



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



**CENTRO MEXICANO PARA LA PRODUCCIÓN MÁS
LIMPIA**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN
PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA**

TESIS

**“PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE
DE COYOL (*ACROCOMIA ACULEATA*) UTILIZANDO
UN CATALIZADOR HETEROGÉNEO”**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERÍA EN PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA

PRESENTA:

DAFNE DANIELA JACOBO DÁVILA

DIRECTORES

DR. RAÚL HERNÁNDEZ ALTAMIRANO

DR. FABIÁN SALVADOR MEDEROS NIETO



ENERO DE 2026



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
Dirección de Posgrado

SIP-13
REP 2017

ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS
Y DESIGNACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS

Ciudad de México, a de del

El Colegio de Profesores de Posgrado de en su Sesión
(Unidad Académica)

No. celebrada el día del mes de de conoció la solicitud presentada por el (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	Jacobo	Apellido Materno:	Dávila	Nombre (s):	Dafne Daniela
-------------------	--------	-------------------	--------	-------------	---------------

Número de boleta:

del Programa Académico de Posgrado:

Referente al registro de su tema de tesis

1.- Se acordó aprobar el tema de tesis:

Objetivo general del trabajo de tesis:

2.- Se designa como Directores de Tesis a los profesores:

Director: Director:

No aplica:

3.- El Trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en:

que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente, hasta la aprobación de la versión completa de la tesis por parte de la Comisión Revisora correspondiente.

Director (a) de Tesis

Dr. Raúl Hernández Altamirano

Director(a) de Tesis (en su caso)

Dr. Fabián Salvador Mederos Nieto

Alumno

Ing. Jacobo Dávila Dafne Daniela

Presidente de Colegio

Dr. Raúl Hernández Altamirano



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14
REP 2017

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de siendo las horas del día del mes de del se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores del Posgrado del: para examinar la tesis titulada:

"Producción de biodiésel a partir de aceite de coyol (*Acrocomia aculeata*) utilizando un catalizador heterogéneo"

Apellido Paterno:	Jacobo	Apellido Materno:	Dávila	Nombre (s):	Dafne Daniela
-------------------	--------	-------------------	--------	-------------	---------------

Número de registro:

Alumna del Programa Académico de Posgrado:

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene 1% de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo SI NO SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.

JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN:


El trabajo se realizó en tiempo y forma.


****Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio, y del Director o Directores de tesis el análisis del % de similitud para establecer el riesgo o la existencia de un posible plagio.**

Finalmente, y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR** **SUSPENDER** **NO APROBAR** la tesis por **UNANIMIDAD** o **MAYORÍA** en virtud de los motivos siguientes:


La tesis cumple con los requerimientos señalados en la normatividad vigente.

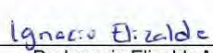
COMISIÓN REVISORA DE TESIS



Director de Tesis
Dr. Raúl Hernández Altamirano


2º Director de Tesis
Dr. Fabián Salvador Mederos Nieto


Dra. Violeta Yasmín Mena Cervantes


Dr. Gabriel Pineda Flores


Dr. Ignacio Elizalde Martínez


Dr. Raúl Hernández Altamirano
PRESIDENTE DEL COLEGIO DE
PROFESORES


CENTRO MEXICANO PARA LA
PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE USO DE OBRA PARA DIFUSIÓN

En la Ciudad de México el día 09 del mes de enero del año 2026, la que suscribe Dafne Daniela Jacobo Dávila alumna del programa Maestría en Ingeniería en Producción más Limpia con número de registro B230415, adscrita al Centro Mexicano para la Producción más Limpia manifiesta que es autora intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección de Dr. Raúl Hernández Altamirano y el Dr. Fabián Salvador Mederos Nieto y cede los derechos del trabajo intitulado "Producción de biodiésel a partir de aceite de coyol (*Acrocomia aculeata*) utilizando un catalizador heterogéneo", al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expresado de la autora y directores. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones de correo: djacob@ipn.mx, rahernandez@ipn.mx y fmederosn@ipn.mx. Si el permiso se otorga, al usuario deberá dar agradecimiento correspondiente y citar la fuente de este.

Dafne Daniela Jacobo Dávila

“Un buen día, echando la vista atrás, se dará usted
cuenta que estos años de lucha han sido los más
hermosos de su vida”

Sigmund Freud

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia, quiero expresar mis agradecimientos al Instituto Politécnico Nacional y al Centro Mexicano para la Producción más Limpia por abrirme las puertas a un proceso de formación que culmina con este estudio.

Asimismo, agradezco al Laboratorio Nacional de Desarrollo y Aseguramiento de la Calidad de Biocombustibles por facilitar sus instalaciones y los recursos que la investigación requería para completarla con éxito.

Un agradecimiento especial a la Secretaría de Ciencias y Humanidades, Tecnología e Innovación, SECIHTI, al facilitar su apoyo económico durante esta etapa de formación.

Agradezco la guía que me proporcionaron los directores, el Dr. Raúl Hernández Altamirano y el Dr. Fabián Salvador Mederos Nieto, para elaborar el estudio.

Por supuesto, agradezco también la orientación de la Dra. Violeta Yasmín Mena Cervantes, el Dr. Gabriel Pineda Flores y el Dr. Ignacio Elizalde Martínez, quienes forman parte del comité tutorial.

Por último, pero no menos importante, expreso mi agradecimiento a todos los docentes que en su momento me brindaron su apoyo.

DEDICATORIA

A mis padres, porque en todo proyecto que emprendo, me ofrecen su apoyo incondicional.

A mi hermano, por todo el cariño y cuidado, que tiene hacia mi persona.

A mi familia, Olga, Carla, Amalia, Said, Fernando, Esther, Lourdes y Carmen por estar siempre acompañándome.

A Olga Pilnik (†) y Rafael Cárdenas, por todo el cariño que les tengo.

A todos mis compañeros y amigos del CMPL, que estuvieron conmigo en mis momentos de alegría y no tanta.

A Mario, Roberto y Lourdes por su acompañamiento en mis actividades académicas.

A mis profesores fuera del aula, porque fueron una ayuda invaluable para lograr este mérito: Fernanda, Jorge, Luis Fernando, Hugo, Emilio, Martín e Iván.

A todos aquellos que han estado presentes en este camino.

¡Muchas gracias a todos!

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	12
ÍNDICE DE FIGURAS	13
RESUMEN	15
ABSTRACT	16
INTRODUCCIÓN	17
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES	19
1.1. Fuentes fósiles.....	19
1.1.2 Dinámica energética en la modernidad	19
1.2 Producción de biodiésel.....	21
1.2.1 Tendencias globales.....	21
1.2.2 Panorama mexicano.	22
1.3 Cultivo de la Acrocomia aculeata	24
1.3.1 Descripción morfológica.....	24
1.3.2 Propiedades del aceite.	24
1.4 Reacción de transesterificación.....	25
1.4.1 Mecanismo de reacción.....	25
1.4.2 Catalizadores homogéneos y heterogéneos	27
1.4.3 Mecanismo con óxido de calcio (CaO).....	29
1.5 Catalizadores heterogéneos	31
1.5.1 Optimización.....	31
1.5.2 Costos y sostenibilidad de los catalizadores heterogéneos.....	31
1.6 Conversión y rendimiento.	32
1.6.1 Rendimiento.....	32
1.6.2 Conversión química.....	33

1.6.3 Factores operativos determinantes en la reacción de transesterificación.....	33
1.6.4 Optimización del rendimiento para la producción de biodiésel	34
1.6 Diseño de experimentos	35
1.6.1 Diseño factorial 2 ^k	35
1.6.2 Muestreo no probabilístico y por conveniencia.....	36
1.6.3 Repetibilidad.....	37
1.6.4 Varianza y homocedasticidad.....	37
1.6.5 Análisis de residuos	37
1.6.6 Formulación de hipótesis estadísticas	38
1.6.7 Nivel de significancia.....	38
1.6.8 Interacciones en modelos factoriales.....	38
JUSTIFICACIÓN.....	39
OBJETIVO GENERAL.....	39
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	39
HIPÓTESIS	40
CAPÍTULO II MÉTODOS Y MATERIALES	41
2.1 Descripción del trabajo realizado.....	41
2.1.1 Materia prima.....	41
2.1.2 Extracción y caracterización del aceite	41
2.1.3 Catalizador	42
2.1.4 Diseño experimental.....	43
2.1.5 Transesterificación del aceite de coyol	44
2.1.6 Caracterización del biodiésel.....	46
2.2 Equipos utilizados.....	47
2.2.1 Rotavapor marca Büchi modelo 215	47
2.2.2 Reactor automático marca Syrris modelo Atlas HD	47
2.2.3 Espectrómetro de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) PerkinElmer Frontier.	47
2.2.4 Espectrómetro marca Bruker Biospin modelo AVANCE III 750 MHz	48

2.2.5 Viscosímetro Stabinger Viscometer Marca Anton Parr Modelo SVM 3001	48
2.2.6 Calorímetro de bomba adiabática marca Parr modelo 6200.....	48
2.2.7 Cromatógrafo de gases marca Perkin Elmer Modelo Claurus 580	49
2.2.8 Analizador termogravimétrico TGA marca TA Instruments modelo SDT650	49
2.2.9 Centrifuga marca Linetronics Technologies modelo LT/CF-122000-R/M.....	49
2.2.10 Flash Point ASTM D-95 Marca Petrotest modelo PMA-5	49
2.2.11 Equipo estabilidad oxidativa marca Petrotest modelo PetroOxi	50
2.2.12 Baño de corrosión ASTM D130 marca Linetronic modelo LT/CS-14400/M... 50	
2.2.13 Equipo de punto de nublamiento marca Anton Parr modelo Calisto-100	50
2.2.14 Equipo de destilación al vacío ASTM D-1160 marca Koehler Instrument modelo K80500.....	51
2.2.15 Difractómetro marca Rigaku modelo Miniflex 600	51
2.2.16 Fisisorción de N ₂ marca Quantachrome Instruments modelo Autosorb 1	51
CAPÍTULO 3 RESULTADOS	52
3.1 Caracterización del aceite de Acrocomia aculeata.....	52
3.1.1 Extracción de aceite.....	52
3.1.2 Índice de saponificación, índice de yodo e índice de acidez	53
3.1.3 Poder calorífico.....	53
3.1.4 Densidad, viscosidad cinemática y viscosidad dinámica.....	53
3.1.5 Espectroscopia infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)	54
3.1.6 Cromatografía de Gases	54
3.1.8 TGA del aceite	56
3.2 Resultados del balance de materia de la transesterificación con aceite de coyol	56
3.3 Catalizador	59
3.3.1 Difracción de rayos X (DRX) de cal sodada	59
3.3.2 Fisisorción de N ₂	60
3.3.3. Espectro por transformada de Fourier de la cal sodada	62
3.4 Caracterización del biodiésel de coyol.....	64
3.4.1 Índice de saponificación, índice de yodo e índice de acidez	64
3.4.2 Poder calorífico.....	65

3.4.3 Viscosidad dinámica, viscosidad cinemática y densidad.....	65
3.4.4 Espectroscopia por Transformada de Fourier del biodiésel de coyol.....	66
3.4.5 Resonancia Magnética Nuclear	66
3.4.6 Estabilidad oxidativa	67
3.4.7 Punto de inflamación.....	68
3.4.8 Humedad y sedimentos	68
3.4.9 Punto de nublamiento.....	68
3.4.10 Tira de cobre	68
3.4.11 Análisis termogravimétrico (TAG).....	68
3.4.12 Destilación al vacío	69
3.5 Análisis estadístico 2 ^k replicado.....	70
3.5.1 Variables y factores.....	70
3.5.2 Hipótesis de factor simple.....	70
3.5.3 Hipótesis de factor doble.....	71
3.5.4 Hipótesis de factor triple	72
3.5.5. Contrastes, Pareto normal	72
3.5.6 Efectos simples	73
3.5.7 Efectos de las interacciones	76
3.5.8 Cubo de respuesta.....	80
3.5.9 Recomendación óptima.....	81
ANÁLISIS DE RESULTADOS	82
CONCLUSIONES	85
REFERENCIAS	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tendencia mundial de producción de biodiésel (2015-2024)	21
Tabla 2. Factores limitantes del mercado de biodiésel en México	22
<i>Tabla 3 Rendimiento y porcentaje de aceite en semillas de cultivos alimentarios</i>	<i>23</i>
Tabla 4 Composición de ácidos grasos del aceite de coyol	25
Tabla 5 Propiedades fisicoquímicas del aceite de coyol	25
Tabla 6 Catalizadores homogéneos y heterogéneos en la síntesis de biodiésel	28
Tabla 7 Matriz del diseño factorial.....	43
Tabla 8 Extracción de aceite por lote del endospermo de la <i>Acrocomia aculeata</i>	52
Tabla 9 Valores de las propiedades de densidad y viscosidad	53
Tabla 10 Perfil de ácidos grasos del aceite del endospermo de la <i>Acrocomia aculeata</i>	55
Tabla 11 Balance de materia de la reacción de transesterificación de aceite de coyol	58
Tabla 12 Valores de viscosidad dinámica, viscosidad cinemática y densidad del biodiésel de endospermo de la <i>Acrocomia aculeata</i>	65
Tabla 13 Resultados de la prueba ASTM D-1160 para destilación al vacío.....	69
Tabla 14 Matriz del diseño factorial 2^3 y valores obtenidos en las tres réplicas	70
Tabla 15 Recomendación óptima de los factores	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Tipo de fuente energía en México en 2024.....	20
Figura 3 Mecanismo de la reacción de transesterificación utilizando metanol (Naseef y Tulaimat, 2025)	26
Figura 4 Mecanismo de reacción de la transesterificación catalizada por CaO (Mazaheri et al., 2021)	30
Figura 5 Espectro FTIR del aceite de la Acrocomia aculeata	54
Figura 6 Señales de 1H-RMN del aceite del endospermo de la Acrocomia aculeata	55
Figura 7 TGA del aceite del endospermo de la Acrocomia aculeata	56
Figura 8 Difractograma de la cal sodada antes de la transesterificación	59
Figura 9 Difractograma de la cal sodada después de la transesterificación	60
Figura 10 Isotherma de adsorción-desorción correspondiente a la cal sodada antes de la transesterificación.....	61
Figura 11 Isotherma de adsorción-desorción correspondiente a la cal sodada después de la transesterificación.....	62
Figura 12 Espectro FTIR correspondiente a la cal sodada antes de la transesterificación ..	63
Figura 14 Espectro FTIR correspondiente a la cal sodada usada.....	64
Figura 15 Espectro FTIR correspondiente al biodiésel de endospermo de Acrocomia aculeata	66
Figura 16 Espectro de la resonancia magnética nuclear de protones del biodiésel del endospermo de Acrocomia aculeata.....	67
Figura 17 Espectro del análisis termogravimétrico del biodiésel del endospermo de Acrocomia aculeata.....	69
Figura 18 Diagrama de Pareto de efectos	73
Figura 19 Efecto principal de la relación molar alcohol:aceite.....	74
Figura 20 Efecto del porcentaje en peso del catalizador	75

Figura 21 Efecto del tiempo de la reacción	76
Figura 22 Interacción A*B (relación molar alcohol:aceite y porcentaje en peso del catalizador)	77
Figura 23 Interacción A*C (relación molar alcohol:aceite y tiempo de la reacción)	78
Figura 24 Interacción B*C (porcentaje en peso del catalizador y tiempo de la reacción) ...	79
Figura 25 Interacción A*B*C (relación molar alcohol:aceite, porcentaje en peso del catalizador y tiempo de la reacción)	80
Figura 26 Proyección cúbica de los efectos de A, B y C sobre la respuesta del proceso	81

RESUMEN

El estudio estuvo enfocado en analizar la transesterificación del aceite de coyol, *Acrocomia aculeata*, con el fin de potenciar la producción de biodiésel por medio de un catalizador heterogéneo. Para tal efecto, se tomó en cuenta la relación molar alcohol:aceite, el peso del catalizador y el tiempo de la reacción como variables que impactan sobre el resultado final. El proceso consistió en llevar a cabo la extracción por Soxhlet y la caracterización a partir de una espectroscopía de infrarrojo, una cromatografía de gases y una resonancia magnética nuclear, de tal modo que fue posible establecer la estructura en cuanto a ácidos grasos, así como de otros elementos fisicoquímicos. El producto obtenido fue evaluado a través de un diseño experimental 2^3 y, posteriormente, se produjo y caracterizó un lote de biodiésel bajo la norma ASTM D6751.

Palabras claves: biodiésel, aceite de coyol, *Acrocomia Aculeata*, energías renovables

ABSTRACT

The study focused on analyzing the transesterification of coyol oil (*Acrocomia aculeata*) to enhance biodiesel production using a heterogeneous catalyst. For this purpose, the alcohol to oil molar ratio, catalyst loading, and reaction time were considered as variables influencing the outcome. The process involved Soxhlet extraction and characterization by infrared spectroscopy, gas chromatography, and nuclear magnetic resonance, which made it possible to determine the fatty acid structure as well as other physicochemical properties. The obtained product was evaluated using a 2^3 experimental design, and subsequently, a batch of biodiesel was produced and characterized in accordance with ASTM D6751.

Keywords: biodiesel, coyol, oil, *Acrocomia aculeata*, renewable energy

INTRODUCCIÓN

A lo largo del desarrollo humano, la energía ha constituido un componente esencial para impulsar las actividades productivas, el transporte y el desarrollo tecnológico, pues de ella radica la posibilidad de transformar recursos y mantener los procesos que sustentan la vida moderna. Sin embargo, la fuerte dependencia a los combustibles fósiles genera problemas ambientales y riesgos de disponibilidad, panorama que ha motivado el interés por acudir a alternativas más limpias, como el biodiésel, cuya producción mediante la transesterificación es una opción sustentable y beneficiosa para disminuir el impacto ambiental del diésel. En este proceso, los catalizadores heterogéneos cobran una fuerte relevancia frente a los homogéneos por su estabilidad, recuperación y menor generación de residuos; entre ellos, la cal sodada ($\text{CaO}+\text{NaOH}$) destaca por su estructura porosa y el carácter básico, factores que influyen en la difusión de los reactivos y en la eficiencia del proceso.

La elección de la materia prima también resulta fundamental. En este sentido, la *Acrocomia aculeata*, comúnmente denominada coyol, representa una posibilidad prometedora por su resistencia, adaptabilidad y elevado contenido de aceite en el endospermo, con más del 50 % de lípidos, y caracterizado por ácidos grasos de cadena media como el cáprico y el láurico. Dado que esta composición configura una alternativa atractiva frente a otras fuentes oleaginosas convencionales.

Frente a lo expuesto, los capítulos abordan el contexto teórico, la metodología experimental y los resultados que sustentan la presente investigación. En ese sentido, el capítulo 1 presenta el panorama energético actual y la creciente dependencia hacia los combustibles fósiles, una realidad que ha impulsado el interés por alternativas más limpias y accesibles, por ejemplo, el biodiésel. Asimismo, profundiza la manera en que ocurre la transesterificación y por qué los catalizadores homogéneos ocupados en esa reacción, a pesar de ser altamente efectivos, conllevan limitaciones que han dado paso al uso de catalizadores heterogéneos. También, examina el caso de la *Acrocomia aculeata*, cuyo aceite de la semilla está compuesto principalmente por ácidos grasos de cadena media y presenta propiedades favorables para obtener un biodiésel que cumple con los estándares internacionales.

El capítulo 2 describe la metodología utilizada para desarrollar el presente trabajo, especificando la forma en que se realizó la extracción y caracterización del aceite de la semilla del núcleo del coyol, así como los análisis que permitieron conocer la estructura y el comportamiento del catalizador heterogéneo de cal sodada mediante FTIR, DRX y Fisisorción de N₂. También, detalla el diseño factorial 2³ empleado para evaluar la influencia de las variables de la reacción que corresponden a la relación molar alcohol:aceite, el porcentaje en peso del catalizador y el tiempo de la reacción. Finalmente, presenta el análisis de los procedimientos aplicados para cuantificar el biodiésel obtenido y las técnicas espectroscópicas utilizadas.

El capítulo 3 corresponde a la presentación y discusión de los resultados, el análisis de las características del aceite de coyol, especialmente su composición de ácidos grasos, y la manera en que influyen en el comportamiento del lote final del biodiésel. Asimismo, caracterizó el catalizador, describiendo sus propiedades superficiales y los cambios que experimenta durante la reacción; los resultados del diseño factorial permiten así identificar las condiciones que favorecen a una mayor conversión. Además, el balance de materia aportó a cuantificar el rendimiento global del, hecho que corroboró que la transformación del aceite al biodiésel. Por último, los análisis realizados mediante FTIR y RMN confirmaron el rendimiento obtenido en la reacción.

En resumen, los resultados confirman que el aceite del coyol y la cal sodada constituyen una combinación viable para la producción de biodiésel. El desempeño del proceso se comprende gracias a la caracterización del aceite, la evaluación del catalizador y el análisis de rendimiento mediante el balance de materia.

CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES

1.1.Fuentes fósiles

La dinámica mundial impulsada por el alto uso energético inherente a una vida cargada de tecnología y digitalidad es muestra suficiente de la necesidad de impulsar cambios en la matriz productiva para buscar alternativas más limpias y amigables con el ambiente y los seres vivos en general. Hoy en día, el uso de combustibles fósiles sigue liderando la lista de las fuentes de energía pese a que otros sectores productivos sí han logrado avances significativos que responden a las exigencias de la modernidad, lo que demuestra la imperante necesidad de fomentar políticas públicas que promulguen una transformación completa de los sistemas de producción de este tipo de combustibles, de tal manera que se atiendan mejor las demandas energéticas del planeta (International Energy Agency [IEA], 2024).

1.1.2 Dinámica energética en la modernidad

El denominado escenario de políticas declaradas, *Stated Policies Scenario* (STEPS), es el punto de partida para comprender el camino al que se está dirigiendo el mundo con respecto a la industria energética en función de datos actualizados del mercado, costos tecnológicos y profundos análisis de las políticas que predominan en varios países. En ese sentido, la demanda de energía está incrementándose desmesuradamente debido a las economías emergentes y aquellas en desarrollo, panorama que obliga a buscar alternativas para reemplazar el uso de petróleo, carbón y gas natural. Sin embargo, solo en 2023, la demanda a nivel mundial fue atendida en 2/3 por combustibles fósiles, lo que a su vez desembocó en altas emisiones de dióxido de carbono (IEA, 2024).

