 2-Methyl-1-Butanol from (288.15 to 338.15) K at 0.1 MPa," *J. Chem. Eng. Data*, vol. 63, no. 7, pp. 2438–2450, Jul. 2018, doi: 10.1021/acs.jced.7b00996.
- [23] C. W. Mohd Noor, M. M. Noor, and R. Mamat, "Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 94, pp. 127–142, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.05.031.
- [24] Briceño-Cantú Ayrton Joao, "Bioturbosina a partir de ácidos grasos esterificados: Producción y propiedades de sus mezclas con turbosina + aditivos," Universidad Autónoma de Nuevo León, 2021.

- [25] S. H. Park, H. K. Suh, and C. S. Lee, "Nozzle flow and atomization characteristics of ethanol blended biodiesel fuel," *Renew. Energy*, vol. 35, no. 1, pp. 144–150, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.renene.2009.06.012.
- [26] J. J. Cano-Gómez, G. A. Iglesias-Silva, P. Rivas, C. O. Díaz-Ovalle, and F. de Jesús Cerino-Córdova, "Densities and Viscosities for Binary Liquid Mixtures of Biodiesel + 1-Butanol, + Isobutyl Alcohol, or + 2-Butanol from 293.15 to 333.15 K at 0.1 MPa," *J. Chem. Eng. Data*, vol. 62, no. 10, pp. 3391–3400, Oct. 2017, doi: 10.1021/acs.jced.7b00440.
- [27] B. S. Moreno-Caballero, J. J. Cano-Gómez, G. A. Flores-Escamilla, G. A. Iglesias-Silva, M. M. Alcalá-Rodríguez, and J.-M. Levêque, "Thermophysical Properties of Biodiesel with Ethyl Levulinate, Ethyl Acetoacetate, and Ethyl Pyruvate + MgO Mixtures from 288.15 to 338.15 K," *J. Chem. Eng. Data*, vol. 68, no. 1, pp. 82–99, Jan. 2023, doi: 10.1021/acs.jced.2c00598.
- [28] L. T. Vargas-Ibáñez, J. J. Cano-Gómez, G. A. Iglesias-Silva, I. A. Santos-López, O. E. Benavides-Moran, and P. Zwolinski, "Physical Properties of Biodiesel Blended with Hexanol Isomers at Different Temperatures: Surface Tension, Density, Viscosity, and Refractive Index," *J. Chem. Eng. Data*, vol. 65, no. 7, pp. 3706–3727, Jul. 2020, doi: 10.1021/acs.jced.0c00328.
- [29] P. Tecchio, P. Freni, B. De Benedetti, and F. Fenouillot, "Ex-ante Life Cycle Assessment approach developed for a case study on bio-based polybutylene succinate," *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 316–325, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.07.090.

- [30] F. Piccinno, R. Hischer, S. Seeger, and C. Som, "From laboratory to industrial scale: a scale-up framework for chemical processes in life cycle assessment studies," *J. Clean. Prod.*, vol. 135, pp. 1085–1097, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.06.164.
- [31] N. A. Buijs, Y. J. Zhou, V. Siewers, and J. Nielsen, "Long-chain alkane production by the yeast *Saccharomyces cerevisiae*," *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 112, no. 6, pp. 1275–1279, Jun. 2015, doi: 10.1002/bit.25522.
- [32] C. Asnadi, S. Marno, P. Lestari, D. Islami, N. Putri, and W. Rustyawan, "THE PRODUCTION AND SPECIFICATION ANALYSIS OF AVIATION BIOFUEL AS THE ALTERNATIVE FUEL OF AIRPLANE," *Ecological Engineering and Environment Protection*, pp. 50–57, May 2020, doi: 10.32006/eeep.2020.1.5057.
- [33] S. Summers *et al.*, "From food waste to sustainable aviation fuel: cobalt molybdenum catalysis of pretreated hydrothermal liquefaction biocrude," *Nat. Commun.*, vol. 16, no. 1, p. 9570, Oct. 2025, doi: 10.1038/s41467-025-64645-y.
- [34] E. Contreras-Vázquez, J. J. Cano-Gómez, G. A. Flores-Escamilla, J. de los S. López-Lázaro, and M. Lapuerta-Amigo, "Producción de combustible renovable para aviación utilizando lodo residual como materia prima," *Revista CienciaUANL*, vol. 28, no. 134, pp. 39–44, Nov. 2025, doi: 10.29105/cienciauanl28.134-4.