Cabe acotar que el incremento se debe sobre todo a África, India y parte del continente asiático, pero al mismo tiempo China está responsabilizándose de desarrollar y aplicar fuentes de energía limpia. Las ventajas a corto y largo plazo de esta transición productiva recaen en que un sistema eléctrico con mayor uso de recursos renovable es más eficiente, por

lo que el propósito se centra en que la cobertura de la demanda mundial de energía a partir de 2030 sea mayormente por medio de estas fuentes (IEA, 2024)

En lo que respecta al suministro total de energía, aglutina toda la energía producida y/o importada en un país, sin tomar en cuenta la destinada a la exportación y/o a la reserva; es decir, es aquella enfocada al uso. Ahora bien, cada fuente energética transita por un proceso de transformación y su uso varía según cada país; por ejemplo, la Figura 1 detalla los datos relacionados a México:

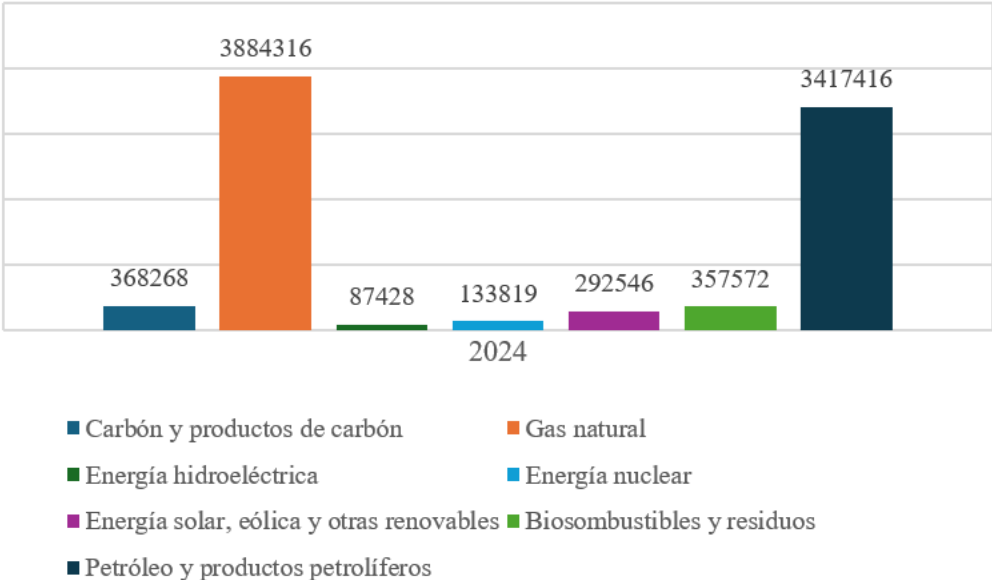


Figura 1 Tipo de fuente energía en México en 2024

Como puede visualizarse, en mayor medida, en 40 %, predomina el gas natural, y en ese mismo porcentaje el petróleo y sus derivados, lo que demuestra que México aún está lejos de lograr una transformación en la industria.

1.2 Producción de biodiésel

1.2.1 Tendencias globales

La producción mundial de biodiésel ha experimentado un crecimiento sostenido en la última década debido a las políticas enfocadas en fomentar el cambio hacia fuentes de energía limpia. Este incremento responde además al desarrollo de tecnologías más eficientes para el aprovechamiento de materias primas alternativas que han fortalecido la transición hacia fuentes renovables (Farouk et al., 2024).

En efecto, proyecciones recientes estiman que el volumen global de biodiésel continuará expandiéndose en los próximos años: solo en 2023, la producción mundial alcanzó cerca de 50 000 millones de litros, con Indonesia (14 mil millones de litros), la Unión Europea (13 000 millones de litros) y Brasil (8 000 millones de litros) como los principales productores, seguidos por Asia y Sudamérica que paulatinamente ganan terreno en el mercado (World Bioenergy Association, 2024). Cabe puntualizar que el crecimiento se ve respaldado por las innovaciones tecnológicas en materia de optimización de procesos mediante enfoques computacionales (Osman et al., 2024).

Este escenario se presenta cuantitativamente en la Tabla 1 por medio de datos que demuestran el crecimiento mundial sostenido de la producción de biodiésel desde 2015 a 2023, acompañado de una redistribución regional del mercado en la que Indonesia y Brasil amplían su participación relativa (World Bioenergy Association, 2024).

Tabla 1 Tendencia mundial de producción de biodiésel (2015-2024)

Año	Producción global (millones de litros)	Participación de la UE (%)	Participación de Brasil (%)	Participación de Indonesia (%)
2015	35 000	38	15	12
2017	40 000	36	16	15
2019	44 000	33	17	18
2021	47 000	30	17	20
2023	50 000	26	16	22

Nota. Tomado de World Bioenergy Association (2024)

1.2.2 Panorama mexicano.

El mercado nacional de biodiésel enfrenta desafíos institucionales, regulatorios y tecnológicos que limitan su expansión formal (Tabla 2), tal como lo demuestran Sosa-Rodríguez y Vazquez-Arenas (2021), quienes subrayan las restricciones legales, fiscales y de infraestructura que impiden consolidar incentivos suficientes para la inversión y el desarrollo de una cadena productiva en México. Ciertamente, la política energética ha considerado el uso de mezclas obligatorias de biodiésel con diésel fósil (B5, B10), pero su implementación ha sido lenta y fragmentada debido a la falta de normativas claras de producción, transporte y comercialización. Asimismo, Aguilar-Aguilar et al. (2025) estiman que solo una fracción del biodiésel circula en mercados informales o de autoconsumo, fuera del marco regulatorio, y si bien la producción nacional continúa siendo reducida en comparación con el consumo total de diésel fósil, hacen hincapié en que existen propuestas de políticas públicas orientadas a diversificar las materias primas y a aprovechar los recursos disponibles, incluyendo los aceites residuales y otras fuentes no convencionales.

Tabla 2. Factores limitantes del mercado de biodiésel en México

Tipo de barrera	Descripción breve	Impacto estimado (%)
Regulatoria / Legal	Falta de normativas claras para mezcla, transporte y comercialización	35
Institucional	Escasa coordinación entre gobierno, industria y academia	25
Económica / Fiscal	Incentivos financieros insuficientes	20
Tecnológica	Limitada infraestructura y transferencia de innovación	15
Mercado informal	Producción no regulada o de autoconsumo	5

Nota. Tomado de Sosa-Rodríguez y Vazquez-Arenas (2021) y Aguilar-Aguilar et al. (2025).

De acuerdo con la Tabla 2, las barreras regulatorias y legales presentan el mayor impacto (35 %), seguidas por las institucionales (25 %) y económicas-fiscales (20 %). Estos resultados reflejan la imperante necesidad de fortalecer el marco normativo, la coordinación intersectorial y los incentivos económicos para consolidar una cadena productiva nacional sostenible (Sosa-Rodríguez y Vazquez-Arenas, 2021; Aguilar-Aguilar et al., 2025).

Por otro lado, es necesario considerar que el uso de sembradíos orientados a la producción de alimentos para el consumo humano y a la elaboración de biodiésel despierta conflictos entre la seguridad alimentaria y la demanda energética. En efecto, diversas revisiones coinciden que el aceite vegetal refinado representa entre el 60 % y el 70 % del costo total de la producción, lo que limita la viabilidad económica del proceso (Vilas Bôas y Mendes, 2022).

Al contrastar las diferentes materias primas alimentarias empleadas en la producción de biodiésel se demuestra que existe una amplia variabilidad en el rendimiento de aceite por hectárea y en el contenido lipídico de la semilla. En ese sentido, la Tabla 3 indica los datos reportados de los principales cultivos oleaginosos, palma de aceite, colza, girasol, soya y maíz: la palma de aceite (*Elaeis guineensis*) ofrece el mayor rendimiento, con aproximadamente 3,300 kg de aceite por hectárea al año; luego, la colza, con 1,330 kg de aceite por hectárea al año; en tercer lugar, el girasol, con 660 kg de aceite por hectárea al año. En un rango mucho menor, la soya muestra productividades de incluso 450 kg de aceite por hectárea al año y el maíz alcanza los 134 kg de aceite por hectárea al año (Veljković et al., 2018).

Tabla 3 Rendimiento y porcentaje de aceite en semillas de cultivos alimentarios

Cultivo oleaginoso	Rendimiento de aceite (t/ha/año)	Aceite en semilla (%)
Palma de aceite (<i>Elaeis guineensis</i>)	3.3	45-55
Canola (<i>Brassica napus</i>)	1.33	38-45
Girasol (<i>Helianthus annuus</i>)	0.66	40-50
Soya (<i>Glycine max</i>)	0.46	18-20
Maiz (<i>Zea mays</i>)	0.134	3-5

Nota. Tomado de Muscat et al. (2019) y Vilas Bôas y Mendes (2022).

Adicionalmente, el empleo de cultivos alimentarios como materia prima incrementa las tensiones con respecto a la disponibilidad de los recursos hídricos y la seguridad alimentaria al competir directamente con la producción agrícola destinada al consumo humano (Muscat et al., 2019; Vilas Bôas y Mendes, 2022). De ahí que diversos autores coincidan en la necesidad de expandir las fuentes de aceite mediante materias no comestibles o residuos

agroindustriales que reduzcan los impactos ambientales y mejoren la sostenibilidad económica del biodiésel.

1.3 Cultivo de la *Acrocomia aculeata*

1.3.1 Descripción morfológica.

De acuerdo con la descripción morfológica del manual de Mares y Sánchez (2016), la *Acrocomia aculeata* es una palmera que alcanza una altura de 13 m a 20 m, con una copa entre 3 m y 4 m de diámetro, y posee un estípote (rara vez varios) con un grosor aproximado de 2 cm a 3 cm de diámetro. La corteza es oscura y lisa, con espinas largas, rectas y resistentes que miden hasta 15 cm, y su sistema de raíces es amplio y profundo, brindando estabilidad a la planta. Además, presenta hojas perennes y pinnadas compuestas por múltiples folíolos distribuidos en distintos planos, de tono verde claro y superficie lisa.

En cuanto al raquis, es rígido y provisto de espinas, con una longitud que varía entre 1.5 m y 3.5 m. Su inflorescencia, que puede medir hasta 1.2 m, emerge entre las hojas sostenida por un pedúnculo cubierto de tomento y espinas. Las flores son diclino-monoicas con órganos femeninos y masculinos presentes en el mismo racimo: los primeros se disponen en la parte basal, mientras que el resto está compuesto por flores masculinas de color amarillento. El fruto es de forma globosa con un epicarpio verde-amarillento al inicio, pero se torna castaño al madurar, y la superficie es lisa con un diámetro de 2.5 cm a 5 cm.

1.3.2 Propiedades del aceite.

El aceite de coyol se caracteriza por su alto contenido de triglicéridos formados por ácidos grasos de cadena media. Diversos estudios, como el de Díaz-Fuentes et al. (2019), han determinado que el mesocarpio contiene entre el 20 % y el 48 % de aceite, mientras que el endospermo puede aglutinar desde el 41 % hasta el 57 %, lo que posiciona a esta palma como una oleaginosa no convencional de alto rendimiento para fines energéticos.

A fin de visualizar la distribución de los principales ácidos grasos presentes en el fruto, la Tabla 4 muestra los porcentajes característicos reportados para el mesocarpio y el endospermo, los cuales determinan el comportamiento químico del aceite.

Tabla 4 Composición de ácidos grasos del aceite de coyol

Parte del fruto	Ácido graso	Porcentaje (%)
Mesocarpio	Oléico (C18:1)	63-68
Mesocarpio	Palmítico (C16:0)	32-37
Endospermo	Láurico (C12:0)	50

Nota. Tomado de Martínez et al. (2020) y Díaz-Fuentes et al. (2019)

Por otro lado, dado que el aceite de *Acrocomia aculeata* evidencia propiedades fisicoquímicas semejantes a otras semillas oleaginosas en la producción de biodiésel, la Tabla 5 muestran los intervalos de estos parámetros de acuerdo con Martínez et al. (2020).

Tabla 5 Propiedades fisicoquímicas del aceite de coyol

Propiedad	Intervalo	Unidad
Ácidos grasos libres	7-20	%
Índice de yodo	98-165	$g I_2/100g$
Índice de saponificación	101-131	$mg KOH/g$
Índice de peróxido	2-6	$meq de O_2/kg$
Densidad	0.89-0.92	$g/cm^3 a 40\ ^\circ C$
Viscosidad	31-43	mm^2/s

Nota. Tomado de Martínez et al. (2020)

1.4 Reacción de transesterificación.

1.4.1 Mecanismo de reacción

La transesterificación es la reacción química usualmente más empleada para producir biodiésel, que consiste en la interacción entre los triglicéridos de una grasa o aceite vegetal con un alcohol de cadena corta, como el metanol y etanol, en presencia de un catalizador

(Maheshwari et al., 2022). Para una mejor comprensión, la Figura 3 muestra el mecanismo de reacción del proceso al emplear metanol:

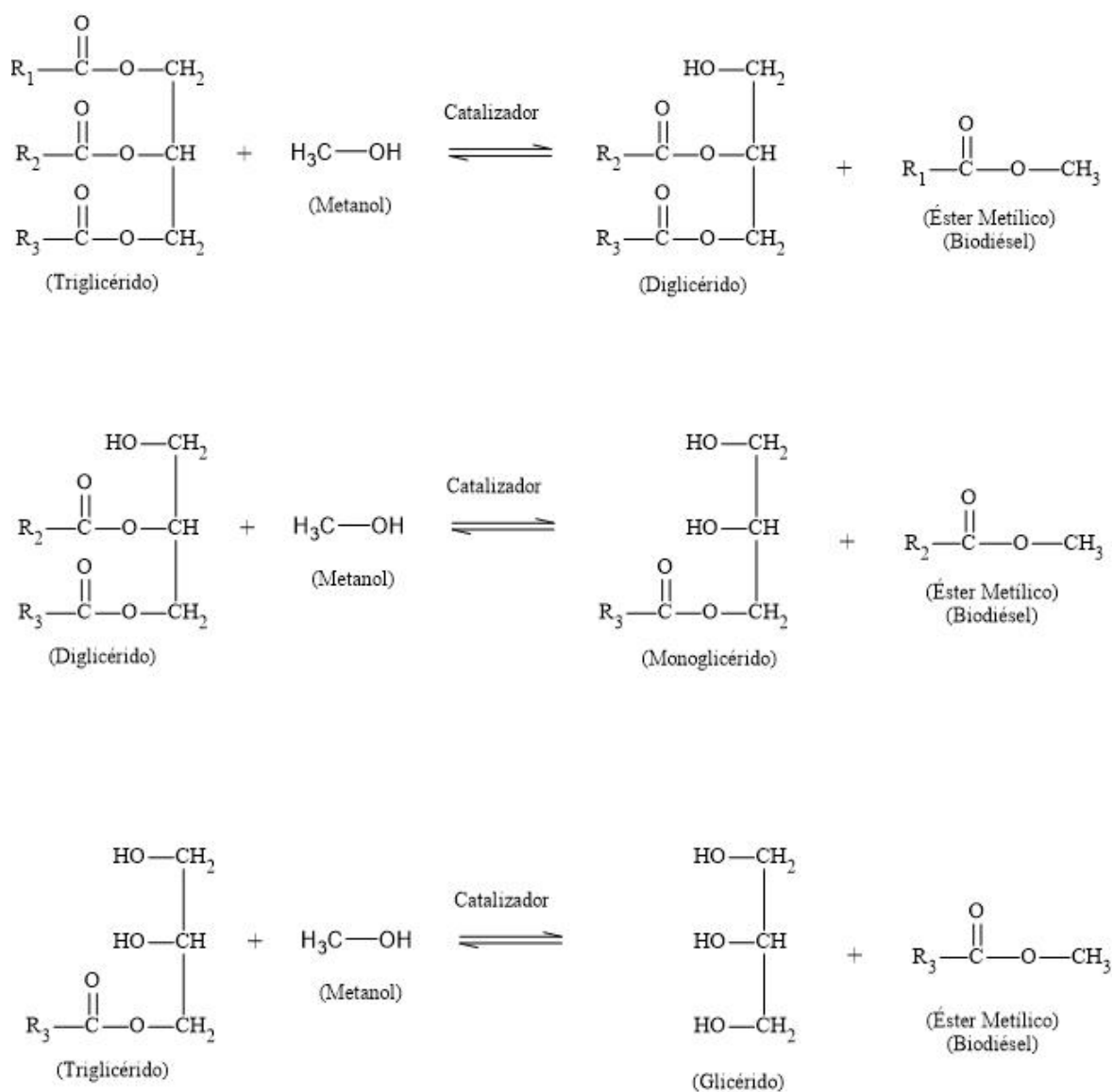


Figura 2 Mecanismo de la reacción de transesterificación utilizando metanol (Naseef y Tulaimat, 2025)

Durante la transformación, los triglicéridos reaccionan primero para formar diglicéridos y un éster posteriormente, los diglicéridos se convierten en monoglicéridos y liberan otra molécula de éster y, finalmente, los monoglicéridos reaccionan para generar glicerol y un último éster de ácido graso (Basumatary et al., 2023). El resultado son los ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos, conocido como biodiésel, acompañado del glicerol como subproducto.

1.4.2 Catalizadores homogéneos y heterogéneos

La elección del catalizador es determinante para la viabilidad del proceso. Por un lado, los agentes catalíticos homogéneos, como el hidróxido de potasio (KOH) y el hidróxido de sodio (NaOH), presentan la ventaja de disolverse completamente en el medio de la reacción, lo que permite alcanzar altas conversiones en tiempos relativamente cortos y con bajos costos operativos. Sin embargo, también hay ciertos inconvenientes, por ejemplo, en la etapa de separación favorecen la formación de subproductos como, por ejemplo, los jabones en presencia de ácidos grasos libres y aguas residuales que requieren un tratamiento previo antes de ser desechadas (Anil et al., 2024). Por otro lado, los catalizadores heterogéneos simplifican la separación y la reutilización del catalizador, disminuyendo la generación de jabones y la contaminación de aguas residuales, aunque sus limitaciones se asocian a la baja accesibilidad de los sitios activos, la desactivación del material y los fenómenos de lixiviación bajo condiciones severas (Gadore et al., 2023).

De acuerdo con su naturaleza química, los catalizadores se clasifican en básicos, ácidos y enzimáticos. Los primeros, sean homogéneos o heterogéneos, son los más empleados, pues presentan elevada actividad en la transesterificación de aceites con bajo contenido de acidez y humedad. En cambio, los ácidos, como el ácido sulfúrico (H_2SO_4), o los sólidos, como las resinas sulfonadas, favorecen la esterificación y la transesterificación de aceites con un alto contenido de ácidos grasos libres, evitando de ese modo la saponificación; no obstante, este tipo de catalizadores requieren tiempos de reacción más prolongados y condiciones más severas, lo cual incrementa los costos energéticos y de equipos del proceso (Anil et al., 2024; Orege et al., 2022).

Con el objetivo de resumir de manera comparativa las características de los diferentes catalizadores empleados en la transesterificación, la Tabla 6 detalla algunos ejemplos representativos con sus ventajas, limitaciones y aplicaciones más comunes reportadas en la literatura:

Tabla 6 Catalizadores homogéneos y heterogéneos en la síntesis de biodiésel

Tipo de catalizador	Variante	Conversión típica (%)	Condiciones de reacción (°C / tiempo / relación molar)	Ciclos	Limitaciones principales	Referencias
Homogéneo (básico)	NaOH, KOH	95-99	60-65 °C / 30-90 min / 6:1	No reutilizable	Formación de jabones, separación difícil, consumo de agua	Kouzu et al. (2007); Berrios et al. (2009)
Homogéneo (ácido)	H ₂ SO ₄	85-95	110-120 °C / 3-6 h / 20:1	No reutilizable	Corrosión, lenta cinética, alto consumo de alcohol	Kouzu & Hidaka (2011); Naseef & Tulaimat (2025)
Heterogéneo (CaO comercial)	CaO puro	80-95	60-65 °C / 2-4 h / 12:1	2-3	Sensible a humedad y CO ₂ , lixiviación, desactivación	Verziu et al. (2011); Granados et al. (2010); Kouzu et al. (2007)
Heterogéneo (CaO de residuos)	Cáscaras, huesos, biomasa	85-92	60-65 °C / 2-5 h / 9-12:1	2-4	Variabilidad en composición, lixiviación	Basumatary et al. (2023); Mazaheri et al. (2021)
Heterogéneo (CaO modificado)	CaO dopado con Na, Mg, K	90-96	60-70 °C / 2-4 h / 9-12:1	4-6	Síntesis más compleja, mayor accesibilidad de sitios activos	Macheli et al. (2025); De Paula et al. (2024)
Heterogéneo (carbón básico)	Carbón activado funcionalizado	97-99	65-70 °C / 3-5 h / 9-12:1	3-5	Pérdida de funcionalidad con ciclos, estabilidad química	Soria-Figueroa et al. (2020); Vicente et al. (1998)

Entre los catalizadores heterogéneos más investigados para la producción de biodiésel destaca el óxido de calcio (CaO), reconocido por su alta basicidad, bajo costo y disponibilidad en diversas fuentes. Su mecanismo de reacción se basa en la activación del alcohol en la superficie catalítica, generando alcóxidos que reaccionan con los triglicéridos y facilitan la transformación hacia ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos (Basumatary et al., 2023). Hasta la fecha, la literatura reporta que el CaO puede obtenerse a partir de piedra caliza calcinada, convirtiéndose por lo tanto en una alternativa económicamente viable y ambientalmente favorable (Macheli et al., 2025).

En cuanto a las limitaciones de este catalizador, destaca su sensibilidad a la humedad y a los ácidos grasos libres, lo que provoca la formación de jabones, la pérdida de actividad catalítica, la lixiviación del calcio y, por ende, la reducción de actividad en ciclos prolongados (Mazaheri et al., 2021). Algunas investigaciones con calizas y dolomitas calcinadas han confirmado que la composición mineralógica y la microestructura inicial influyen significativamente en la eficiencia catalítica, destacando que la dolomita calcinada ofrece mayor actividad que el CaO puro debido a la presencia de MgO, lo que favorece la formación de partículas más finas y activas (Kouzu et al., 2009).

Con el propósito de superar las limitaciones se han desarrollado modificaciones del CaO mediante la incorporación de sodio, entre las que se encuentran la cal sodada (CaO+NaOH), variante que incrementa la densidad de sitios básicos y reduce la lixiviación, mejorando así el desempeño catalítico en aceites como composiciones moderadas de ácidos grasos libres

(Orege et al., 2022). Además, Wahyudi et al. (2017) hacen hincapié que un catalizador obtenido a partir de barro rojo modificado por calcinación con cal sodada ha alcanzado conversiones de hasta 99.6 % de ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME, por sus siglas en inglés *Fatty Acid Methyl Esters*) en la transesterificación de aceite de canola, superando al CaO comercial (93 %) bajo condiciones similares, e incluso mantiene su actividad durante tres ciclos de reutilización.

Mientras que el CaO puro ofrece alta reactividad inicial, pero limitada estabilidad en condiciones industriales, la cal sodada combina la actividad catalítica de CaO con la capacidad del sodio para mejorar la resistencia frente a la desactivación y facilita la reutilización del material. No obstante, aún es necesario optimizar su síntesis y caracterización para garantizar un desempeño constante a una mayor escala (Anil et al., 2024). Asimismo, otros estudios han explorado alternativas relacionadas con el uso del hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) en combinación con glicerina como pretratamiento, lo que genera intermediarios más reactivos (diglicéridos y monoglicéridos) y mejora la eficiencia de la posterior transesterificación con etanol (Kazembe-Phiri et al., 2011). Por supuesto, si bien el CaO es un punto de referencia en catalizadores básicos heterogéneos, las modificaciones con sodio y otras variantes abren la puerta a procesos adaptables a diferentes tipos de materia prima.

1.4.3 Mecanismo con óxido de calcio (CaO)

Con el propósito de profundizar en la función catalítica CaO en el marco de la transesterificación, es necesario describir su mecanismo de reacción. En primera instancia, diversos estudios, entre ellos el de Mazaheri et al. (2021), señalan que la actividad catalítica responde a que existen sitios activos básicos del catalizador que ayudan a promover la activación de las moléculas del alcohol, hecho que conduce a la formación de iones alcóxido, especies altamente reactivas capaces de atacar a los triglicéridos, facilitando así su transformación.

Durante la fase inicial de la transesterificación con CaO, los sitios básicos del catalizador extraen un protón del metanol, generando aniones metóxido (CH₃O⁻) que posteriormente actúan como nucleófilos y atacan el carbono carbonílico de los triglicéridos, formando un intermedio alcóxido-carbonilo. Luego, este intermedio se descompone y libera una molécula de éster metílico y un diglicérido como producto parcial. Finalmente, los diglicéridos y monoglicéridos obtenidos vuelven a reaccionar con los aniones metóxido, completando de esa manera la transformación a biodiésel (Mazaheri et al., 2021). El proceso químico lo detalla la Figura 4:

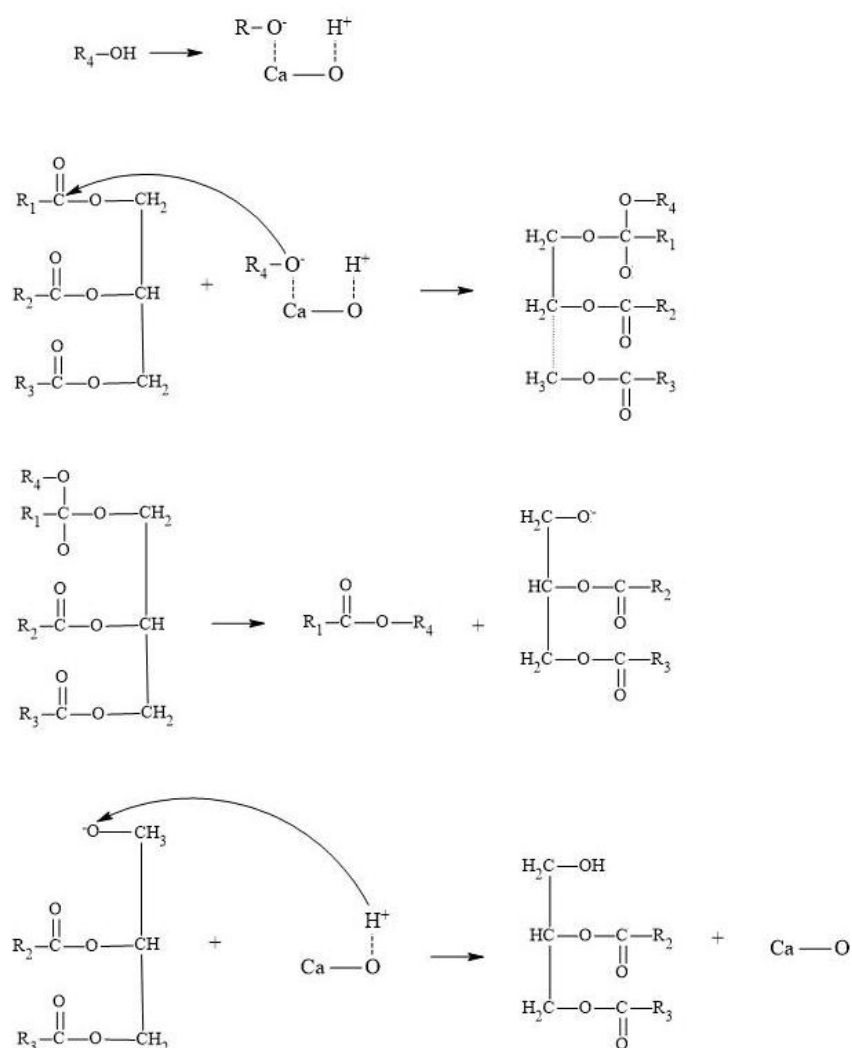


Figura 3 Mecanismo de reacción de la transesterificación catalizada por CaO (Mazaheri et al., 2021)

El proceso ilustrado explica la eficacia del CaO como catalizador heterogéneo en el proceso de transesterificación, al mismo tiempo que justifica la necesidad de su activación previa mediante calcinación para garantizar la disponibilidad de sitios básicos en su superficie (Mazaheri et al., 2021).

1.5 Catalizadores heterogéneos

1.5.1 Optimización.

Usar catalizadores sólidos en los procesos de transformación de biodiésel es una estrategia de optimización porque permiten una separación y recuperación más sencilla del catalizador, reducen etapas de purificación que busca superar las limitaciones de los catalizadores homogéneos tradicionales (NaOH, KOH), particularmente en cuanto a la dificultad de recuperación, la generación de aguas residuales contaminadas y los elevados costos de tratamiento. Entre los catalizadores sólidos más estudiados, el CaO y sus derivados han mostrado alta actividad básica, bajo costo y amplia disponibilidad, convirtiéndose por ende en materiales promisorios para aplicaciones a escala industrial. No obstante, su desempeño está condicionado por la estabilidad estructural, la resistencia a la carbonatación e hidratación y la capacidad de regeneración en múltiples ciclos de reacción (Adhitiyan et al., 2024).

1.5.2 Costos y sostenibilidad de los catalizadores heterogéneos

El uso de catalizadores heterogéneos reciclables radica en su reutilización, fácil separación y menor necesidad de postratamiento. En contraste con los catalizadores homogéneos, que generan jabones y efluentes cargados de sales, la ventaja del CaO radica en que limita la formación de residuos líquidos y facilita la separación de fases (Berrios et al., 2007).

Asimismo, el empleo de fuentes residuales de carbonatos de calcio (cáscaras de huevo, conchas marinas, huesos animales y piedras calizas) como precursores de CaO calcinado aporta a disminuir los costos de materia prima y fomenta la valorización de residuos en un esquema de economía circular. En efecto, Macheli et al. (2025) reportaron que catalizadores

derivados de residuos mantuvieron conversiones superiores al 90 % entre 3 y 8 reutilizaciones, evidenciando su viabilidad económica.

1.6 Conversión y rendimiento.

La conversión y el rendimiento químico son parámetros empleados para describir y evaluar el desempeño de una reacción química. Ambos permiten analizar la eficiencia del proceso de transformación, considerando el grado en que los reactivos participan, como la cantidad de producto obtenido.

1.6.1 Rendimiento

El rendimiento de una reacción química es el parámetro que cuantifica la eficiencia del proceso al comparar la cantidad real del producto obtenido experimentalmente con la cantidad teórica máxima determinada a partir de la estequiometría de la reacción. Este parámetro permite evaluar las pérdidas asociadas a las reacciones secundarias, a las limitaciones de equilibrio y a las etapas de separación y purificación del producto. Matemáticamente, se expresa como el cociente entre la cantidad real del producto recuperado y la cantidad teórica calculada, multiplicado por cien para su expresión porcentual (Levenspiel, 1998).

En el proceso de transesterificación para producir biodiésel, este factor suele calcularse sobre una base másica, considerando al aceite como reactivo limitante, lo que proporciona una medida directa del desempeño del proceso.

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{\text{moles formados del producto deseado}}{\text{moles que se hubieran formado si no existieran reacciones secundarias y todo el reactivo limitante reaccionara}} * 100$$

1.6.2 Conversión química.

Consiste en la proporción del reactivo que ha reaccionado según la cantidad alimentada en el reactor; en la transesterificación, el reactivo limitante es el triglicérido presente en el aceite. La conversión química se expresa de la siguiente manera:

$$(\%) X_{TG} = \frac{\eta_{TGO} - \eta_{TG}}{\eta_{TGO}}$$

En esta ecuación, η_{TGO} representa los moles iniciales de triglicéridos y η_{TG} son los moles de triglicéridos remanentes después de la reacción. Ciertamente, una conversión superior refleja que la mayor parte del aceite se ha transformado en biodiésel, pero este indicador debe diferenciarse del rendimiento y la selectividad, parámetros que evalúan cuánto reactivo se consume y qué fracción se convierte en el producto deseado (Kouzu et al., 2007).

Ahora bien, los estudios realizados con catalizadores sólidos, como el CaO, han demostrado que pueden obtenerse conversiones del 90 % en condiciones óptimas (Macheli et al., 2025). No obstante, es importante señalar que la transformación puede verse limitada por resistencias difusionales o de transferencia de masa, lo que exige controlar adecuadamente la agitación, el tamaño de partícula, temperatura, viscosidad y el diseño del experimento (Atadashi et al., 2013).

1.6.3 Factores operativos determinantes en la reacción de transesterificación

El rendimiento y la conversión en la transesterificación dependen de diversos factores que afectan el proceso y, por ende, el control adecuado es esencial para diseñar una reacción eficiente capaz de lograr una transformación completa del reactivo hacia la formación de biodiésel (Leung et al., 2009).

- a) Relación molar alcohol:aceite: debido a que la transesterificación es una reacción reversible, normalmente se utiliza una cantidad en exceso de alcohol para desplazar el equilibrio químico hacia la obtención de ésteres metílicos; en los sistemas convencionales suelen emplearse relaciones de 6:1 a 12:1 para lograr conversiones elevadas. Es necesario tomar en cuenta que una relación insuficiente limita la reacción y produce altos niveles de monoglicéridos y diglicéridos, mientras que un exceso

puede incrementar los costos de recuperación del alcohol en la etapa de purificación (Musa, 2016).

- b) Cantidad de catalizador: la cantidad de catalizador determina la disponibilidad de sitios activos que participan en la reacción. Entonces, cuando la concentración es baja, la velocidad del proceso de transesterificación disminuye y la conversión obtenida es menor, en cambio, un exceso puede provocar saponificación en presencia de ácidos grasos libres, lo que incrementa la viscosidad del sistema y dificulta la separación de fases (Granados et al., 2010). En el caso de los catalizadores heterogéneos, como el CaO, se ha identificado que cargas entre el 1 % y el 3 % en peso respecto al aceite permiten lograr conversiones elevadas sin comprometer la separación de productos.
- c) Tiempo de reacción: la transformación tiende a aumentar con el tiempo en un sistema discontinuo debido a que más moléculas de triglicéridos tienen la oportunidad de reaccionar. Sin embargo, dado que el sistema alcanza el equilibrio químico después de cierto punto, prolongar el tiempo no aporta mejoras relevantes y más bien favorece a que ocurran reacciones secundarias como, por ejemplo, la hidrólisis de los ésteres (Musa, 2016). Generalmente, los estudios reportan que entre 60 y 180 minutos son suficientes para alcanzar conversiones mayores que 90 %.
- d) Temperatura: el aumento de la temperatura mejora la cinética de la reacción al proporcionar más energía de activación a las moléculas involucradas y reducir el tiempo necesario para alcanzar altos niveles de transformación. Sin embargo, las temperaturas superiores a los 65 °C pueden provocar la evaporación del metanol (punto de ebullición $\approx 64,7$ °C) y la formación de subproductos indeseados. De ahí que un intervalo entre 50 °C a 60 °C sea el más propicio para el desarrollo de la reacción, pues no compromete la estabilidad del catalizador ni del sistema (Leung et al., 2009).

1.6.4 Optimización del rendimiento para la producción de biodiésel

Maximizar el rendimiento es fundamental para la eficiencia técnica y la viabilidad del proceso de producción de biodiésel, pues al ser insuficiente genera pérdidas de materia prima, lo que impacta en el incremento de los costos del procesamiento y dificulta el cumplimiento de las normativas internacionales como, por ejemplo, ASTM D6751 o EN 14214 (Ma y

Hanna, 1999). Desde un enfoque de producción más limpia, alcanzar rendimientos elevados aporta a disminuir los residuos generados, a optimizar el uso de recursos y a reducir la huella ambiental del proceso, hecho especialmente relevante al emplear aceites residuales o materias primas no convencionales, pues suelen presentar mayores cantidades de contaminantes, como agua o ácidos grasos libres (Kouzu et al., 2007).

Asimismo, las herramientas estadísticas de diseño y análisis experimental, como el diseño factorial y la superficie de respuesta, han demostrado ser eficaces para identificar las condiciones experimentales que permiten maximizar el rendimiento de ésteres metílicos. De esa manera, se logra un biodiésel con características adecuadas de viscosidad, densidad e índice de acidez que aseguran su competitividad en el mercado energético (Verziu et al., 2011).

1.6 Diseño de experimentos

1.6.1 Diseño factorial 2^k

El diseño factorial 2^k es una técnica estadística de diseño experimental para analizar de manera simultánea el efecto de varios factores y las posibles interacciones entre ellos. En este diseño, cada factor se estudia en dos niveles (alto y bajo), lo que genera un número total de corridas definidas por la expresión $N = 2^k$. De esta forma, se obtiene información sobre los efectos principales de cada variable y las combinaciones que influye en la respuesta del sistema (Montgomery, 2017).

Una de las fortalezas destacables del diseño factorial radica en la evaluación simultánea del efecto de múltiples variables y sus interacciones sobre el rendimiento. Aquí cobra importancia el estudio de Vicente et al. (1998) con respecto a la transesterificación de aceite de girasol con metanol en el que se comparan diferentes catalizadores ácidos y básicos, tanto homogéneos como heterogéneos. En este caso, el diseño factorial permitió establecer con claridad que el hidróxido de sodio ofrecía los mayores niveles de rendimiento, mientras que los catalizadores basados en circonio y lipasa inmovilizada no mostraron actividad catalítica. Además, aportó a determinar cómo interactuaban las condiciones de temperatura y concentración de catalizador en la conversión de ésteres metílicos: el análisis estadístico

reveló que ambas variables tenían un efecto positivo, aunque la concentración del catalizador fue más determinante. A partir de los datos obtenidos se construyó un modelo de segundo orden que describió de manera adecuada el intervalo experimental evaluado.

Otra investigación sobre el tema es la de Silva et al. (2011), quienes evaluaron la transesterificación del aceite de soya mediante etanol como alcohol y tras aplicar un diseño factorial 2^4 combinado con metodología de superficie de respuesta. Al estudiar los efectos de la temperatura, la concentración de catalizador, el tiempo de reacción y la relación molar alcohol:aceite, los resultados mostraron que estas variables ejercen efectos individuales sobre la conversión a ésteres etílicos y también presentan interacciones significativas entre sí. En ese sentido, a través de la optimización estadística, se determinó que las condiciones más favorables para la producción de biodiésel y su máximo rendimiento corresponden a una temperatura moderada de $56.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, un tiempo de reacción de 80 minutos, una relación molar alcohol: aceite de 9:1 y una concentración de catalizador de 1.7 % p/v de NaOH.

En el caso de la catálisis heterogénea, el diseño factorial 2^3 se ha empleado con éxito para evaluar de manera conjunta el efecto de variables operativas sobre la conversión a biodiésel. Kılıç et al. (2013), en el marco de la transesterificación de aceite de ricino, consideraron como factores la carga de catalizador, el tiempo de reacción y la relación molar alcohol:aceite. El análisis estadístico mostró que la interacción entre la concentración de catalizador y la relación molar fue determinante para lograr rendimientos superiores al 90 %, siendo las condiciones óptimas una relación metanol:aceite de 5:1, una concentración de catalizador del 3 % en peso y un tiempo de reacción de 3 horas. Estos resultados evidencian que el diseño factorial 2^3 ayuda a estimar los efectos principales de cada variable, a identificar las interacciones críticas y a establecer rangos operativos que mejoran la actividad catalítica.

1.6.2 Muestreo no probabilístico y por conveniencia

En el diseño experimental, el muestreo corresponde al procedimiento mediante el cual se seleccionan los datos o corridas a analizar. En ese sentido, cuando es imposible aplicar métodos probabilísticos por limitaciones de tiempo, reactivos o recursos, se recurre al muestreo no probabilístico en el que la selección de las unidades depende de criterios del investigador. Este enfoque es clave para continuar con el trabajo experimental en condiciones

prácticas, aunque no asegura la representatividad estadística de toda la población (Galloway, 2005).

Una modalidad frecuente es el muestreo por conveniencia, el cual selecciona las unidades más accesibles o disponibles; su ventaja principal es la rapidez y el bajo costo, existe un importante sesgo de selección, por lo que tiene una validez externa limitada (Ahmed, 2024). Boyd et al. (2023) señalan además que puede emplearse de manera responsable en experimentos aplicados siempre que se reconozcan las limitaciones y se mitiguen los sesgos con controles metodológicos. En el caso de estudios de transesterificación, el muestreo por conveniencia es pertinente cuando se restringe el número de corridas por disponibilidad de catalizador, tiempo de reacción o capacidad de equipo, permitiendo mantener la coherencia del diseño experimental.

1.6.3 Repetibilidad

La repetibilidad en un diseño experimental hace referencia a la capacidad de obtener resultados consistentes cuando un procedimiento se emula bajo las mismas condiciones de operación. En estudios de biodiésel, la repetición de corridas en condiciones idénticas permite cuantificar la estabilidad de la conversión a ésteres metílicos y validar la robustez del proceso (Berrios et al., 2009).

1.6.4 Varianza y homocedasticidad

En cuanto a la varianza natural, refleja la dispersión de los datos con respecto a la media y aporta a estimar la precisión de las mediciones (Livingston, 2004). En cambio, la homocedasticidad corresponde a la igualdad de varianzas entre grupos y es esencial para validar pruebas como, por ejemplo, el ANOVA (Gastwirth et al., 2009).

1.6.5 Análisis de residuos

El análisis de residuos es ideal para corroborar si un modelo estadístico cumple o no con los supuestos básicos de normalidad, independencia y varianza constante (Jarque y Bera, 1980).

1.6.6 Formulación de hipótesis estadísticas

La construcción de hipótesis marca el inicio del análisis inferencial: la hipótesis nula (H_0) supone que no existe ningún efecto ni diferencia entre los factores analizados, mientras que la hipótesis alternativa (H_1) plantea la presencia de un efecto estadísticamente significativo (Emmert-Streib, 2024). En el marco de un diseño factorial aplicado a la transesterificación, H_0 puede expresar que la concentración del catalizador, el tiempo de reacción o la relación molar alcohol:aceite no modifican la conversión (Kamenik y Szewc, 2023), mientras que H_1 indicaría que al menos uno de estos factores sí ejerce una influencia.

1.6.7 Nivel de significancia

La aceptación o rechazo de la hipótesis nula depende del valor de significancia (p): cuando el valor es inferior al nivel establecido (usualmente $\alpha=0.05$), se rechaza H_0 y se considera válida H_1 . Hasta la fecha, este enfoque fundamenta la mayoría de los análisis experimentales contemporáneos (Einav y O'Connor, 2019).

1.6.8 Interacciones en modelos factoriales

En los modelos factoriales, cada factor influye por separado en la respuesta, pero también interactúa con otros y modifica significativamente el comportamiento del sistema. En el caso de la transesterificación, estas interacciones son especialmente relevantes porque la eficiencia del proceso no depende únicamente de la relación alcohol:aceite o del tipo de catalizador, sino de cómo actúan ambos simultáneamente (Acevedo-Quiroz et al., 2024).

JUSTIFICACIÓN

El presente estudio parte de la necesidad de investigar el proceso de transesterificación del aceite de la semilla de la *Acrocomia aculeata*, incluyendo sus características fisicoquímicas y la composición de los ácidos grasos. Para tal efecto, el proyecto es realizado por medio de un catalizador heterogéneo, y se busca conocer la influencia que tiene sobre el comportamiento de la reacción de transesterificación para identificar el efecto que ocurre durante la conversión de ésteres metílicos, en vista de que en este proceso influye el catalizador *per se* y las propiedades de la materia prima, es decir el aceite del núcleo del coyol. En ese sentido, la importancia del diseño experimental se sustenta en identificar cómo las variables: relación molar alcohol:aceite, porcentaje en peso del catalizador y tiempo de reacción inciden directamente en el rendimiento del biodiésel obtenido.

OBJETIVO GENERAL

Maximizar la obtención de biodiésel de aceite de coyol, empleando un catalizador heterogéneo a las condiciones óptimas de porcentaje en peso de catalizador, relación molar alcohol:aceite y tiempo de reacción, con un diseño factorial.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Obtener aceite de coyol mediante el proceso de extracción Soxhlet y caracterizarlo a través de espectroscopia de infrarrojo, resonancia magnética nuclear y cromatografía de gases para determinar su composición en términos de ácidos grasos y otras propiedades fisicoquímicas.

- 2) Determinar la influencia de las variables relación molar alcohol:aceite, porcentaje de catalizador en peso y tiempo de reacción, en la producción de ésteres metílicos.
- 3) Maximizar el rendimiento a ésteres metílicos a partir del aceite de coyol extraído y cal sodada como catalizador heterogéneo, utilizando un diseño factorial 2^k .
- 4) Producir un lote de biodiésel con las mismas condiciones para determinar sus propiedades fisicoquímicas por medio de la norma ASTM D6751.

HIPÓTESIS

El diseño experimental factorial 2^k permite determinar las variables óptimas de operación relación molar alcohol:aceite, porcentaje en peso del catalizador y tiempo de reacción, para obtener el máximo rendimiento de biodiésel a partir de aceite de coyol y cal sodada como catalizador heterogéneo.

CAPÍTULO II MÉTODOS Y MATERIALES

2.1 Descripción del trabajo realizado

El capítulo presenta la metodología general aplicado para la obtención de biodiésel a partir de aceite de la semilla de la *Acrocomia aculeata*, destacando las etapas que integraron el desarrollo del trabajo experimental.

2.1.1 Materia prima

Los frutos para el experimento se recolectaron en la región de Chiapas, en la comunidad de Hermenegildo Galeana (Ocozocoautla) con coordenadas 16°34'37.99" N, 93°21'33.98" W. La muestra estuvo conformada por aquellos con madurez fisiológica uniforme. Tras separar el endospermo manualmente, se procedió al secado controlado a 105 °C durante 3 horas y media; la siguiente fase consistió en triturar en molienda y tamizar con una malla número 10 con 2 mm de abertura, según la norma ASTM E11, hasta obtener una granulometría homogénea cercana a 1 mm, que es lo adecuado para la etapa de extracción.

2.1.2 Extracción y caracterización del aceite

La extracción del aceite se obtuvo mediante método Soxhlet, utilizando isopropanol grado reactivo como solvente, 59 gr de muestra del núcleo de semilla por carga y 350 mL del alcohol por membrana de extracción. El sistema se mantuvo a reflujo constante durante 10 horas, y una vez concluido el tiempo de extracción, el aceite fue filtrado en dos pasos: el primero, con carbón activado para remover impurezas; el segundo, a vacío con filtro Whatman 40 (Cytiva, libre de cenizas, diámetro de 70 mm) para garantizar la calidad del aceite y que estuviera libre de partículas sólidas.

En cuanto a la recuperación del disolvente, consistió en una destilación al vacío mediante un equipo rotavapor Büchi B-100 HB. Las condiciones de operación para recuperar el isopropanol respondieron a una temperatura de 95 °C, una rotación de 80 rpm y un vacío inicial de 330 mbar que se redujo gradualmente hasta 90 mbar durante 40 minutos para

favorecer la completa eliminación del solvente. La cantidad de aceite se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Cantidad de aceite (\%)} = \frac{m_{\text{aceite}}}{m_{\text{muestra}}} * 100$$

El aceite extraído se caracterizó mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para determinar los grupos funcionales presentes y analizar la composición de los triglicéridos. Asimismo, se empleó la cromatografía de gases para identificar el perfil de ácidos grasos y calcular el porcentaje de cada componente, mientras que la resonancia magnética nuclear fue aplicada para dilucidar la estructura molecular del aceite y los productos de reacción, así como su grado de pureza. También, se requirió realizar un análisis termogravimétrico (TGA) para examinar sus procesos de descomposición, identificando las etapas asociadas a la pérdida de masa por volatilización y degradación de compuestos orgánicos. Finalmente, la determinación de los índices de acidez, yodo y saponificación estuvo dada de acuerdo con las normas mexicanas NMX-F-101-1987, NMX-F-408-S-1981, NMX-F-174.SCFI-2006, respectivamente, con el fin de evaluar la calidad del aceite y su potencial para la conversión a ésteres metílicos.