- [35] A. M. Ereemeeva, A. F. Khasanov, I. L. Oleynik, N. K. Kondrasheva, and A. R. Marinets, "Development of Biofuel as Marine Low-viscosity Fuels with Environmentally Friendly Components," *International Journal of Engineering*, vol. 38, no. 2, pp. 273–279, 2025, doi: 10.5829/ije.2025.38.02b.02.
- [36] J. García-Dávila, E. Ocaranza-Sánchez, M. Rojas-López, J. A. Muñoz-Arroyo, J. Ramírez, and A. L. Martínez-Ayala, "Jatropha curcas L. oil hydroconversion over hydrodesulfurization catalysts for biofuel production," *Fuel*, vol. 135, pp. 380–386, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2014.07.006.
- [37] K. D. Maher and D. C. Bressler, "Pyrolysis of triglyceride materials for the production of renewable fuels and chemicals," *Bioresour. Technol.*, vol. 98, no. 12, pp. 2351–2368, Sep. 2007, doi: 10.1016/j.biortech.2006.10.025.
- [38] G. W. Huber and A. Corma, "Synergies between Bio- and Oil Refineries for the Production of Fuels from Biomass," *Angew. Chem. Int. Ed.*, vol. 46, no. 38, pp. 7184–7201, Sep. 2007, doi: 10.1002/anie.200604504.
- [39] J. Xu, J. Jiang, and J. Zhao, "Thermochemical conversion of triglycerides for production of drop-in liquid fuels," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 331–340, May 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.315.
- [40] F. A. Twaiq, N. A. M. Zabidi, A. R. Mohamed, and S. Bhatia, "Catalytic conversion of palm oil over mesoporous aluminosilicate MCM-41 for the production of liquid hydrocarbon fuels," *Fuel Processing Technology*, vol. 84, no. 1–3, pp. 105–120, Nov. 2003, doi: 10.1016/S0378-3820(03)00048-1.

- [41] Y. Cai, Y. Fan, X. Li, L. Chen, and J. Wang, "Preparation of refined bio-oil by catalytic transformation of vapors derived from vacuum pyrolysis of rape straw over modified HZSM-5," *Energy*, vol. 102, pp. 95–105, May 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.02.051.
- [42] F. Wang, F. Yu, Y. Wei, A. Li, S. Xu, and X. Lu, "Promoting hydrocarbon production from fatty acid pyrolysis using transition metal or phosphorus modified Al-MCM-41 catalyst," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 156, p. 105146, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.jaap.2021.105146.
- [43] P. Vozka, D. Vrtiška, P. Šimáček, and G. Kilaz, "Impact of Alternative Fuel Blending Components on Fuel Composition and Properties in Blends with Jet A," *Energy & Fuels*, vol. 33, no. 4, pp. 3275–3289, Apr. 2019, doi: 10.1021/acs.energyfuels.9b00105.
- [44] H. K. Imdadul *et al.*, "Influences of ignition improver additive on ternary (diesel-biodiesel-higher alcohol) blends thermal stability and diesel engine performance," *Energy Convers. Manag.*, vol. 123, pp. 252–264, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.06.040.
- [45] L. T. Vargas-Ibáñez, G. A. Iglesias-Silva, J. J. Cano-Gómez, C. Escamilla-Alvarado, and M. A. Berrones-Eguiluz, "Densities and Viscosities for Binary Liquid Mixtures of Biodiesel + 1-Pentanol, 2-Pentanol, or 2-Methyl-1-Butanol from (288.15 to 338.15) K at 0.1 MPa," *J. Chem. Eng. Data*, vol. 63, no. 7, pp. 2438–2450, Jul. 2018, doi: 10.1021/acs.jced.7b00996.

- [46] Y. Wahyono, H. Hadiyanto, S. H. Gheewala, M. A. Budihardjo, and J. S. Adiansyah, "Evaluating the environmental impacts of the multi-feedstock biodiesel production process in Indonesia using life cycle assessment (LCA)," *Energy Convers. Manag.*, vol. 266, p. 115832, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.115832.
- [47] R. Gupta, R. McRoberts, Z. Yu, C. Smith, W. Sloan, and S. You, "Life cycle assessment of biodiesel production from rapeseed oil: Influence of process parameters and scale," *Bioresour. Technol.*, vol. 360, p. 127532, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.biortech.2022.127532.
- [48] W. Wang *et al.*, "Process simulation and environmental impact assessment of different cases in hydrothermal catalytic bio-jet fuel production," *Biomass Convers. Biorefin.*, vol. 14, no. 19, pp. 24551–24566, Oct. 2024, doi: 10.1007/s13399-023-04403-6.
- [49] D. M. Saad, T. Terlouw, R. Sacchi, and C. Bauer, "Life Cycle Economic and Environmental Assessment of Producing Synthetic Jet Fuel Using CO₂ /Biomass Feedstocks," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 58, no. 21, pp. 9158–9174, May 2024, doi: 10.1021/acs.est.4c01578.
- [50] G. Wang *et al.*, "Synthesis of highly regular mesoporous Al-MCM-41 from metakaolin," *Appl. Clay Sci.*, vol. 44, no. 1–2, pp. 185–188, Apr. 2009, doi: 10.1016/j.clay.2008.12.002.
- [51] E. Contreras-Vázquez, J. J. Cano-Gómez, G. A. Flores-Escamilla, J. de los S. López-Lázaro, and M. Lapuerta-Amigo, "Producción de combustible

renovable para aviación utilizando lodo residual como materia prima,” *Revista CienciaUANL*, vol. 28, no. 134, pp. 39–44, Nov. 2025, doi: 10.29105/cienciauanl28.134-4.

- [52] Mazlan, W. A. Lestari, A. Istiqomah, D. Krisdiyanto, and A. W. Afrianto, “Preparation of Ni/Zeolite as esterification catalyst in biodiesel production based on off-grade crude palm oil,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 858, no. 1, p. 012015, Jun. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/858/1/012015.
- [53] D. Kubička, M. Bejblová, and J. Vlk, “Conversion of Vegetable Oils into Hydrocarbons over CoMo/MCM-41 Catalysts,” *Top. Catal.*, vol. 53, no. 3–4, pp. 168–178, Mar. 2010, doi: 10.1007/s11244-009-9421-z.
- [54] M. Hussain, S.-K. Song, and S.-K. Ihm, “Synthesis of hydrothermally stable MCM-41 by the seed crystallization and its application as a catalyst support for hydrodesulfurization,” *Fuel*, vol. 106, pp. 787–792, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.fuel.2012.11.031.
- [55] D. Zhao, A. Rodriguez, N. M. Dimitrijevic, T. Rajh, and R. T. Koodali, “Synthesis, Structural Characterization, and Photocatalytic Performance of Mesoporous W-MCM-48,” *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 114, no. 37, pp. 15728–15734, Sep. 2010, doi: 10.1021/jp105190v.
- [56] W.-L. Weng, L.-T. Chang, and I.-M. Shiah, “Viscosities and Densities for Binary Mixtures of Benzylamine with 1-Pentanol, 2-Pentanol, 2-Methyl-1-butanol, 2-Methyl-2-butanol, 3-Methyl-1-butanol, and 3-Methyl-2-butanol,” *J.*

Chem. Eng. Data, vol. 44, no. 5, pp. 994–997, Sep. 1999, doi:
10.1021/je990031d.