2.1.3 Catalizador

El catalizador heterogéneo CaHNaO_2 utilizado fue de grado industrial, marca Drägersorb® 800 Plus, en envase de 5 L (4.15 kg), lote ARKS-F003, con número de serie MX00001-12, y fecha de fabricación de 13 de septiembre de 2023 con vigencia hasta 2027. El compuesto está diseñado para la absorción de dióxido de carbono (CO_2), y su composición base incluye hidróxido de calcio $\text{—Ca(OH)}_2\text{—}$ e hidróxido de sodio (NaOH), lo que le confiere una naturaleza alcalina. Para el presente trabajo, el catalizador no fue sometido a ningún tratamiento previo de activación; además, se trituroó manualmente con un mortero de porcelana y se tamizó con una malla número 12 (ASTM E11) para obtener una fracción de partícula homogénea, empleada directamente en la reacción de transesterificación.

La caracterización del catalizador respondió a técnicas de Adsorción/Desorción de N₂ para determinar su área superficial, la microscopía electrónica de barrido (SEM) y la espectroscopia de dispersión de energía (EDS), de tal modo que sea posible analizar su morfología y composición elemental. También, la difracción de rayos X (DRX) para identificar las fases cristalinas presentes en el material.

2.1.4 Diseño experimental

Es importante tomar en cuenta que los diseños experimentales factoriales son ideales para comprender los experimentos óptimos del sistema y las variables que influyen. En ese sentido, se aplicó un diseño factorial 2³ con el fin de evaluar la incidencia que tienen las tres variables en la producción de biodiésel:

- A: relación molar alcohol:aceite
- B: porcentaje en peso del catalizador
- C: tiempo de reacción

El proceso consistió en estudiar cada una de ellas simultáneamente y en dos niveles, bajo y alto, lo que aportó a optimizar el número de experimentos y facilitó la interpretación estadística de los resultados. Los valores asignados a cada nivel se presentan en la Tabla 7, donde los niveles bajos correspondieron a A) 15, B) 3 y C) 1, mientras que los niveles altos fueron A) 24, B) 6 y C) 3.

Tabla 7 Matriz del diseño factorial

Tratamiento	A	B	C
-1	-	-	-
a	+	-	-
b	-	+	-
ab	+	+	-
c	-	-	+
ac	+	-	+
bc	-	+	+
abc	+	+	+

Cada tratamiento se ejecutó con tres réplicas para evaluar la variabilidad experimental, conocer el efecto de cada variable y evidenciar cuál experimento tiene mayor efecto, siempre orientándose a determinar la tendencia de las variables que influyen en la conversión a ésteres metílicos de ácidos grasos. Aunque no existieron experimentos adicionales, la repetibilidad obtenida fue suficiente para estimar la variabilidad de los datos y analizar la significancia estadística de los efectos. El proceso de ejecución se realizó con aleatorización de las corridas a fin de minimizar el sesgo experimental.

En lo que concierne al procesamiento y al análisis estadístico de los resultados, se llevó a cabo mediante el software libre R versión 4.5.1, a través del cual se efectuó la prueba de Shapiro-Wilk para verificar la normalidad de los residuos y la prueba de Levene para comprobar la homocedasticidad; también, sirvió de base para ejecutar el ANOVA y la evaluación de la varianza natural de los datos para cuantificar la dispersión del sistema experimental. Con este mismo software se generaron las Figuras de boxplot de residuos, residuos vs. valores ajustados, residuos vs. orden, gráfico de probabilidad normal y los efectos promedio de los factores A, B y C, además del diagrama de Pareto de efectos y la interacción significativa. Estas herramientas Figuras permitieron visualizar la dispersión de los datos, la homogeneidad de la varianza, la normalidad de los residuos y la influencia individual y combinada de los factores dentro del modelo factorial. Finalmente, a partir del procesamiento estadístico realizado en R se obtuvo una recomendación de optimización que sugiere las condiciones experimentales a considerar como la zona de máxima eficiencia del estudio exploratorio desarrollado.

2.1.5 Transesterificación del aceite de coyol

En primera instancia, se realizó un precalentamiento del aceite de coyol en una estufa de convección natural marca Memmert con el propósito de que permanezca en estado líquido y así facilitar su manipulación en la reacción. Luego, el pesaje estuvo dado por una balanza analítica, previa la tara del matraz tipo bola de 250 mL de dos bocas, asegurando que la lectura inicial marcara cero. Progresivamente, fueron añadiéndose los reactivos en el siguiente orden: primero, el alcohol, tomando su peso y consecutivamente su tara; después,

el catalizador, repitiendo la operación de peso y tare; por último, el aceite, tomando únicamente su peso.

Durante la reacción de transesterificación, el sistema permaneció montado sobre una parrilla de agitación y calentamiento marca Cole-Parmer StableTemp (rango de 0 °C a 400 °C, precisión ± 2 °C, velocidad regulable hasta 1200 rpm) que estaba conectada a un condensador de reflujo acoplado a un recirculador para mantener la condensación continua del metanol. Tras colocar un termómetro (intervalo de medición de -20 °C a 110 °C, precisión ± 1 °C), se inició el calentamiento de la mezcla, ajustando la rapidez e agitación a 700 rpm y a una temperatura inicial de 35 °C; que fue incrementándose gradualmente en intervalos de 5 °C cada 15 minutos hasta alcanzar 60 °C, temperatura establecida con base en la literatura (Freedman et al., 1986), controlando que la variación térmica no excediera ± 2 °C.

Una vez alcanzado el tiempo de reacción establecido, se apagó la parrilla, pero manteniendo la agitación constante. De manera inmediata, el producto de reacción se filtró al vacío con el fin de separar la cal sodada del biodiésel crudo, y el producto obtenido fue transferido a un embudo de decantación de 250 mL para permitir la separación de fases entre el biodiésel y el glicerol. Como último paso, una vez separado el biodiésel crudo, se colocó en el horno Memmert a 75 °C durante una hora con el fin de eliminar el alcohol remanente por evaporación. El proceso fue el mismo para los ocho experimentos del diseño factorial 2^3 , realizando los cuatro primeros y, posteriormente, los restantes, y variando los tiempos de reacción para garantizar la aleatoriedad experimental. Finalmente, el filtro con el catalizador recuperado se pesó en la balanza analítica para obtener el valor cuantitativo empleado en el balance de materia, procedimiento aplicado a las tres réplicas, manteniendo constantes las condiciones de operación para asegurar la repetibilidad del diseño factorial. Cabe aclarar que cada réplica estuvo encaminada bajo el mismo protocolo de calentamiento, reacción y filtrado al vacío, registrando la masa del catalizador recuperado, la cantidad de masa del biodiésel crudo y el glicerol.

Una vez obtenidos los lotes de las corridas del diseño factorial, cada muestra fue analizada mediante la curva de calibración FTIR, de la cual se obtuvo un porcentaje de concentración del éster metílico. A partir del valor máximo de concentración de ésteres metílicos y el resultado del diseño factorial 2^3 se tomó el lote óptimo para su preparación a mayor escala,

lo que requirió utilizar un reactor automatizado Syrris Atlas para un control preciso de temperatura y agitación. Las condiciones aplicadas para la preparación del lote óptimo fueron 1614 g de aceite, 1290 mL de metanol y de cal sodada 97 g. Una vez finalizada la reacción, la mezcla se sacó del reactor inmediatamente y se filtró al vacío con el propósito de separar la cal sodada; posteriormente, el producto obtenido se vertió a un embudo de decantación de 500 mL, en donde permaneció en reposo por casi tres días, obteniendo así la separación entre las fases por diferencia de densidades del biodiésel y del glicerol. Como última etapa, el biodiésel fue separado y colocado en un rotavapor marca Büchi para someterlo a la evaporación del metanol remanente, cuyas condiciones de operación fueron 75 °C en el baño, entre 50 rpm a 70 rpm de rotación del matraz y una presión de vacío ente 300 mbar a 180 mbar por aproximadamente 2 horas continuas, permitiendo así una remoción eficiente del metanol.

2.1.6 Caracterización del biodiésel

La caracterización del biodiésel respondió a la espectroscopía FTIR con el fin de identificar los grupos funcionales representativos de los ésteres metílicos y corroborar la desaparición de las señales asociadas a triglicéridos. Asimismo, se aplicó la cromatografía de gases para determinar el perfil de los ésteres metílicos de ácidos grasos.

El comportamiento térmico se estudió mediante análisis termogravimétrico (TGA), identificando las etapas de volatización y degradación térmica inherentes a los ésteres metílicos. Además, se obtuvieron las propiedades fisicoquímicas de viscosidad cinemática y dinámica y poder calorífico.

También, fue necesario determinar los índices de acidez (NMX-F-101-2012), el índice de yodo (8NMX-F-408-1981) y el índice de saponificación (NMX-F-174-SCFI-2006) con el propósito de evaluar la calidad del biodiésel y confirmar su grado de conversión. Para tal efecto, se construyó una curva de calibración, tomando en cuenta el aceite de coyol y el biodiésel de coyol con el fin de establecer la relación composicional entre ambos. Las dos muestras fueron analizadas mediante resonancia magnética nuclear (RMN).

2.2 Equipos utilizados

2.2.1 Rotavapor marca Büchi modelo 215

Cuenta con una velocidad de rotación ajustable entre 20 rpm y 280 rpm, un baño calefactor con un rango operativo de 20 °C a 180 °C y una capacidad para matraces de 50 mL hasta 4000 mL. En este caso, se utilizó para eliminar el disolvente del aceite extraído por el método Soxhlet y garantizar que esté libre de alcohol isopropílico, pues su función principal fue realizar una destilación al vacío y concentrar el aceite de coyol para su posterior caracterización fisicoquímica.

2.2.2 Reactor automático marca Syrris modelo Atlas HD

Se utilizó un reactor automático Syrris Atlas HD equipado con un vaso encamisado de 5L, fabricado con bosilicato, diseñado para el control de temperatura, agitación y dosificación. El dispositivo opera en un intervalo de temperaturas de 90 °C a 250 °C y cuenta con agitación mediante el motor Scorpion Overhead Stirrer con el fin de mantener mezclas bajo condiciones controladas.

2.2.3 Espectrómetro de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) PerkinElmer Frontier.

El dispositivo estuvo configurado con un rango espectral de 8300 cm^{-1} , una resolución de 0.4 cm^{-1} y una precisión de número de onda $\pm 0.02 \text{ cm}^{-1}$ con el fin de identificar los grupos funcionales presentes en el aceite coyol y en el biodiésel obtenido. El equipo trabaja en el infrarrojo medio que va de los 4000 cm^{-1} a los 650 cm^{-1} y produce un haz de luz que excita las vibraciones moleculares, generando un espectro con picos característicos para los ésteres metílicos (C=O a 1740 cm^{-1} , C–O a 1170 cm^{-1}).

También, se realizó una curva de calibración en Spectrum Quant para verificar la conversión de los ésteres metílicos de ácidos grasos obtenidos, de tal modo que se contó con la medición de la mezcla de aceite de coyol y biodiésel en diferentes porcentajes que varían desde 0,10 % a 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 % y 100 %. Sin duda, este procedimiento es necesario para comprobar que la transesterificación se realizó de forma adecuada.

2.2.4 Espectrómetro marca Bruker Biospin modelo AVANCE III 750 MHz

Los análisis de resonancia magnética nuclear fueron ejecutados en un espectrómetro Bruker AVANCE III de 750 MHz, técnica que permite estudiar moléculas al observar cómo reaccionan ciertos núcleos atómicos cuando son colocados en un campo magnético y se les aplican pulsos de radiofrecuencia. Durante esta interacción aparecen señales que se transforman en espectros.

2.2.5 Viscosímetro Stabinger Viscometer Marca Anton Parr Modelo SVM 3001

Este equipo tiene la capacidad para medir la viscosidad cinemática y dinámica y la densidad. Su principio se basa en la viscosidad rotacional, lo que implica medir el torque necesario para girar la bala dentro del fluido controlado a una velocidad constante: la resistencia es causada por la viscosidad del fluido, y es precisamente este torque lo que mide el equipo. El resultado consiste en una reducción progresiva de la viscosidad con respecto a la temperatura, puesto que ambas son directamente proporcionales entre sí y, por ende, a medida que aumenta la temperatura, la viscosidad disminuye.

2.2.6 Calorímetro de bomba adiabática marca Parr modelo 6200

El principio del equipo se basa en la reacción de combustión, proceso que requiere oxígeno, combustible y una chispa para que la muestra se quemara en un recipiente de volumen constante aislado dentro de una cubeta de agua. La bomba está diseñada para que no exista transferencia de calor entre el sistema y el entorno, por lo que el calor liberado de la reacción de la combustión se transfiere al agua en donde está colocado a un sensor que mide el aumento de la temperatura y, de esa manera, puede calcularse el calor liberado por la muestra.

2.2.7 Cromatógrafo de gases marca Perkin Elmer Modelo Claurus 580

El equipo trabaja con un detector de ionización de flama, un inyector automático y una columna capilar elite 5, de 30m de longitud, 0.25mm de diámetro interno, 0.25 μm de espesor de película, finalmente tiene un rango de temperatura de horno de 50 °C a 450°C

El análisis inicia a 100 °C durante un tiempo de 3 min, posteriormente hay un aumento de temperatura de 20 °C min^{-1} hasta alcanzar los 280 °C, a la cual se mantuvo durante 8 min. El inyector y el detector operan a 260 °C. La inyección utiliza un modo Split, y nitrógeno a una presión de 30 psi. Las curvas de calibración se realizaron por medio de un estándar Restek a concentración 10mg mL^{-1} .

2.2.8 Analizador termogravimétrico TGA marca TA Instruments modelo SDT650

El equipo cuenta con una precisión de $\pm 0.1 \mu\text{g}$ y un rango térmico de temperatura ambiente de hasta 1000 °C. El principio radica en quemar una muestra en un rango de temperatura establecido, que varía de los 30 °C hasta los 800 °C, y dentro de esta rampa existen dos etapas principales: la primera, la pirolisis, que consiste en la quema total de la muestra entre los 30 °C a los 650 °C; la segunda, la fase de oxidación, abarca hasta los 800 °C. De ese modo, es posible observar si existe presencia de carbón residual o cenizas de la muestra, determinar el efecto que tiene la pérdida de peso con respecto a la temperatura y saber la cantidad de componentes dentro de la muestra.

2.2.9 Centrifuga marca Linetronics Technologies modelo LT/CF-122000-R/M

Sirve para medir el agua y los sedimentos contaminantes de los combustibles por medio de la centrifugación. Para el estudio se utilizó como referencia la norma ASTM D2709.

2.2.10 Flash Point ASTM D-95 Marca Petrotest modelo PMA-5

El principio fundamental del equipo es el desprendimiento de los vapores del líquido, el cual puede encenderse por medio de una ignición con el fin de lograr la temperatura más baja en

donde puede ocurrir esta reacción. La norma de referencia es la ASTM D-95, que marca como mínimo 93 °C para asegurar que no haya presencia de alcohol en el biodiésel.

2.2.11 Equipo estabilidad oxidativa marca Petrotest modelo PetroOxi

Este dispositivo opera a 140 °C y a una presión de 700 KP para medir la oxidación acelerada de los aceites y la grasa de una muestra, la cual es expuesta a una corriente de aire y temperatura. Entonces, los productos volátiles son arrastrados por el aire a un recipiente de agua, en donde se mide la conductividad.

2.2.12 Baño de corrosión ASTM D130 marca Linetronic modelo LT/CS-14400/M

La prueba determina la corrosión de la tira de cobre causada por productos derivados del petróleo. El proceso consiste en sumergir la tira de cobre en la muestra, la cual se introduce a un baño con calentamiento controlado a 50 °C durante 3 horas. Una vez finalizada, debe compararse si existe un cambio de coloración en la tira por medio de una escala de referencia con el fin de determinar la severidad de la corrosión.

2.2.13 Equipo de punto de nublamiento marca Anton Parr modelo Calisto-100

El equipo opera con una chaqueta de enfriamiento que parte desde los 9 °C hasta los 33 °C y está conectado a un recirculador con una mezcla de etilenglicol/agua (50/50) para obtener una temperatura de 0 °C. La prueba comienza con la temperatura mínima mencionada y debe revisarse cada grado hasta obtener una nube en la parte inferior de la jarra (se reporta el resultado obtenido).

2.2.14 Equipo de destilación al vacío ASTM D-1160 marca Koehler Instrument modelo K80500

Es un método de prueba para determinar los rangos de ebullición de hidrocarburos y biocombustibles mediante una destilación continua a presión al vacío. Ello arroja datos de temperatura de vapor y presión al vacío que.

2.2.15 Difractómetro marca Rigaku modelo Miniflex 600

La caracterización estructural del material se realizó mediante difracción de rayos X (DRX), utilizando un difractómetro Rigaku Miniflex 600 y registrando el difractograma en un rango de 2θ de 5° a 80° , con un tamaño de paso de 0.02 y un tiempo de adquisición de 1 segundo por paso. De ese modo, fue posible obtener la resolución necesaria para identificar las fases cristalinas presentes.

2.2.16 Fisisorción de N_2 marca Quantachrome Instruments modelo Autosorb 1

El análisis se realizó mediante un Quantachrome Autosorb operado por el software Autosorb 1 for Windows versión 1.55. La muestra fue desgasificada a $2^\circ C$ durante 22 h a una temperatura de 77.40 K, empleando un área de sección transversal de 16.2 \AA^2 por molécula y considerando un factor de no linealidad de 6.58×10^{-5} . El ensayo se efectuó bajo condiciones controladas de P/P_0 con una tolerancia de 2 y un tiempo de equilibrio de 3.

CAPÍTULO 3 RESULTADOS

3.1 Caracterización del aceite de *Acrocomia aculeata*

3.1.1 Extracción de aceite

El proceso de extracción de aceite del endospermo o núcleo de la *Acrocomia aculeata* se realizó mediante el método Soxhlet. En total, se procesaron 108 kg de coyol en peso húmedo, que correspondieron a 3256.90 g en peso seco de endospermo. A partir de esta cantidad se conformaron 14 lotes con un promedio de 232.64 g de masa seca por cada uno, obteniendo así un promedio de 103.46 mL por lote, lo que representó un volumen total de 1448.5 mL y una cantidad de aceite promedio de 44,64 %. El aceite obtenido obtuvo un tono amarillento característico y un aspecto homogéneo, indicativo de una extracción eficiente y estable. La Tabla 8 muestran los valores obtenidos:

Tabla 8 Extracción de aceite por lote del endospermo de la *Acrocomia aculeata*

No de lote	Cantidad de masa (g)	Aceite obtenido (g)	Cantidad de aceite (%)	Cantidad de aceite (mL)
1	214.80	79.30	36.92	71.687
2	223.20	98.60	44.18	89.134
3	231.60	115.40	49.83	104.322
4	235.00	111.80	47.57	101.067
5	231.20	97.30	42.08	87.959
6	240.00	92.20	38.42	83.349
7	240.00	111.50	46.46	100.796
8	240.00	118.10	49.21	106.762
9	240.00	124.90	52.04	112.910
10	240.00	127.90	53.29	115.622
11	240.00	97.10	40.46	87.778
12	240.00	87.40	36.42	79.010
13	177.00	92.90	52.49	83.982
14	264.10	94.10	35.63	85.066
Promedio	232.64	103.46	44.64	93.532
				1309.444

3.1.2 Índice de saponificación, índice de yodo e índice de acidez

El aceite extraído presentó un índice de saponificación de 167.7 mg KOH/g, valor que indica un predominio de ácidos grasos de cadena media. El índice de yodo fue de 22.66 g I₂/100 g y el índice de acidez fue de 12.18 mg KOH/g.

3.1.3 Poder calorífico

El aceite de coyol presentó un poder calorífico de 38.16 MJ/kg, lo que significa que tiene una adecuada capacidad energética como materia prima para la producción de biocombustible.

3.1.4 Densidad, viscosidad cinemática y viscosidad dinámica

La Tabla 9 presenta los valores de viscosidad dinámica y cinemática y la densidad del aceite de coyol en función de la temperatura mostrada en cada celda. Estos valores permiten evaluar el comportamiento reológico del combustible que influye en su capacidad de flujo atomización y en el desempeño de la inyección. Como se observa, al incrementar la temperatura, la viscosidad y la densidad disminuyen de manera progresiva.

Tabla 9 Valores de las propiedades de densidad y viscosidad

Temperatura de celda (°C)	Viscosidad dinámica (mPa·s)	Viscosidad cinemática (mm ² /s)	Densidad (g/cm ³)
15	79.802	86.577	0.922
20	93.895	102.23	0.918
25	49.342	53.962	0.914
30	39.719	43.602	0.911
35	32.423	35.730	0.907
40	26.689	29.524	0.904
45	22.429	24.907	0.901
50	18.970	21.146	0.897
55	16.207	18.137	0.894
60	13.973	15.697	0.890
65	12.160	13.713	0.887
70	10.660	12.068	0.883
75	9.4083	10.693	0.880

3.1.5 Espectroscopia infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

La Figura 5 presenta las señales obtenidas mediante la FTIR del aceite de coyol. En la muestra se identifican bandas distintivas en 1743 cm^{-1} asociadas al grupo carbonilo ($C = O$), propio de los ésteres presentes en los triglicéridos. Posteriormente, se observan señales representativas en 3000 cm^{-1} por la tensión del enlace ($C - H$), 2922 cm^{-1} y 2853 cm^{-1} por los estiramientos asimétricos y simétrico del grupo metileno (CH_2), 1458 cm^{-1} por las vibraciones de tijera y flexión para los grupos metilenos, 1157 cm^{-1} por las vibraciones de estiramiento asociadas a enlaces éster ($C - O$) y 1110 cm^{-1} correspondientes a las vibraciones de estiramiento ($C - O - C$).

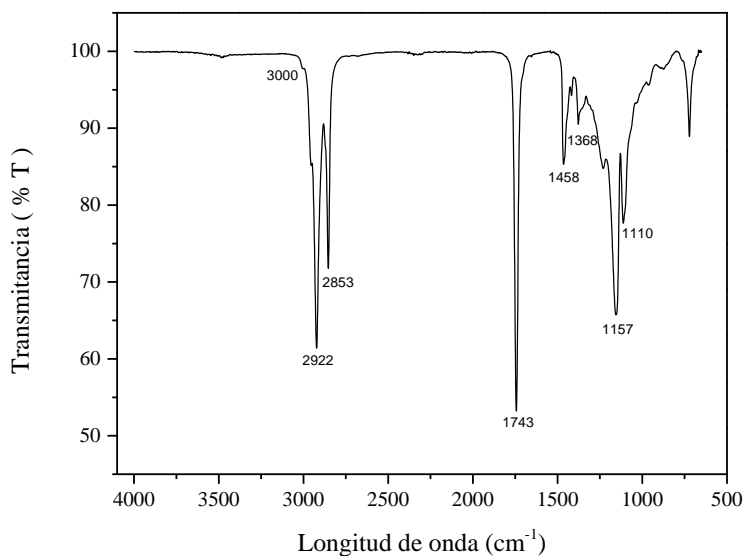


Figura 4 Espectro FTIR del aceite de la *Acrocomia aculeata*

3.1.6 Cromatografía de Gases

Para determinar el perfil de ácidos grasos del aceite de coyol, la muestra fue convertida a su forma de FAME y, posteriormente, analizada mediante cromatografía de gases, lo que permitió cuantificar los compuestos presentes a manera de porcentajes de ésteres. En ese sentido, en la Tabla 10 muestra el porcentaje que le corresponde a cada ácido graso del coyol de acuerdo con los metilos observados:

Tabla 10 Perfil de ácidos grasos del aceite del endospermo de la *Acrocomia aculeata*

FAME	Nombre típico		Promedio (%)
Metil hexanoato	Ácido caproico	C6:0	5.33
Metil decanoato	Ácido caprico	C10:0	34.87
Metil laureato	Ácido laurico	C12:0	33.85
Metil miristoleato	Ácido miristoleico	C14:1	15.53
Metil palmitoleato	Ácido palmitoleico	C16:1	7.89
Metil oleato	Ácido oleico	C18:1	2.44

3.1.7 Resonancia Magnética Nuclear

La Figura 6 muestra el espectro de RMN, cuyos resultados indican los desplazamientos entre 0.88 ppm y 2.31 ppm asociados a los protones de los grupos metilos (-CH₃) y metilenos (-CH₂-) de los triglicéridos, entre 4.28 ppm a 4.31 ppm para los metilenos de la glicerina y entre 5.27 ppm a 5.35 ppm para los protones de los metilos de los dobles enlaces.

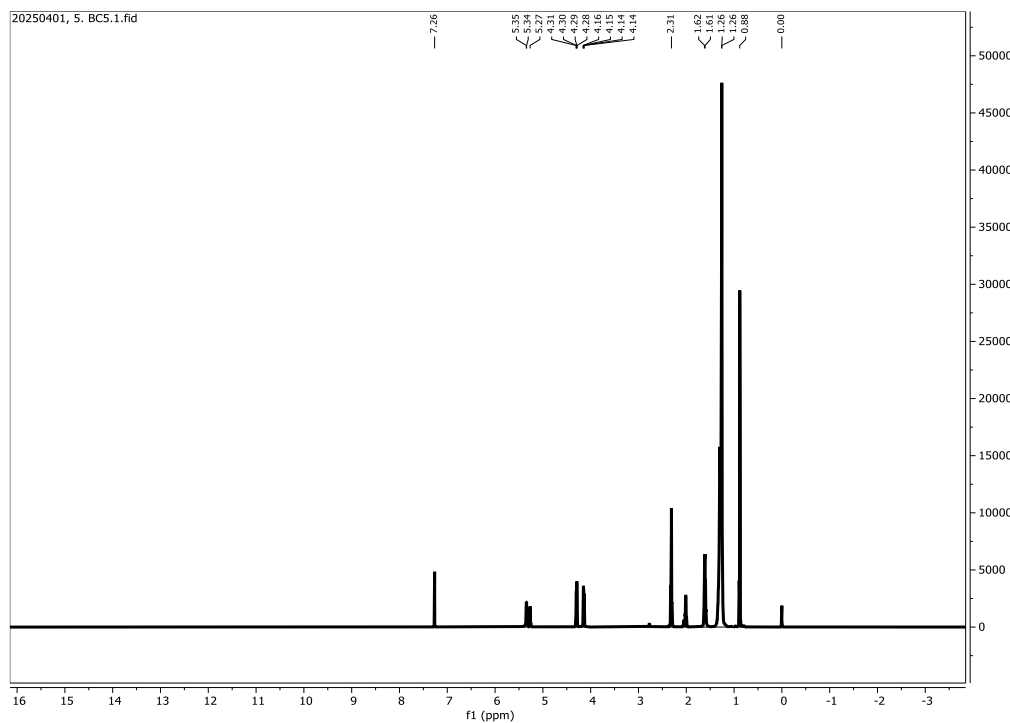


Figura 5 Señales de 1H-RMN del aceite del endospermo de la *Acrocomia aculeata*

3.1.8 TGA del aceite

La Figura 7 detalla el comportamiento del aceite del endospermo del coyol que permanece estable hasta los 300 °C, para después perder masa rápidamente entre los 320 °C a 480 °C, lo que indica una degradación térmica en ese intervalo. Por otra parte, de acuerdo al análisis proximal se obtuvieron los siguientes resultados: 99.41% de compuestos orgánicos volátiles, un 0.387 % de carbono fijo y un total de cenizas de 0.303 %.

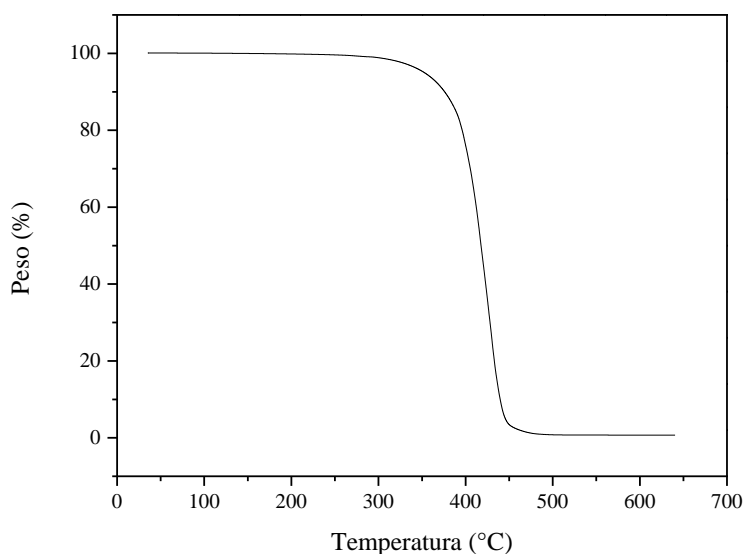


Figura 6 TGA del aceite del endospermo de la *Acrocomia aculeata*

3.2 Resultados del balance de materia de la transesterificación con aceite de coyol

El balance de materia constituye una herramienta fundamental para evaluar la eficiencia del proceso de transesterificación, mediante el cual se obtienen los ésteres metílicos de ácidos grasos (biodiésel) y el glicerol. A partir de los datos experimentales, y considerando el peso molecular promedio del aceite de coyol de 586.212 g/mol, se calculó el rendimiento de biodiésel, cuyo peso molecular promedio fue de 181.96 g/mol, determinado en función de los triglicéridos predominantes: ácido cáprico ($C_{10}H_{20}O_2$), ácido láurico ($C_{12}H_{24}O_2$) y ácido miristoleico ($C_{14}H_{26}O_2$).

El proceso se llevó a cabo bajo condiciones controladas con una relación molar alcohol:aceite de 15:1 y 24:1, un catalizador entre 3 % a 6 %, un tiempo de 1 y 3 horas, una temperatura de 60 °C, una agitación de 700 rpm y en un medio básico, utilizando metanol en exceso con el fin de favorecer la formación de biodiésel. A partir del balance global, se observó una diferencia entre la entrada y la salida inferior al 1 %, lo cual indica un cierre de masa adecuado atribuible principalmente a las pérdidas menores por evaporación de metanol y a la pérdida en las operaciones unitarias de separación.

El balance general del proceso se representa de la siguiente manera:



El análisis cuantitativo mostró que por cada mol de aceite de coyol (0.0256 mol) se obtienen teóricamente tres moles de biodiésel (545.9 mol) y un mol de glicerol debido a que cada molécula de triglicérido presente en el aceite está compuesta por tres cadenas de ácidos grasos unidas a una molécula de glicerol. Las mediciones experimentales presentaron una pérdida menor al 3 %, valor coherente con las pérdidas del sistema de transesterificación heterogénea; estas desviaciones se atribuyen principalmente a la adsorción de una parte de la superficie del catalizador y en las operaciones de separación.

Asimismo, se calcularon los moles de triglicéridos en la reacción en función del peso molecular del aceite de coyol ($586.212 \text{ g mol}^{-1}$), los cuales representan la cantidad susceptible a transformarse en biodiésel. Posteriormente, fue necesario calcular la masa total del biodiésel producido para así obtener sus moles, utilizando el peso molecular promedio del biodiésel de coyol (181.96 g/mol). Este cálculo permitió mostrar el rendimiento, es decir el grado de transformación total de aceite de coyol a biodiésel durante la reacción de transesterificación (ver Tabla 11).

Tabla 11 Balance de materia de la reacción de transesterificación de aceite de coyol

Orden	Aceite (g)	Peso alcohol (g)	Peso cat (g)	Entradas	Interfase pérdida			Peso del filtro		Alcohol Salidas	E-S	% Perdida	Curva FTIR	Masa de biodiésel	Rendimiento (%)
					Biodiesel (g)	Peso glicerol (g)	de biodiesel y glicerol con catalizador								
1	15	9.6	0.45	25.05	10.5	2.7	3.5	5.7	1.7	24.11	0.95	3.77	90.793	9.53	63.13
2	15.2	15.2	0.45	30.85	11.4	3.9	4.1	7.1	2	28.51	2.35	7.60	89.0515	10.15	67.23
3	15.6	9.9	0.9	26.4	8.3	3.6	2.5	7.3	2.1	23.81	2.59	9.81	98.0383	8.14	53.89
4	15.4	15.2	0.9	31.5	11.1	4.3	5.2	4.7	2.3	27.60	3.90	12.38	98.2261	10.90	72.21
5	15	9.6	0.45	25.05	9.3	3.3	3.3	4.5	4.3	24.71	0.35	1.38	97.8158	9.10	60.24
6	15.3	15.6	0.6	31.5	10.8	4.4	6.6	4.0	2.6	28.40	3.10	9.84	99.1138	10.70	70.89
7	15.2	9.6	0.9	25.7	9.9	4.1	4.3	5.5	3.7	27.51	-1.81	-7.04	100.2059	9.92	65.70
8	15.2	15.4	0.9	31.5	11	8	3.2	6.1	0.5	28.81	2.69	8.54	98.1181	10.79	71.48
9	15.5	9.7	0.5	25.7	7.2	4.3	6.6	4.6	2	24.70	1.00	3.89	95.5046	6.88	45.54
10	15.8	15.3	0.5	31.6	10.8	8	6.7	4.2	1.8	31.53	0.07	0.21	98.0059	10.58	70.10
11	15	9.8	0.9	25.7	11	5.6	3.3	4.3	1.1	25.31	0.39	1.52	96.515	10.62	70.31
12	15.3	15.3	0.9	31.5	10.9	1.9	9.3	6.5	2.1	30.71	0.79	2.51	96.8654	10.56	69.92
13	15.2	9.8	0.5	25.5	8.1	2.6	6.4	4.7	1.5	23.30	2.20	8.63	95.2776	7.72	51.11
14	15.5	15.8	0.5	31.8	11.8	5.2	9.8	1.4	0.9	29.11	2.70	8.47	90.3557	10.66	70.61
15	15.5	9.6	0.9	26	9.4	3.4	3.8	5.8	0.8	23.20	2.80	10.77	97.9075	9.20	60.95
16	15.2	15.4	0.9	31.5	10	5	6.5	2.4	1.3	25.21	6.29	19.97	99.4862	9.95	65.88
17	15.7	9.7	0.5	25.9	9	3.1	1.8	4.7	2.3	20.91	5.00	19.29	86.1348	7.75	51.34
18	15.1	15.8	0.5	31.4	11.8	5.2	5.5	5.6	1.5	29.61	1.80	5.72	91.0232	10.74	71.13
19	15.2	9.8	0.9	25.9	12.1	4.6	5.3	4.3	1.6	27.90	-2.00	-7.72	89.2836	10.80	71.55
20	15.5	15.2	0.9	31.6	11	3.7	4.6	6.4	2.4	28.11	3.49	11.04	99.3868	10.93	72.40
21	15.1	9.5	0.5	25.1	7.5	5.3	6.8	3.2	1.5	24.31	0.80	3.17	99.9027	7.49	49.62
22	15.5	15.4	0.5	31.4	11	1.2	3.7	6.5	2.7	25.11	6.30	20.05	99.4229	10.94	72.43
23	15.5	10	0.9	26.4	10.5	4.7	2.9	6.1	0.9	25.11	1.29	4.89	95.9648	10.08	66.73
24	15.3	15.7	0.9	31.9	10.9	8.4	4.7	5.3	0.7	30.01	1.89	5.92	99.1594	10.81	71.58

3.3 Catalizador

3.3.1 Difracción de rayos X (DRX) de cal sodada

La Figura 8 muestra el difractograma de la cal sodada pura ($\text{CaO}+\text{NaOH}$) antes de ser empleada en la reacción de transesterificación; en ese sentido, existen picos definidos e intensos correspondientes a las fases cristalinas de CaO , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y carbonato de calcio (CaCO_3). Los picos característicos se localizaron a $2\theta = 34.19^\circ, 47.2^\circ, 54.4^\circ$ y 62.7° para el CaO , a $28.7^\circ, 34.1^\circ, 47.2^\circ$ y 50.9° para el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y a $17.9^\circ, 28.6^\circ, 29.4^\circ, 39.4^\circ$ y 50.9° para el CaCO_3 , siendo 29.4° característico de la fase romboédrica (Chen et al., 2015). Estos resultados confirman la naturaleza policristalina del catalizador y la coexistencia de las fases activas responsables de la catálisis básica.

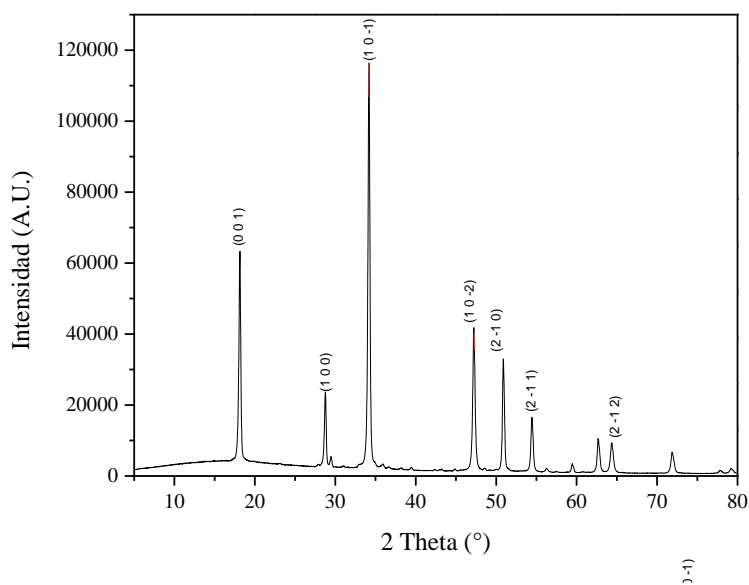


Figura 7 Difractograma de la cal sodada antes de la transesterificación

Por otro lado, la Figura 9 presenta el difractograma de la cal sodada después de la reacción de transesterificación. Como es posible observar, hay una disminución notable en la intensidad de los picos de CaO y un aumento de las señales asociadas al CaCO_3 , lo que indica una carbonatación superficial producto de la exposición del material al dióxido de carbono liberado durante el proceso. Asimismo, algunos picos aparecen más anchos y menos definidos, evidenciando una pérdida parcial de orden cristalino y una posible formación de

estructuras amorfas. A pesar de estas modificaciones, las fases correspondientes a CaO y Ca(OH)₂ permanecen visibles, lo que demuestra que el catalizador conserva su capacidad básica y puede reutilizarse en ciclos posteriores.

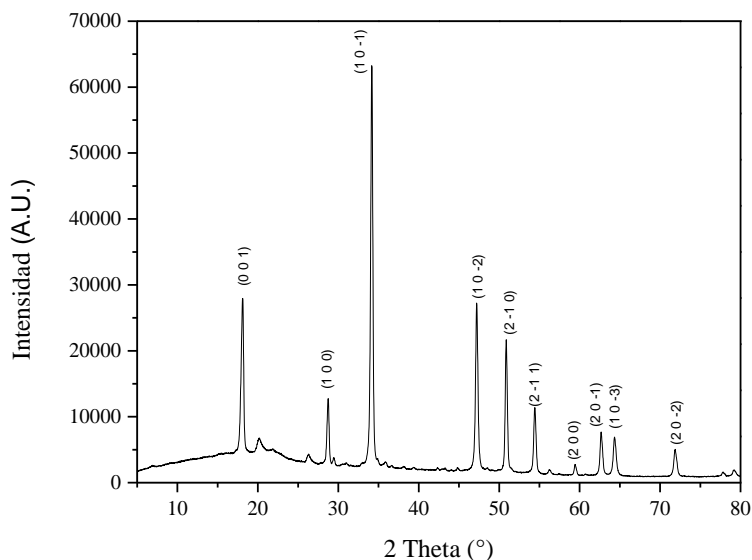


Figura 8 Difractograma de la cal sodada después de la transesterificación

3.3.2 Fisisorción de N₂

La Figura 10 muestra la isoterma de adsorción-desorción correspondiente a la cal sodada pura, , indicando una microporosidad mínima, Conforme aumenta la presión relativa surge un bucle de histéresis amplio con un incremento abrupto del volumen absorbido cercano a $\frac{P}{P_0} \approx 0.9 - 1.0$. Esta morfología corresponde a una isoterma Tipo IV(a) con histéresis H3 (de la International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC), característica de materiales mesoporosos y macroporsos formados por agregados laminares con poros en forma de rendija, con un área superficial de poro de 10.29 m²/g, un volumen total de poro de 1.344 x 10⁻¹ cm³/g y un diámetro promedio de poro de 5.223 x 10² Å . Además, el mayor volumen de adsorción total y la amplitud del bucle confirman la presencia de una red de mesoporos abiertos, sin obstrucciones ni productos secundarios. La superposición parcial de las ramas

hasta aproximadamente $\frac{P}{P_0} = 0.7$ y el ascenso vertical final son indicativos de condensación capilar, sin evidencia significativa de microporosidad.

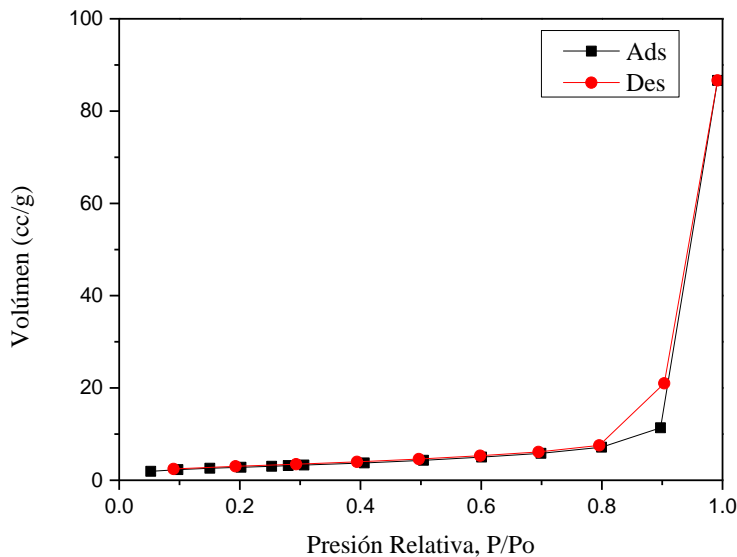


Figura 9 Isoterma de adsorción-desorción correspondiente a la cal sodada antes de la transesterificación

Por otra parte, la Figura 11 presenta la isoterma de adsorción-desorción de la cal sodada después de su uso en la reacción de transesterificación. La curva muestra bajos volúmenes de adsorción ($\approx 10 \frac{cc}{g}$) y un bucle de histéresis más estrecho, lo que revela una reducción significativa del área superficial y del volumen de poro respecto al material original. El comportamiento corresponde también a una isoterma tipo IV(a) con histéresis H3, aunque el menor volumen adsorbido sugiere un bloqueo o colapso parcial de la estructura porosa debido a la carbonatación — $CaCO_3$ — e hidratación — $Ca(OH)_2$ — y/o a la adsorción de compuestos orgánicos residuales generados durante la reacción de transesterificación. Este cambio se refleja en un área superficial del poro de $1.694 \text{ m}^2/\text{g}$, un volumen total del poro de $1.667 \times 10^{-2} \text{ cm}^3/\text{g}$ y un diámetro promedio de poro de $3.935 \times 10^2 \text{ \AA}$. Además, el aumento moderado de volumen a altas presiones ($\frac{P}{P_0} \rightarrow 1$) y la ausencia de meseta indican una condensación capilar en los poros abiertos y una posible cavitación durante la desorción, por lo que se puede inferir que corresponde a un sistema con histéresis H3.

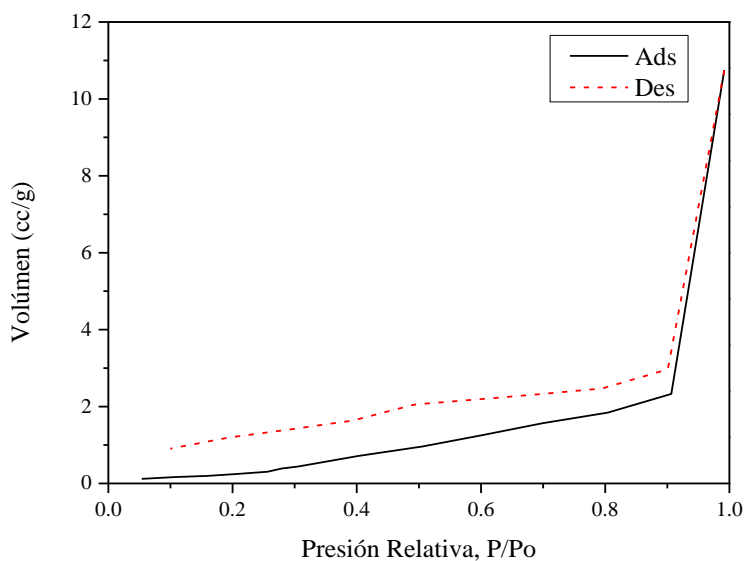


Figura 10 Isoterma de adsorción-desorción correspondiente a la cal sodada después de la transesterificación

La comparación de las isotermas de adsorción-desorción de nitrógeno para la cal sodada pura y usada muestra que ambas corresponden al tipo IV(a) con histéresis H3, características de materiales mesoporosos con poros en forma de rendija. Sin embargo, la cal sodada pura presenta mayor volumen adsorbido y una histéresis más amplia, lo que indica una red de poros abiertos y una elevada área superficial. En cambio, la muestra usada exhibe un volumen adsorbido reducido y un bucle más estrecho, reflejo de la disminución del área del volumen de poro por carbonatación, hidratación y obstrucción por compuestos orgánicos. En conjunto, estas variaciones confirman una pérdida de porosidad y accesibilidad tras la reacción atribuible al uso del material.

3.3.3. Espectro por transformada de Fourier de la cal sodada

La Figura 12 presenta el espectro FTIR correspondiente a la cal sodada sin uso, en donde se observan a las bandas características del hidróxido y del óxido de calcio junto con las señales asociadas a carbonatos superficiales formados por la exposición al CO₂ atmosférico. La banda centrada en 3640 cm⁻¹ corresponde a la vibración del estiramiento O-H del Ca(OH)₂, mientras que la señal intensa cercana a 3397 cm⁻¹ se atribuye al agua adsorbida en la

superficie del material. Asimismo, en la región del $1487\text{-}1416\text{ cm}^{-1}$ se identifica la vibración asimétrica del ion carbonato (CO_3^{2-}) vinculada a trazas de CaCO_3 , así como una banda complementaria en 872 cm^{-1} relacionada al modo de flexión fuera del plano del mismo ion. Finalmente, la señal alrededor de 1040 cm^{-1} corresponde a la vibración del enlace Ca-O, propia del óxido de calcio.

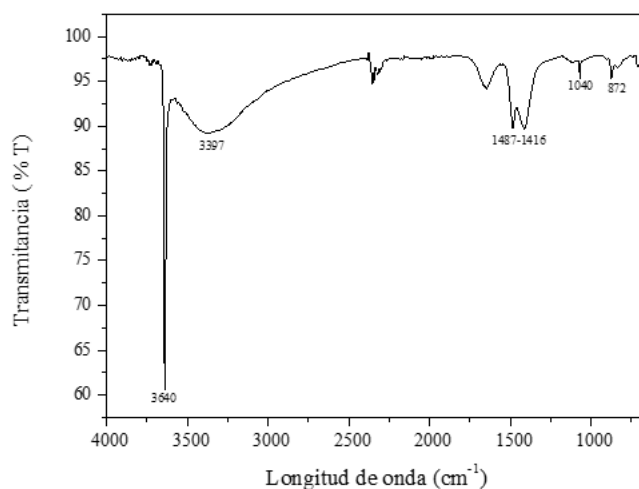


Figura 11 Espectro FTIR correspondiente a la cal sodada antes de la transesterificación

En cambio, la Figura 13 presenta el espectro FTIR concerniente a la cal sodada después de su uso en la reacción de transesterificación. Como es posible visualizar, hay un incremento en la intensidad y la definición de las bandas asociadas a grupos carbonato (CO_3^{2-}) en $1436\text{-}1416\text{ cm}^{-1}$ y 872 cm^{-1} , lo que evidencia la formación de CaCO_3 como producto de la carbonatación del CaO y Ca(OH)_2 durante el proceso catalítico. La banda en 3640 cm^{-1} , correspondiente al estiramiento O-H del Ca(OH)_2 , disminuye respecto al material original, lo que indica una reducción del contenido de hidróxido y una posible conversión hacia carbonato. Finalmente, la presencia de las señales $2923\text{-}2854\text{ cm}^{-1}$ puede atribuirse a grupos C-H provenientes de residuos orgánicos adsorbidos (trazas de ésteres metílicos o glicerol), mientras que la región de 1040 cm^{-1} conserva la vibración de enlace Ca-O, confirmando que el óxido de calcio permanece parcialmente activo en la superficie.

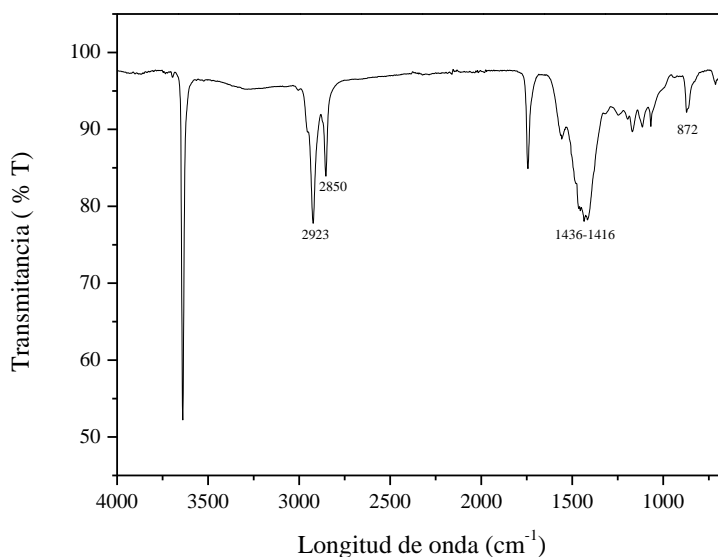


Figura 12 Espectro FTIR correspondiente a la cal sodada usada

3.4 Caracterización del biodiésel de coyol

El biodiésel obtenido a partir del aceite de *Acrocomia aculeata* fue caracterizado mediante técnicas espectroscópicas y fisicoquímicas con el objetivo de confirmar la conversión de triglicéridos a ésteres metílicos de ácidos grasos y verificar el cumplimiento de las especificaciones establecidas en la norma ASTM D6751. La caracterización incluyó el análisis estructural mediante FTIR y RMN, la composición molecular por cromatografía de gases, la determinación de propiedades fisicoquímicas, específicamente la densidad, la viscosidad, el poder calorífico, la estabilidad oxidativa y el comportamiento térmico (TGA), así como los índices de acidez, yodo y saponificación. Estos ensayos contribuyeron a corroborar la calidad del biocombustible, su grado de conversión a ésteres metílicos de ácidos grasos y su equivalencia con los estándares del diésel convencional.

3.4.1 Índice de saponificación, índice de yodo e índice de acidez

El biodiésel presentó un índice de saponificación de 152.85 mg KOH/g, valor ligeramente superior al del aceite original y atribuible a la conversión de triglicéridos en ésteres metílicos

de ácidos grasos. El índice de yodo fue de 17.73 gI₂/100 g, indicando un grado moderado de insaturación que contribuye a una buena estabilidad oxidativa. Por su parte, el índice de acidez se redujo a 0.39 mg KOH/g.

3.4.2 Poder calorífico

El poder calorífico obtenido fue de 38.65 MJ/kg, lo que demuestra una adecuada capacidad energética para el uso como biodiésel. Cabe indicar que el valor se encuentra dentro del intervalo reportado para los biocombustibles obtenidos de aceites vegetales, lo que confirma la viabilidad de la propuesta.

3.4.3 Viscosidad dinámica, viscosidad cinemática y densidad.

La Tabla 12 muestra los valores de viscosidad dinámica y cinemática y la densidad del biodiésel de endospermo de la *Acrocomia aculeata* a diferentes temperaturas. Estas propiedades permiten analizar el comportamiento físico y de flujo del combustible, factores que inciden directamente en la atomización y la eficiencia de inyección. En términos generales, se observa que la viscosidad y la densidad disminuyen gradualmente cuando aumenta la temperatura.

Tabla 12 Valores de viscosidad dinámica, viscosidad cinemática y densidad del biodiésel de endospermo de la *Acrocomia aculeata*

Temperatura de celda (°C)	Viscosidad dinámica (mPa·s)	Viscosidad cinemática (mm ² /s)	Densidad (g/cm ³)
15	4.725	5.394	0.876
20	4.153	4.764	0.872
25	3.673	4.231	0.868
30	3.269	3.783	0.864
35	2.928	3.404	0.860
40	2.637	3.079	0.857
45	2.386	2.798	0.853
50	2.168	2.554	0.849
55	1.979	2.342	0.845
60	1.812	2.153	0.841
65	1.663	1.985	0.838
70	1.534	1.839	0.834
75	1.422	1.713	0.830

3.4.4 Espectroscopia por Transformada de Fourier del biodiésel de coyol

La Figura 14 presenta el espectro FTIR correspondiente al biodiésel de *Acrocomia aculeata* obtenido mediante la reacción de transesterificación, en donde se observan las bandas características que confirman la formación de ésteres metílicos: la más representativa se encuentra a los 1742 cm^{-1} , atribuida al estiramiento del grupo carbonilo ($C = O$); entre 2923 cm^{-1} y 2854 cm^{-1} aparecen las señales correspondientes a las vibraciones de estiramiento asimétrico y simétrico de los grupos metileno (CH_2); además, entre 1464 cm^{-1} y 1436 cm^{-1} se identifican las deformaciones del grupo metilo (CH_3); por último, las bandas 1196 cm^{-1} y 1169 cm^{-1} se asocian con el estiramiento del enlace ($C - O$) del grupo éster metílico.

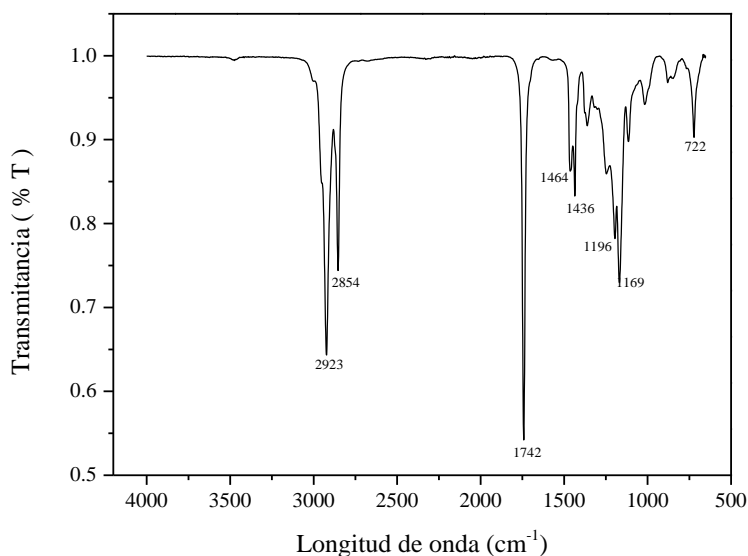


Figura 13 Espectro FTIR correspondiente al biodiésel de endospermo de *Acrocomia aculeata*

3.4.5 Resonancia Magnética Nuclear

La Figura 15 presenta el espectro de la resonancia magnética nuclear de protones del biodiésel de coyol, el cual muestra las señales características de los ésteres metílicos de ácidos grasos, confirmando la conversión de triglicéridos. Se observa así una señal en 0.85 ppm atribuida a los protones del grupo metilo terminal (CH_3), mientras que la región en 1.25 ppm corresponde a los grupos metileno (CH_2) de las cadenas alifáticas y la señal en 2.30 ppm se asocia con los protones α al grupo carbonilo (CH_2-COO), típica de los ésteres

metílicos. Ahora bien, la ausencia de señales en 4.1 - 4.3 ppm correspondientes al glicerol y en 5.0-5.34 ppm de los triglicéridos confirma la transesterificación del aceite. Por último, en el espectro se identifica la señal concerniente a los protones del grupo metilo del éster metílico (O-CH₃) ubicada en 3.67 ppm.

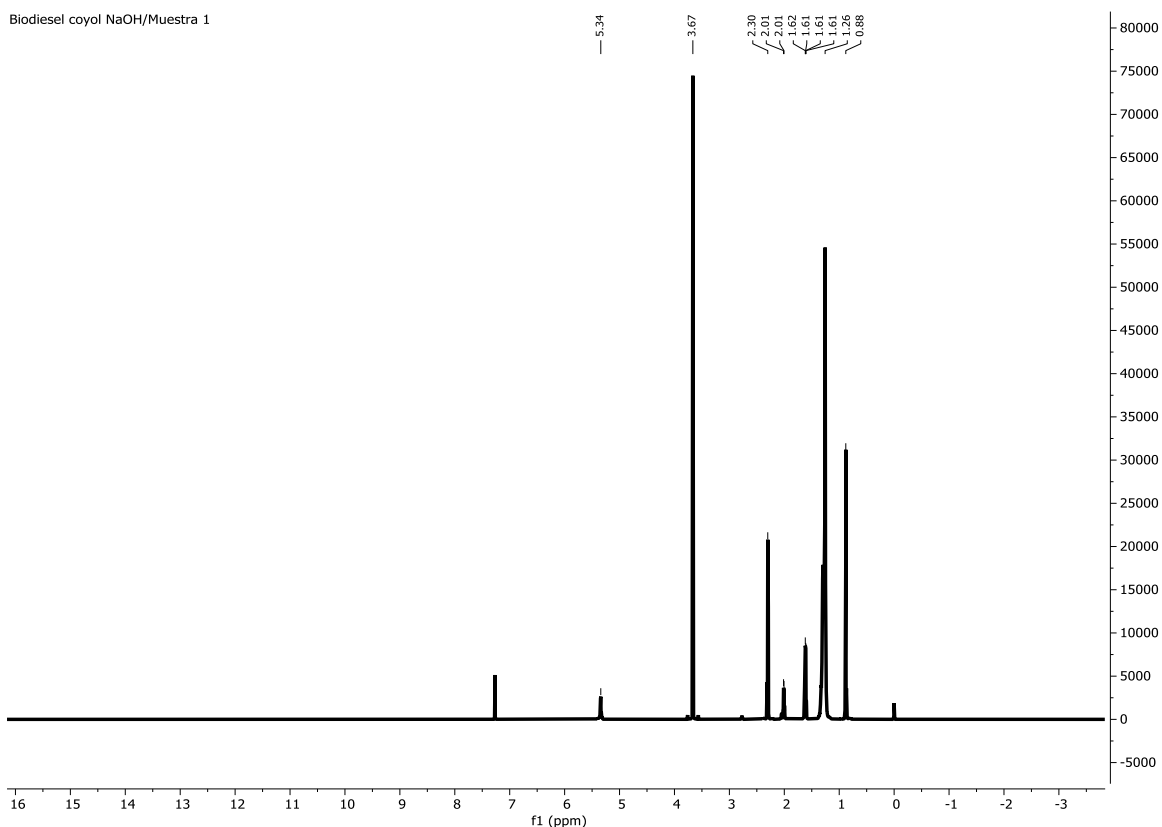


Figura 14 Espectro de la resonancia magnética nuclear de protones del biodiésel del endospermo de *Acrocomia aculeata*

3.4.6 Estabilidad oxidativa

El resultado de la prueba de estabilidad oxidativa del biodiésel de coyol fue de 11.56 horas a 110 °C. De acuerdo con la norma ASTM D6751, el valor mínimo requerido para esta propiedad es de 3 horas, por lo que se asegura una resistencia adecuada a la oxidación durante su almacenamiento.

3.4.7 Punto de inflamación

El resultado del punto de inflamación para el biodiésel de coyol fue de 105 °C, determinado según el método ASTM D93. De acuerdo con la norma ASTM D6751, el valor mínimo aceptado es de 93 °C, por lo que el resultado indica que el biocombustible cumple con los requisitos mínimos de seguridad y almacenamiento.

3.4.8 Humedad y sedimentos

El contenido de humedad y sedimentos en el biodiésel de coyol fue de 0.5 % vol., valor que supera el límite establecido por la norma ASTM D6751, la cual permite un máximo de 0.05 % vol. Este resultado indica la necesidad de mejorar el proceso de purificación, pues una elevada cantidad de partículas puede afectar negativamente el desempeño del combustible.

3.4.9 Punto de nublamiento

El punto de nublamiento del biodiésel fue de -1 °C, lo que implica una buena estabilidad del combustible a bajas temperaturas para climas templados.

3.4.10 Tira de cobre

El ensayo de corrosión en tira de cobre, realizado según la norma ASTM D130, arrojó 1b, es decir que hay una ligera coloración sin corrosión significativa. El valor cumple con los requisitos de calidad establecidos en la norma ASTM D6751 para biodiésel.

3.4.11 Análisis termogravimétrico (TAG)

La Figura 16 del TGA del biodiésel muestra una pérdida de masa gradual a partir de 150 °C a 180 °C, seguida de una degradación rápida entre 200 °C y 320 °C, donde el material se volatiliza casi por completo. Después de esta etapa, la curva encuentra estabilización con un residuo cercano a cero.

Por otra parte, los resultados del análisis proximal fueron los siguientes: 1.14 % de humedad, 97.65 % de compuestos orgánicos volátiles, 0.2 % de carbono fijo y 0.6 % de cenizas.

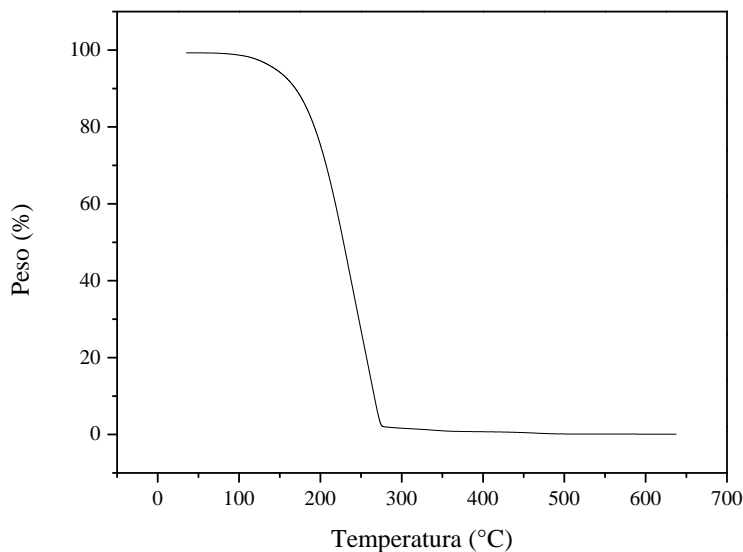


Figura 15 Espectro del análisis termogravimétrico del biodiésel del endospermo de *Acrocomia aculeata*

3.4.12 Destilación al vacío

La Tabla 13 muestra los resultados obtenidos de la prueba de destilación al vacío, en donde se observa que la temperatura es de 202.9 °C al 90 % de destilado, valores que están dentro de los parámetros de la norma ASTM D-6751, la cual establece un máximo de 360 °C.

Tabla 13 Resultados de la prueba ASTM D-1160 para destilación al vacío

Cantidad mL	Temperatura (°C)	Cantidad mL	Temperatura (°C)
20	131.2	120	163.0
40	145.0	130	165.3
50	146.4	140	172.7
60	149.4	150	184.1
70	151.0	160	194.8
80	153.5	170	199.9
90	155.2	180	202.9
100	157.0	190	205.7
110	159.9	200	206.1

3.5 Análisis estadístico 2^k replicado

La Tabla 14 detalla los resultados de la experimentación:

Tabla 14 Matriz del diseño factorial 2^3 y valores obtenidos en las tres réplicas

Factores			Variable de respuesta: Rendimientos		
			Réplicas		
			R1	R2	R3
-	-	-	48.44	45.54	51.34
+	-	-	70.61	70.10	71.13
-	+	-	70.93	70.31	71.55
+	+	-	72.21	72.30	72.40
-	-	+	50.36	51.11	49.62
+	-	+	70.89	70.61	70.75
-	+	+	65.70	66.21	66.73
+	+	+	71.48	71.53	71.58

3.5.1 Variables y factores

Nombre del diseño factorial: 2^3

Número de factores experimentales: 3

Factor A: relación molar alcohol:aceite

Factor B: porcentaje en peso del catalizador

Factor C: tiempo de reacción

Variable de respuesta: rendimiento de biodiésel

3.5.2 Hipótesis de factor simple

Factor A: relación molar alcohol:aceite.

H_0 : No influye la cantidad de alcohol representada por la relación molar alcohol:aceite en la obtención de rendimiento de biodiésel.

H_a : Sí influye la cantidad de alcohol representada por la relación molar alcohol: en la obtención de rendimiento de biodiésel.

Factor B: porcentaje en peso del catalizador.

H_0 : No influye la variación del porcentaje en peso del catalizador en la obtención del rendimiento de biodiésel.

H_a : Sí influye la variación del porcentaje en peso del catalizador en la obtención del rendimiento de biodiésel.

Factor C: tiempo de la reacción.

H_0 : No influye la variación de tiempo de la reacción en la obtención del rendimiento de biodiésel.

H_a : Sí influye la variación del tiempo de la reacción en la obtención del rendimiento de biodiésel.

3.5.3 Hipótesis de factor doble

Factor AB: relación molar alcohol:aceite y porcentaje en peso del catalizador.

H_0 : No influye la cantidad de alcohol presentada por la relación molar alcohol:aceite y la variación del porcentaje en peso del catalizador en la obtención del rendimiento de biodiésel.

H_a : Sí influye la cantidad de alcohol presentada por la relación molar alcohol:aceite y la variación del porcentaje en peso del catalizador en la obtención del rendimiento de biodiésel.

Factor AC: relación molar alcohol:aceite y tiempo de la reacción.

H_0 : No influye el efecto de la interacción entre la cantidad de alcohol representada por relación molar alcohol:aceite y la variación del tiempo de la reacción en la obtención del rendimiento de biodiésel.

H_a : Sí influye el efecto de la interacción entre la cantidad de alcohol representada por relación molar alcohol:aceite y la variación del tiempo de la reacción en la obtención del rendimiento de biodiésel.

Factor BC: porcentaje en peso del catalizador y tiempo de la reacción.

H_0 : No influye la variación del porcentaje en peso del catalizador y la variación tiempo de la reacción en la obtención del rendimiento de biodiésel.

H_a : Sí influye la variación del porcentaje en peso del catalizador y la variación tiempo de la reacción en la obtención del rendimiento de biodiésel.

3.5.4 Hipótesis de factor triple

Factor ABC: relación molar alcohol:aceite, porcentaje en peso del catalizador y tiempo de la reacción.

H_0 : No influye la cantidad de alcohol representada por la relación molar alcohol:aceite, la variación del porcentaje en peso del catalizador y la variación tiempo de la reacción en la obtención del rendimiento de biodiésel.

H_a : Sí influye la cantidad de alcohol representada por la relación molar alcohol:aceite, la variación del porcentaje en peso del catalizador y la variación tiempo de la reacción en la obtención del rendimiento de biodiésel.

3.5.5. Contrastes, Pareto normal

A partir del diagrama de Pareto queda demostrada la relevancia relativa de las variables en un diseño factorial aplicado a la transesterificación del aceite de coyol con cal sodada, siendo estas la A) relación molar alcohol:aceite, B) el porcentaje en peso del catalizados y C) el tiempo de reacción. A continuación, la Figura 18 deja por sentado que los factores A y B, así como la interacción A*B, inciden en mayor medida en el proceso, en vista de que tienen los valores más altos de significancia estadística y están muy por encima del umbral ($p > 0.05$). Asimismo, C y la interacción B*C y A*B*C son estadísticamente significativas, mientras que A*C tiene el más bajo nivel de significancia, solo un poco más del límite de aceptación, lo que implica que su incidencia en el rendimiento es marginal.

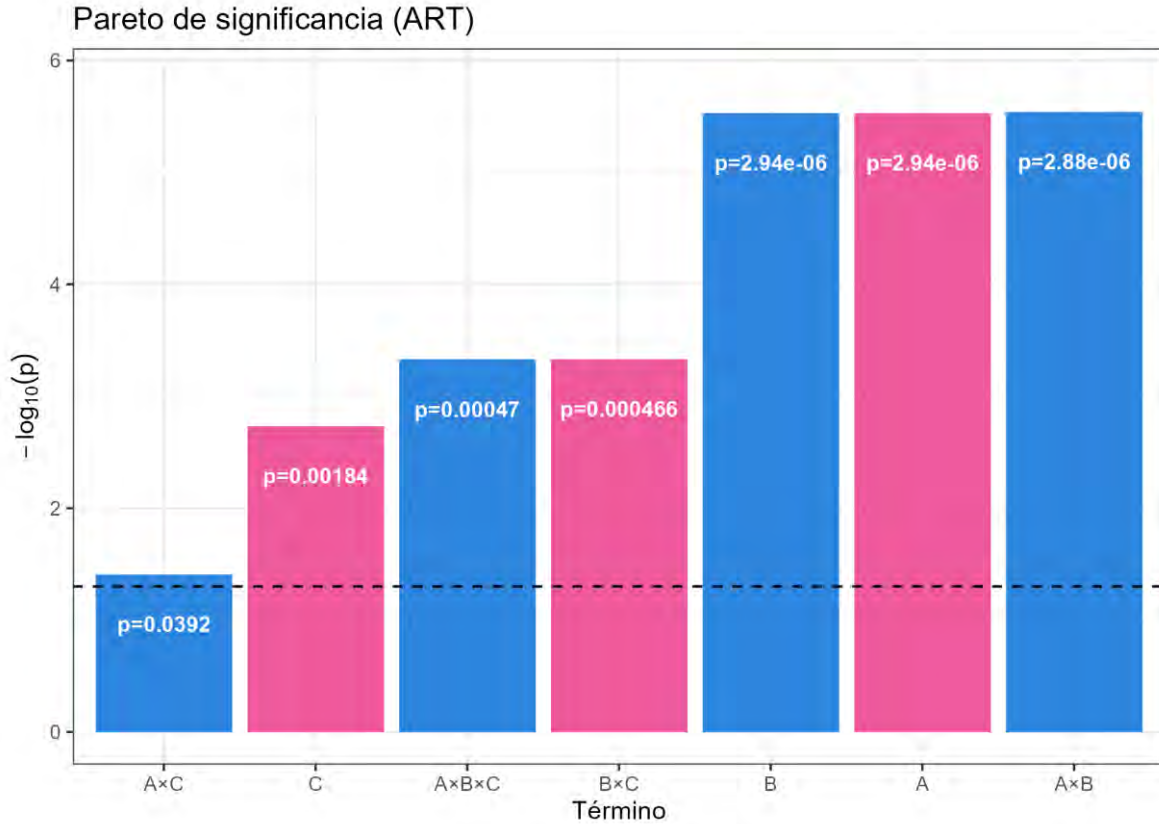


Figura 16 Diagrama de Pareto de efectos

3.5.6 Efectos simples

Factor A

La incidencia de la relación molar alcohol:aceite se expone en la Figura 19. En este caso, el eje horizontal detalla los dos niveles que corresponden a la relación 15:1 y 24:1, respectivamente, y el vertical concierne a la media alineada de la respuesta. Como es posible observar, hay un evidente aumento en la media alineada cuando pasa de 15:1 a 24:1, demostrando que un incremento en la relación molar conlleva un efecto positivo significativo en el rendimiento de biodiésel. Y pese a que las barras de error exhiben la dispersión de los datos de cada nivel, la diferencia entre ambas es evidente, corroborando así la incidencia de A en la respuesta.

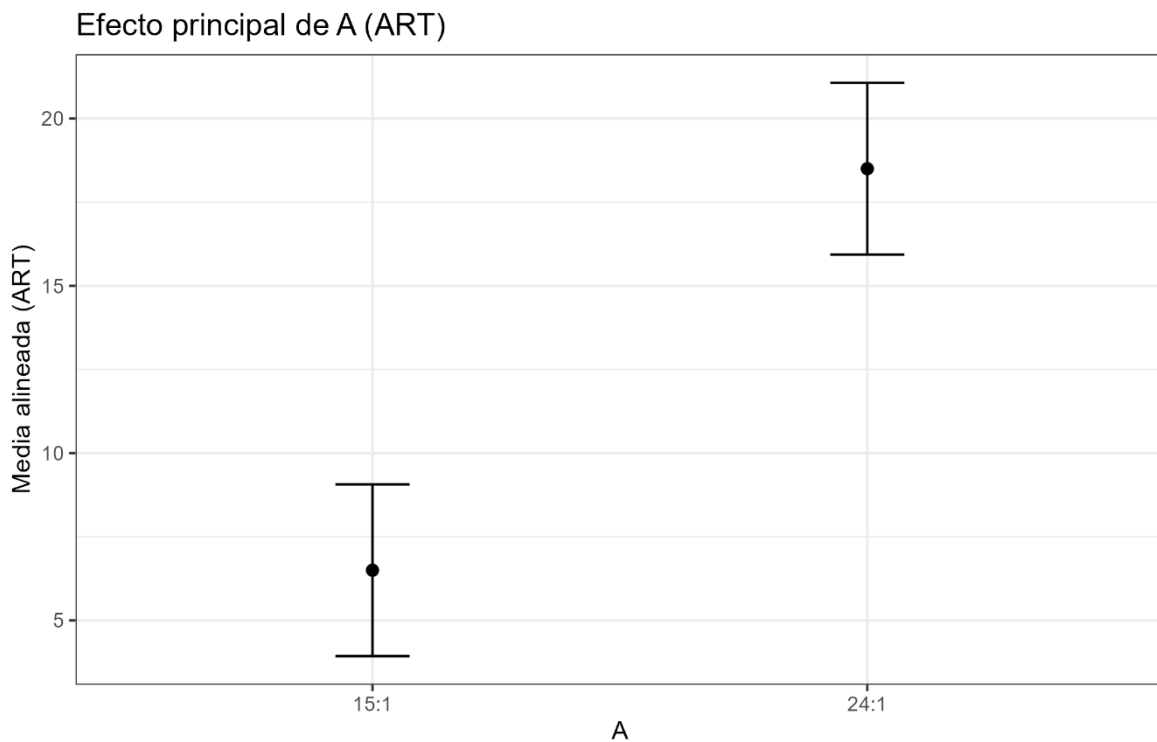


Figura 17 Efecto principal de la relación molar alcohol:aceite

Factor B

La influencia del porcentaje en peso del catalizador se expone en la Figura 20. El eje horizontal detalla los dos niveles, 3% y 6 %, y el eje vertical consiste en la media alineada de la respuesta. En este caso, se visualiza un aumento de la media alineada cuando incrementa del 3% al 6 %, hecho que demuestra que a medida que el porcentaje de catalizador aumenta, el rendimiento del biodiesel se favorece. Si bien las barras de error exponen la variabilidad experimental, la diferencia de los dos niveles indica que B tiene una incidencia positiva y directa en la transesterificación.

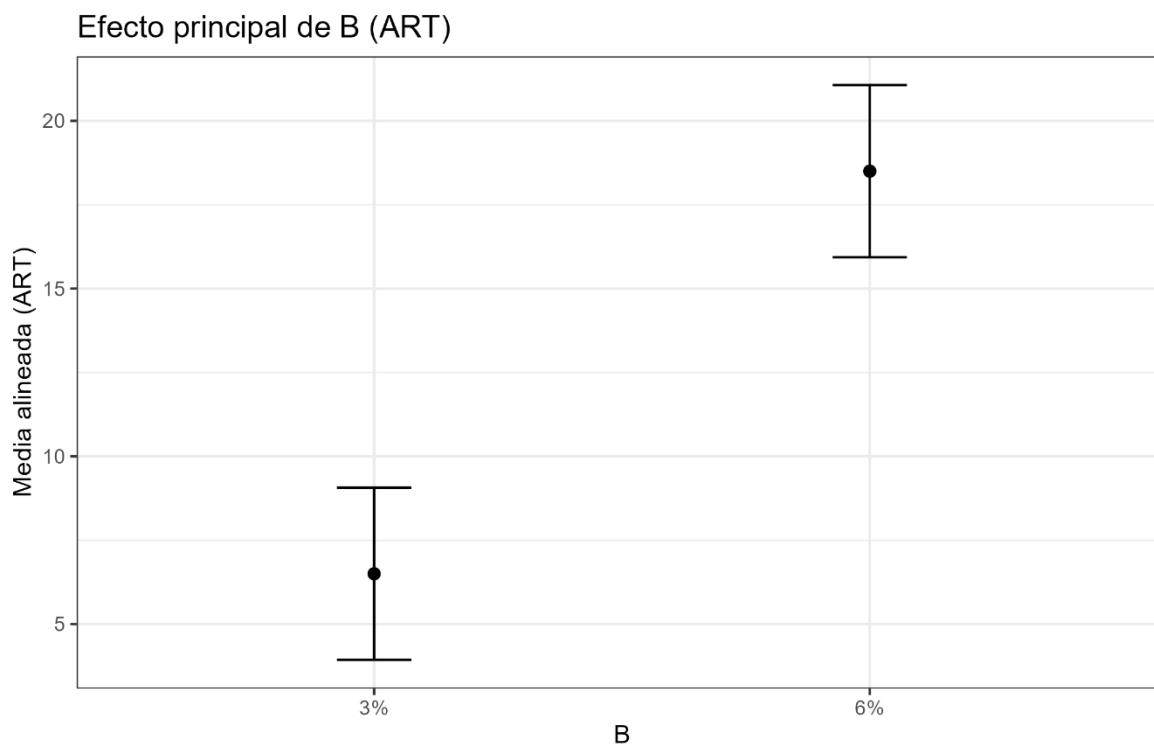


Figura 18 Efecto del porcentaje en peso del catalizador

Factor C

En lo que respecta al tiempo de reacción, el eje horizontal toma en cuenta 1 h y 3 h. En el eje vertical se expone la media alineada, la cual es mayor a 1 h, pero baja progresivamente al acercarse a 3 h, hecho que demuestra que un rango mayor no incide en el rendimiento de biodiésel. Si bien las barras de error indican la variabilidad experimental, hay una evidente tendencia descendente en los dos niveles, lo que en otras palabras implica que un aumento desmesurado del tiempo de reacción posiblemente tenga relación con efectos no deseados como, por ejemplo, subproductos que obstaculizan la formación de ésteres metílicos.

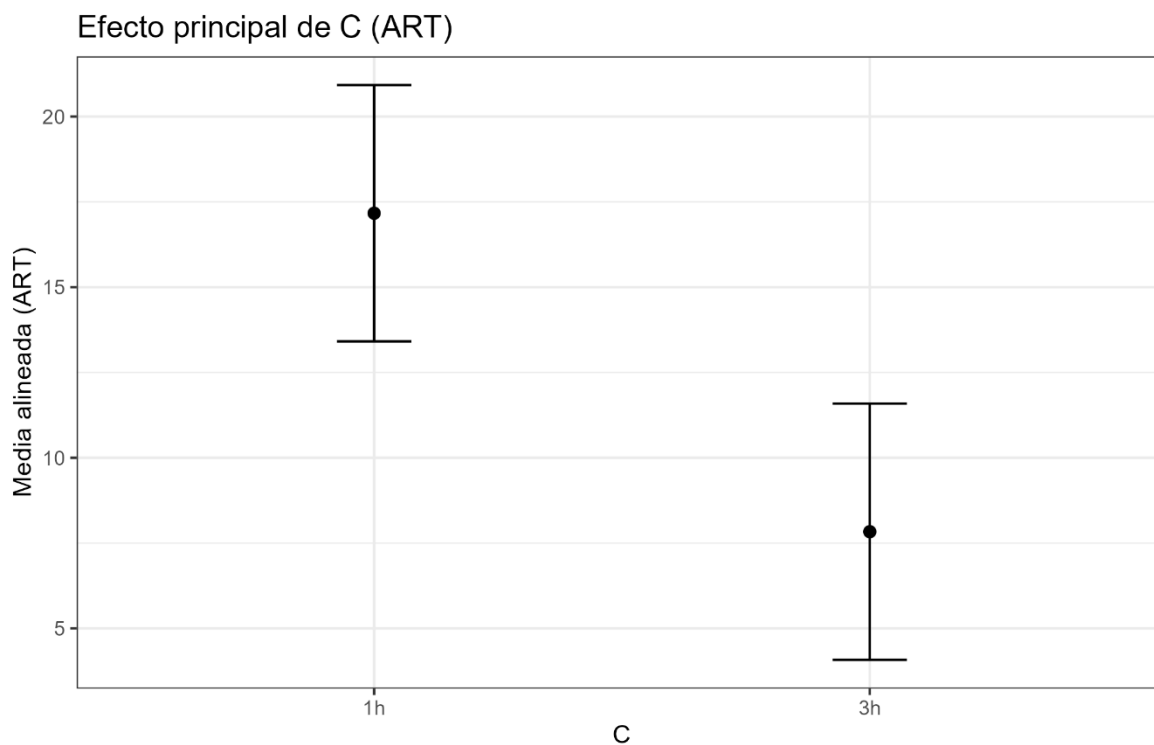


Figura 19 Efecto del tiempo de la reacción

3.5.7 Efectos de las interacciones

Interacción A*B

En este caso, la Figura 22 expone un notable cruce entre las líneas, es decir que hay presencia de una intersección significativa entre las dos variables. En una relación molar baja de 15:1, el incremento del catalizador de 3 % a 6 % aumenta la respuesta, pero ante la relación 24:1, el comportamiento es inverso, alcanzando mayor respuesta en el 3 % de catalizador y una reducción con el 6 %. Esta dinámica deja por sentado que el efecto de B varía según A y, por ende, ambos actúan interdependientemente en el rendimiento del biodiésel.

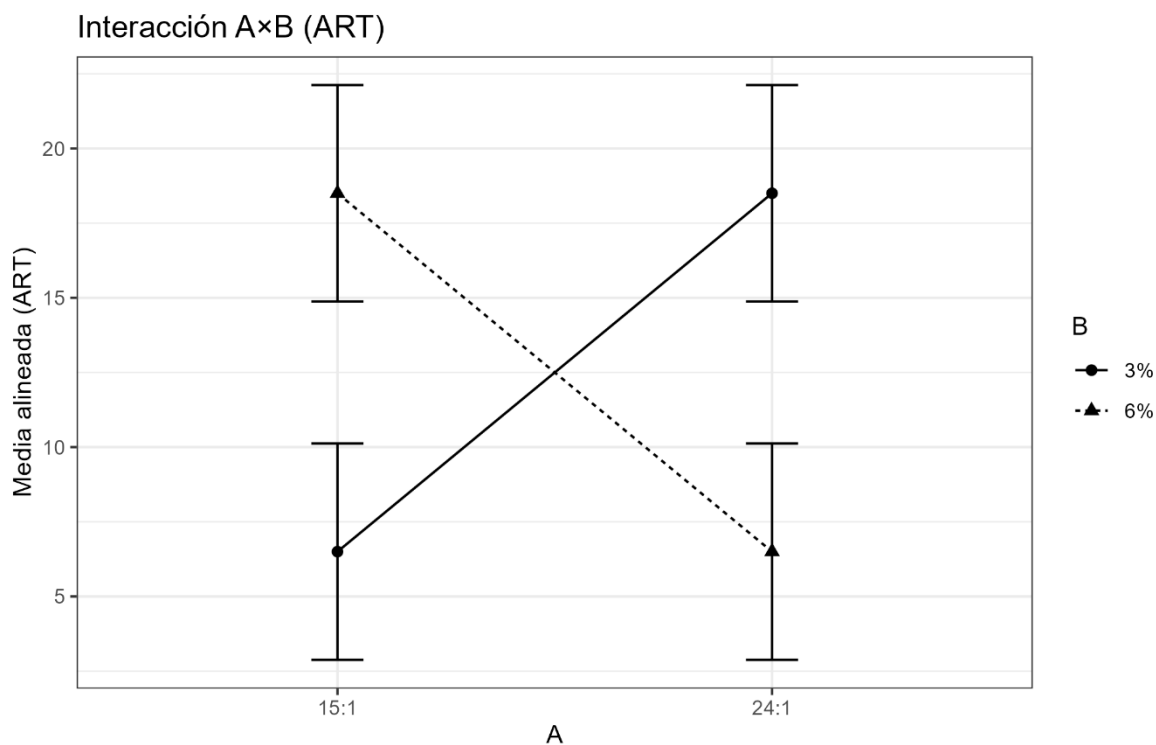


Figura 20 Interacción A*B (relación molar alcohol:aceite y porcentaje en peso del catalizador)

Interacción A*C

A continuación, la Figura 23 expone que hay una interacción significativa de ambos factores: ante la relación molar 15:1, el aumento del tiempo de 1 h a 3 h reduce la respuesta, pero frente a la relación molar 24:1, un mayor tiempo dilata la media alineada. En definitiva, este comportamiento indica que el efecto del tiempo de reacción está dado en función de la relación molar alcohol:aceite, de tal modo que ambos elementos inciden conjuntamente y no de manera independiente.

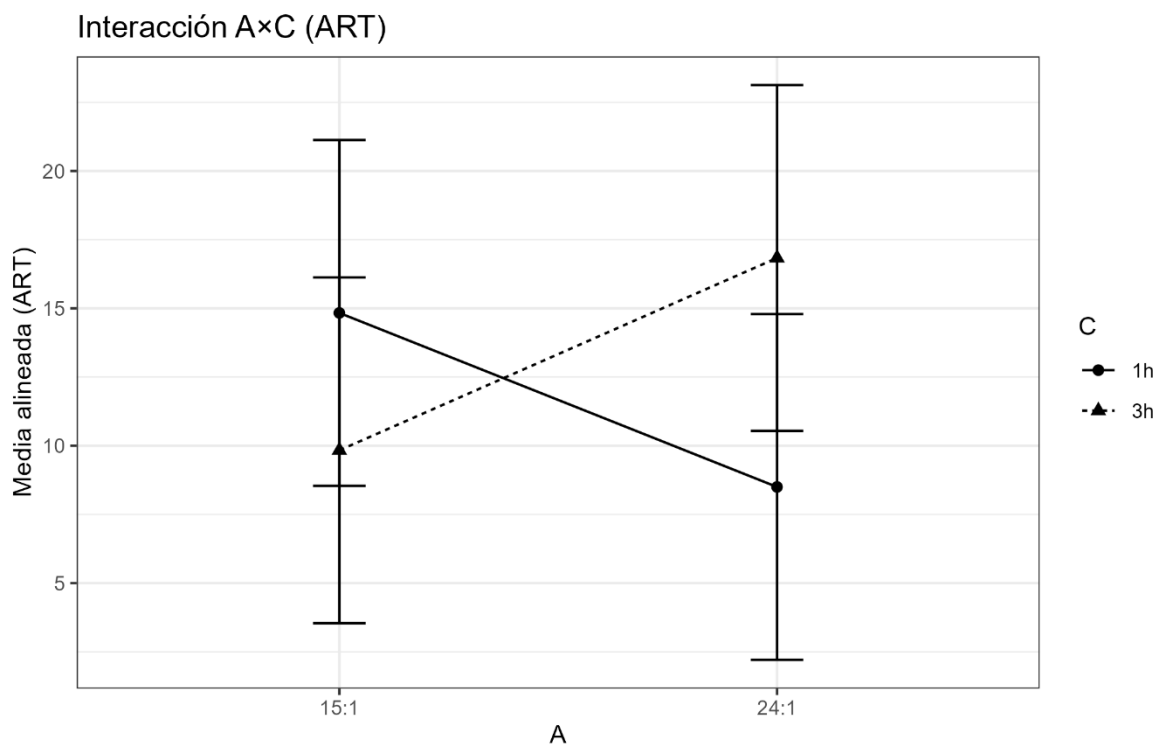


Figura 21 Interacción A*C (relación molar alcohol:aceite y tiempo de la reacción)

Interacción B*C

La Figura 23 denota un cruce claro entre las líneas, lo que indica una interacción significativa de los dos factores. En ese sentido, con un nivel de catalizador del 3 %, el aumento de 1 h a 3 h en el tiempo de reacción incrementa la respuesta, pero ante un nivel del 6 % hay una reducción de la media alineada. Este escenario evidencia que el efecto de C está dado en función de B y, por ende, las dos variables inciden conjuntamente y no de manera independiente en el rendimiento del biodiésel.

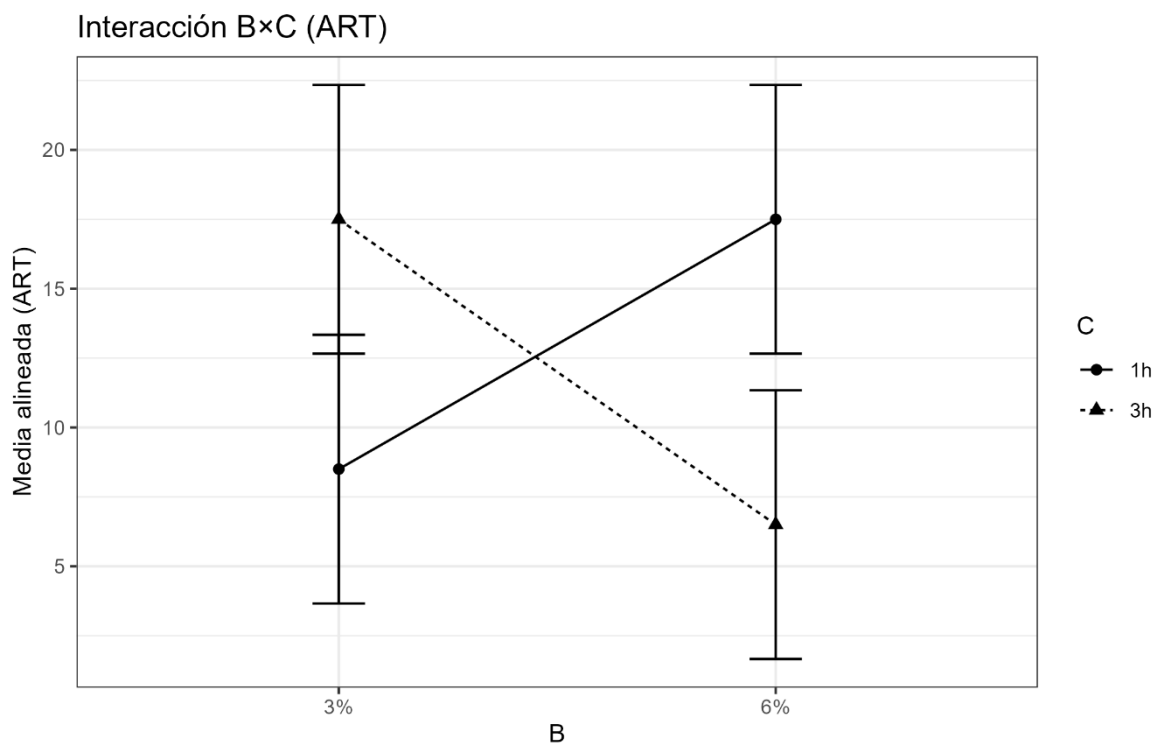


Figura 22 Interacción B*C (porcentaje en peso del catalizador y tiempo de la reacción)

Interacción A*B*C

Esta triple interacción de las variables se explica en la Figura 25. El comportamiento varía de acuerdo con el tiempo de reacción: en 1 h, el efecto de B depende de A, pues sus niveles aumentan cuando la relación molar fluctúa de 15:1 a 24:1. En cambio, en 3 h hay un patrón inverso, pues al aumentar A se cambia significativamente la respuesta según el nivel de catalizador usado. Este comportamiento en ambos tiempos de reacción deja por sentado que la incidencia de cada factor es interdependiente, pues está dada por los otros dos factores, lo que corrobora una interacción significativa A*B*C sobre el rendimiento.

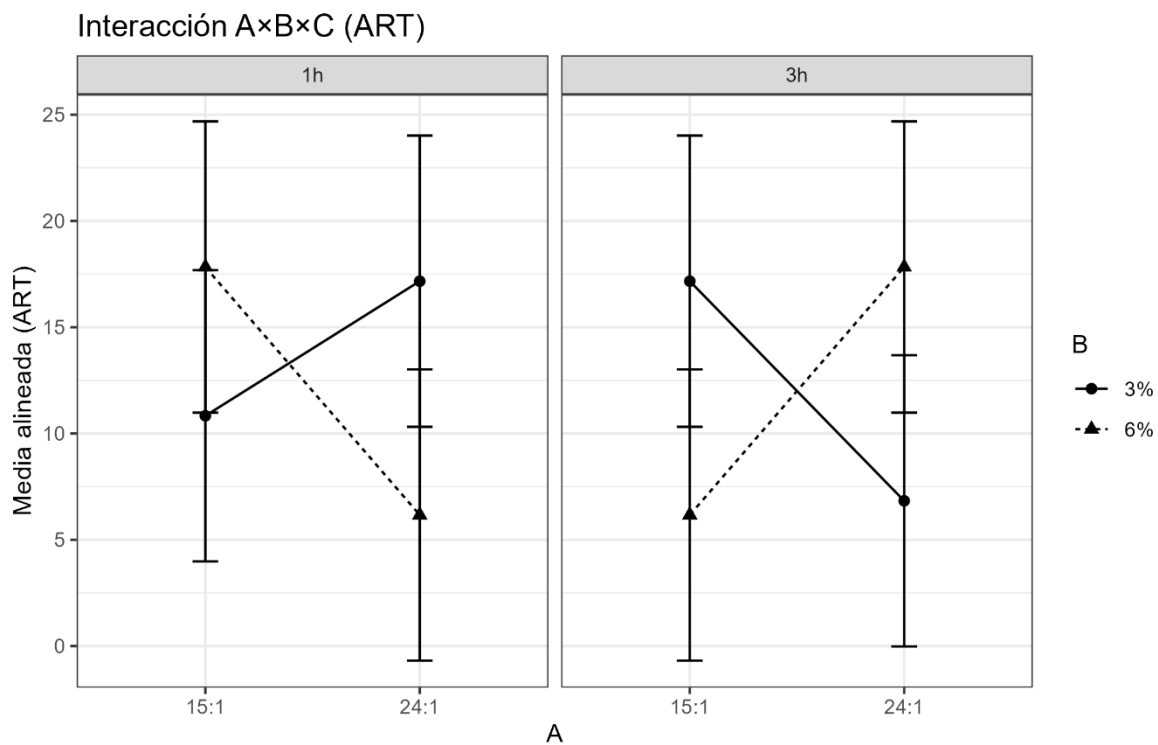


Figura 23 Interacción A*B*C (relación molar alcohol:aceite, porcentaje en peso del catalizador y tiempo de la reacción)

3.5.8 Cubo de respuesta

Como lo demuestra la Figura 26, los valores más altos de rendimiento se logran al momento en que A y B también tienen sus mayores niveles, tomando en cuenta que apenas 1 h es necesaria para potenciar la respuesta del sistema. En función de ello, el exceso de alcohol (24:1) y una mayor cantidad de catalizador inciden en la rapidez para formar metóxido en los sitios activos y dar cabida a una eficiente transesterificación. Cabe acotar nuevamente que un tiempo de 3 h no ocasiona aumentos significativos en el rendimiento.

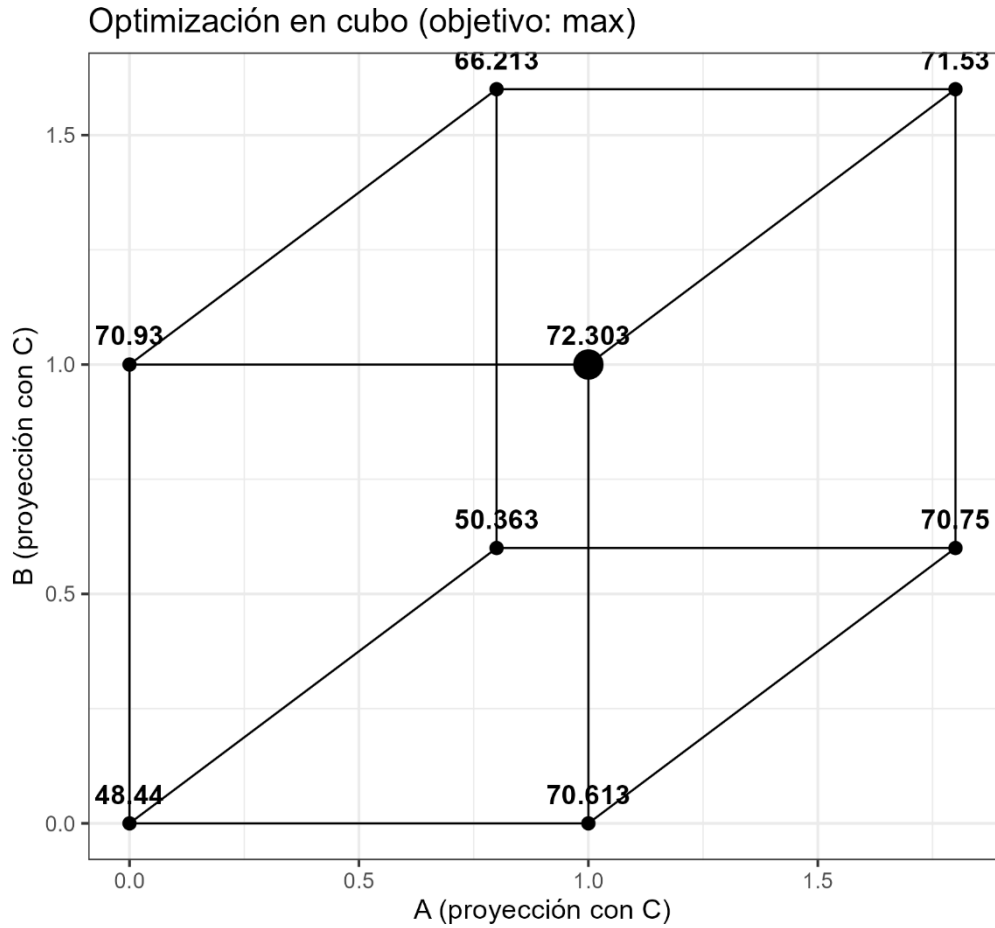


Figura 24 Proyección cúbica de los efectos de A, B y C sobre la respuesta del proceso

3.5.9 Recomendación óptima

Como recomendación final, la Tabla 15 presenta los datos. El rendimiento se logró en 72 unidades, siendo esta la configuración óptima del sistema.

Tabla 15 Recomendación óptima de los factores

A	B	C
+	+	-

ANÁLISIS DE RESULTADOS

La manera en que reaccionó el proceso de transesterificación tuvo que interpretarse partiendo de un diseño factorial 2^3 replicado con el fin de establecer con exactitud aquellos factores que inciden en el rendimiento del biodiésel. En ese sentido, del análisis estadístico se desprende que la relación molar alcohol:aceite (A) y el porcentaje en peso del catalizador (B) son los elementos de mayor influencia, hecho que tiene concordancia con el diagrama de Pareto producto de la transformación ART, además que la interacción A*B tiene significancia estadística, lo que implica que las dos variables actúan de manera conjunta para modular el comportamiento del sistema. En cuanto al tiempo de reacción (C), no tuvo una alta influencia individual, pero sí un importante efecto en la interacción A*C, B*C y A*B*C, corroborando que los tres elementos inciden simultáneamente en la producción de biodiésel.

Cabe acotar que los valores de rendimiento utilizados en el balance de la materia y en las réplicas del diseño son aquellos posteriores a las operaciones de separación, en vista de que en la etapa experimental se dio especial importancia a que el biodiésel transite por una fase casualmente limpia, libre de turbidez y glicerol. Por ende, un porcentaje de biodiésel recuperable tuvo que descartarse en conjunto con las interfases o, en su defecto, ser retenido al momento de la separación. Ello explica por qué los rendimientos tienen valores bajos y no evidencian falla alguna en el sistema.

En lo que concierne a los diagnósticos estadísticos, se demuestra el incumplimiento del supuesto de normalidad y, por esa razón, el análisis estuvo sustentado en métodos no paramétricos. Específicamente, la prueba de Shapiro-Wilk empleada con los residuos dio como resultado un estadístico $p=0,000054$, por debajo del nivel de significancia ($\alpha=0,84$), lo que sugiere la posibilidad de que haya una autocorrelación positiva en los residuos. Ello justifica la necesidad de emplear la ART con el fin de evaluar adecuadamente los principales efectos y las interacciones entre las variables, pero siempre conservando la validez inferencial del análisis.

Paralelamente, la interpretación integral de los efectos y del cubo de optimización fueron claves para demostrar que el comportamiento del sistema está dado a partir del proceso de formación del ion metóxido que surge en los lugares activos de la cal sodada (B) ante el

exceso de alcohol (A). Frente a estas circunstancias, la formación del metóxido es eficiente y tiene una participación activa en la transesterificación. Además, el tiempo de reacción (C) aporta a la cinética, siendo una hora lo necesario para lograr el más alto rendimiento al momento en que A y B están en niveles adecuados, pues un tiempo más alto no brinda alguna ventaja significativa.

En cuanto a establecer el lote óptimo, fue un proceso que se apoyó en los resultados del diseño factorial, pero también en técnicas de análisis con más precisión, que en este caso corresponden a la curva de calibración por FTIR y a la resonancia magnética nuclear (RMN), que en conjunto aportaron a cuantificar la conversión real de los ésteres metílicos. Los resultados de las técnicas son concordantes con lo identificado en el análisis estadístico no paramétrico, hecho que corrobora su validez, y el balance de materia también demostró la coherencia de la transesterificación, siendo los cierres de masa satisfactorios y alcanzando pérdidas menores al 3 %, valores que indican cuán consistente es el sistema heterogéneo.

Al analizar las propiedades fisicoquímicas del aceite de coyol se demostró que es un elemento idóneo como materia prima, resaltando su índice de saponificación de 167.7 mg KOH/g, el índice de yodo de 22.66 gI₂/100 g y un poder calorífico de 38.16 MJ/kg, lo que a su vez refleja la primacía de los ácidos grasos con baja insaturación. Y tras la transesterificación, el biodiésel alcanzó una concentración de ésteres metílicos del 99.5 %, porcentaje obtenido de la curva de calibración y validado por la resonancia magnética nuclear al notar 3.67 ppm como señal de los protones del grupo metoxi (-OCH₃) y 2.30 ppm de los protones metileno α 1 grupo carbonilo (-CH₂-COO-). Los valores corroboran la efectividad de la conversión triglicéridos-ésteres metílicos.

Por último, tras una correcta extracción se obtuvo un lote de casi 1700 mL de biodiésel, el cual fue utilizado para caracterizar con relación a los valores establecidos por la norma ASTM D6751. De manera específica, los resultados fueron los siguientes, los cuales estuvieron en el rango que establece la norma para cada uno: viscosidad cinemática, 3.07 mm²/s; índice de acidez, 0,30 mg KOH/g; estabilidad oxidativa, 11.56 h; punto de nublamiento, -1 °C; punto de inflamación, 105 °C; corrosión de tira de cobre, 1 b; temperatura de destilación al vacío, 202.9 °C al 90 % destilado. Vale acotar que la desviación en el

contenido de agua y sedimentos es atribuida sobre todo al tipo de catalizador heterogéneo, constituyéndose en un elemento de oportunidad a tomar en cuenta en la fase de purificación.

En síntesis, el rendimiento del biodiésel está dado por la interacción de todas las variables, no por influencias aisladas. De ahí que los resultados estadísticos, la curva de calibración FTIR, la RMN y el balance de materia demostraron la conversión a ésteres metílicos; además, el biodiésel procesado cumple con la norma ASTM D6751, siendo así el sistema totalmente viable.

CONCLUSIONES

- La extracción por el método Soxhlet obtuvo un contenido de aceite de 44.64 %. La caracterización realizada corresponde a un aceite con propiedades que le permiten ser transformado a un éster metílico.
- La prueba de cromatografía obtuvo el perfil de ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) presentes en el aceite de coyol.: metil hexanoato, 5.33 %; metil decanoato, 34.87 %; metil laureato, 33.95 %; metil miristoleato, 15.53 %; metil palmitoleato, 7.89 %; metil oleato, 2.44 %. En consecuencia, el aceite de coyol esta predominado por los ácidos grasos cáprico, láurico y miristoleico.
- El diseño factorial 2^3 fue de gran utilidad para encontrar las variables que afectan la reacción de transesterificación y para obtener el conjunto de niveles óptimos de cada una: A) relación molar alcohol:aceite; B) porcentaje en peso del catalizador; C) tiempo de la reacción. De esa manera, se aseguró un rendimiento del 72 %.
- Una vez obtenido el lote de aproximadamente 1700 mL de biodiésel con las condiciones óptimas identificadas por el diseño estadístico 2^3 , se realizaron las pruebas de caracterización que respaldan el cumplimiento de la norma ASTM D-6751, lo que garantiza la calidad.
- Los resultados estadísticos mostraron que el experimento no cumple con el supuesto de normalidad y, en consecuencia, las hipótesis H_0 y H_a fueron evaluadas mediante el enfoque no normal. Por ende, tomando en cuenta que $p < 0.005$, se rechazan las hipótesis nulas y se aceptan las hipótesis alternas para los tres factores (A, B, C), lo que corrobora que el rendimiento del biodiésel depende de la acción conjunta de las variables, aun bajo condiciones de no normalidad.
- Los resultados estadísticos mostraron que el experimento no cumple con el supuesto de normalidad y en consecuencia, las hipótesis H_0 y H_a fueron evaluadas mediante el enfoque no normal, por lo que en base a la significación menos a $p < 0.005$ se rechazan las hipótesis nulas y se aceptan las hipótesis alternas para los tres factores A, B, C, confirmando que el rendimiento del biodiésel depende de la acción conjunta de las variables aún bajo condiciones de no normalidad.

REFERENCIAS

- Acevedo-Quiroz, A., Carrera-Avendaño, E., Acevedo-Quiroz, N., Alvarez-Gutiérrez, P., Borunda, M. y Adam-Medina, M. (2024). Experimental Study on Biodiesel Production in a Continuous Tubular Reactor with a Static Mixer. *Processes*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/pr12122859>
- Adhitiyan, T., Sampath, S., Sathya, S., Jayakumar, J. y Vignesh, Mm. (2024). Performance of Chemical Catalyst in the Production of biodiesel from Renewable Resource: A Review. *Indian Chemical Engineer*, 67(3), 313-349. <https://doi.org/10.1080/00194506.2024.2398496>
- Aguilar-Aguilar, F., Mena-Cervantes, V. y Hernández-Altamirano, R. (2025). Analysis of Public Policies and Resources for Biodiesel Production in México. *Biomass and Bioenergy*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107762>
- Aguilar-Aguilar, F., Mena-Cervantes, V., García-Solares, S. y Hernández-Altamirano, R. (2024). Exploring the Biorefinery Potential of *Acrocomia aculeata*: A Native Mexican Palm for Sustainable Resource Valorization. *Waste And Biomass Valorization*, 15(6), 3425-3439. <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02385-0>
- Ahmed, S. (2024). Research Methodology Simplified: How to Choose the Right Sampling Technique and Determine the Appropriate Sample Size for Research. *Oral Oncology Reports*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.oor.2024.100662>
- Anil, N., Rao, P., Sarkar, A., Kubavat, J., Vadivel, S., Manwar, N. y Paul, B. (2024). Advancements in Sustainable Biodiesel Production: A Comprehensive Review of Bio-Waste Derived Catalysts. *Energy Conversion and Management*, 318. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118884>
- Atadashi, I., Aroua, M., Aziz, A. y Sulaiman, N. (2013). The Effects of Catalysts in Biodiesel Production: A Review. *Journal Of Industrial And Engineering Chemistry*, 19(1), 14-26. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2012.07.009>
- Basumatary, S., Brahma, S., Hoque, M., Das, B., Selvaraj, M., Brahma, S. y Basumatary, S. (2023). Advances in CaO-Based Catalysts for Sustainable Biodiesel Synthesis. *Green Energy and Resources*, 1(3). <https://doi.org/10.1016/j.gerr.2023.100032>
- Berrios, M., Gutiérrez, M., Martín, M. y Martín, A. (2009). Application of the Factorial Design of Experiments to Biodiesel Production from Lard. *Fuel Processing Technology*, 90(12), 1447-1451. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.06.026>
- Berrios, M., Siles, J., Martin, M. y Martin, A. (2007). A Kinetic Study of the Esterification of Free Fatty Acids (FFA) in Sunflower Oil. *Fuel*, 86(15), 2383-2388. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.02.002>
- Boyd, R., Powney, G. y Pescott, O. (2023). We Need to Talk About Nonprobability Samples. *Trends in Ecology & Evolution*, 38(6), 521-531. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2023.01.001>

- De Paula, G., Eid, J., Rocha, L. y Cardoso, D. (2024). Understanding the Reaction Dynamics of Glycerol Conversion into Glycerol Carbonate by Transesterification of Carbonic Acid Esters Over CaO. *Catalysis Today*, 442. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2024.114953>
- Díaz-Fuentes, V., Avendaño-Arrazate, C., Gálvez-Marroquín, L., Ruíz-Cruz, P., Iracheta-Donjuán, L., Nájera-Domínguez, W. y Martínez-Valencia, B. (2019). Caracterización morfoagronómica de coyol (*Acrocomia aculeata* Jacq.) para determinar su potencial productivo de aceite para biodiésel. *Agro Productividad*, 12(3). <https://doi.org/10.32854/agrop.v0i0.1323>
- Einav, S. y O'Connor, M. (2019). P-Values and Significance: The Null Hypothesis that They are Not Related is Correct. *Journal Of Critical Care*, 54, 159-162. <https://doi.org/10.1016/j.jcrc.2019.08.020>
- Emmert-Streib, F. (2024). Trends in Null Hypothesis Significance Testing: Still Going Strong. *Heliyon*, 10(21). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40133>
- Encinar, J., Sánchez, N., Martínez, G. t García, L. (2011). Study of Biodiesel Production from Animal Fats with High Free Fatty Acid Content. *Bioresource Technology*, 102(23), 10907-10914. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.068>
- Farouk, S., Tayeb, A., Abdel-Hamid, S. y Osman, R. (2024). Recent Advances in Transesterification for Sustainable Biodiesel Production, Challenges, and Prospects: A Comprehensive Review. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(9), 12722-12747. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32027-4>
- Freedman, B., Butterfield, R. y Pryde, E. (1986). Transesterification Kinetics Of Soybean Oil. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 63(10), 1375-1380. <https://doi.org/10.1007/bf02679606>
- Gadore, V., Mishra, S., Yadav, N., Yadav, G. y Ahmaruzzaman, M. (2023). Metal Oxide-Based Heterogeneous Catalysts for Biodiesel Production. *Next Sustainability*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2023.100012>
- Galloway, A. (2005). Non-Probability Sampling. En K. Kempf-Leonard (Ed.), *Encyclopedia of Social Measurement* (Vol. 2, pp. 859-864). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b0-12-369398-5/00382-0>
- Gastwirth, J., Gel, Y. y Miao, W. (2009). The Impact of Levene's Test of Equality of Variances on Statistical Theory and Practice. *Statistical Science*, 24(3). <https://doi.org/10.1214/09-sts301>
- Granados, M., Alba-Rubio, A., Vila, F., Alonso, D. y Mariscal, R. (2010). Surface Chemical Promotion Of Ca Oxide Catalysts in Biodiesel Production Reaction by the Addition of Monoglycerides, Diglycerides and Glycerol. *Journal Of Catalysis*, 276(2), 229-236. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2010.09.016>
- International Energy Agency [IEA]. (2024). *World Energy Outlook 2024*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024/executive-summary?language=es>
- Jarque, C. y Bera, A. (1980). Efficient Tests for Normality, Homoscedasticity and Serial Independence of Regression Residuals. *Economics Letters*, 6(3), 255-259. [https://doi.org/10.1016/0165-1765\(80\)90024-5](https://doi.org/10.1016/0165-1765(80)90024-5)
- Kamenik, J. y Szewc, M. (2023). Null Hypothesis Test for Anomaly Detection. *Physics Letters B*, 840. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2023.137836>

- Kılıç, M., Uzun, B., Pütün, E. y Pütün, A. (2013). Optimization of Biodiesel Production from Castor Oil Using Factorial Design. *Fuel Processing Technology*, *111*, 105-110. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.05.032>
- Kouider, S., Asikin-Mijan, N., Alsultan, A., Kaddour, O., Yusop, Mimoun, H., Samidin, S., Mansir, N. y Taufiq-Yap, Y. (2024). Optimization of the Activity of Mo7-Zn3/CaO Catalyst in the Transesterification of Waste Cooking Oil into Sustainable Biodiesel Via Response Surface Methodology. *Energy Conversion And Management*, *303*. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118185>
- Kouzu, M. y Hidaka, J. (2011). Transesterification of Vegetable Oil into Biodiesel Catalyzed by CaO: A review. *Fuel*, *93*, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.015>
- Kouzu, M., Kasuno, T., Tajika, M., Yamanaka, S., & Hidaka, J. (2007). Active phase of calcium oxide used as solid base catalyst for transesterification of soybean oil with refluxing methanol. *Applied Catalysis A General*, *334*(1-2), 357-365. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2007.10.023>
- Leung, D., Wu, X. y Leung, M. (2009). A Review on Biodiesel Production Using Catalyzed Transesterification. *Applied Energy*, *87*(4), 1083-1095. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.006>
- Levenspiel, O. (1998). *Chemical Reaction Engineering*. John Wiley & Sons.
- Liu, X., He, H., Wang, Y., Zhu, S. y Piao, X. (2008). Transesterification of Soybean Oil to Biodiesel Using CaO as a Solid Base Catalyst. *Fuel*, *87*(2), 216-221. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.04.013>
- Livingston, E. (2004). The Mean and Standard Deviation: What Does It All Mean? *Journal of Surgical Research*, *119*(2), 117-123. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2004.02.008>
- Ma, F. y Hanna, M. (1999). Biodiesel Production: a Review. *Bioresource Technology*, *70*(1), 1-15. [https://doi.org/10.1016/s0960-8524\(99\)00025-5](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(99)00025-5)
- Maafa, I. M., Alahl, A., El-Magied, M., Cui, X. y Dhmees, A. (2024). Eco-Friendly Self-Terminated Process for Preparation of CaO Catalyst Based on Chitosan Production Wastes for Biodiesel Production. *Journal of Materials Research and Technology*, *30*, 1217-1227. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.03.091>
- Macheli, L., Malefane, M. y Jewell, L. (2025). Waste-Derived Calcium Oxide Catalysts in Biodiesel Production: Exploring Various Waste Sources, Deactivation Challenges, and Improvement Strategies. *Bioresource Technology Reports*, *29*. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102021>
- Maheshwari, P., Haider, M., Yusuf, M., Klemeš, J., Bokhari, A., Beg, M., Al-Othman, A., Kumar, R. y Jaiswal, A. (2022). A Review on Latest Trends in Cleaner Biodiesel Production: Role of Feedstock, Production Methods, and Catalysts. *Journal of Cleaner Production*, *355*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131588>
- Marinković, D., Stanković, M., Veličković, A., Avramović, J., Miladinović, M., Stamenković, O., Veljković, V. y Jovanović, D. (2015). Calcium Oxide as a Promising Heterogeneous Catalyst for Biodiesel Production: Current State and Perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *56*, 1387-1408. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.007>

- Martínez, B., Díaz, V. y Ruíz, P. (2020). Calidad de aceite de pulpa de *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Mart: alternativa para la producción de biodiésel en México. *Agro Productividad*, 13(1). <https://doi.org/10.32854/agrop.vi0.1571>
- Mazaheri, H., Ong, H., Amini, Z., Masjuki, H., Mofijur, M., Su, C., Badruddin, I. y Khan, T. (2021). An Overview of Biodiesel Production via Calcium Oxide Based Catalysts: Current State and Perspective. *Energies*, 14(13). <https://doi.org/10.3390/en14133950>
- Montgomery, D. (2017). *Design and Analysis of Experiments*. Wiley.
- Mulyatun, M., Prameswari, J., Istadi, I. y Widayat, W. (2021). Production of Non-Food Feedstock Based Biodiesel Using Acid-Base Bifunctional Heterogeneous Catalysts: A review. *Fuel*, 314. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122749>
- Musa, I. (2016). The Effects of Alcohol to Oil Molar Ratios and the Type of Alcohol on Biodiesel Production Using Transesterification Process. *Egyptian Journal of Petroleum*, 25(1), 21-31. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.06.007>
- Muscat, A., de Olde, E., de Boer, I. y Ripoll-Bosch, R. (2019). The Battle for Biomass: A Systematic Review of Food-Feed-Fuel Competition. *Global Food Security*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100330>
- Naseef, H. y Tulaimat, R. (2025). Transesterification and Esterification for Biodiesel Production: A Comprehensive Review of Catalysts and Palm Oil Feedstocks. *Energy Conversion and Management X*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100931>
- Ooi, H., Koh, X., Ong, H., Lee, H., Mastuli, M., Taufiq-Yap, Y., Alharthi, F., Alghamdi, A. y Mijan, N. (2021). Progress on Modified Calcium Oxide Derived Waste-Shell Catalysts for Biodiesel Production. *Catalysts*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/catal11020194>
- Orege, J., Oderinde, O., Kifle, G., Ibikunle, A., Raheem, S., Ejeromedoghene, O., Okeke, E., Olukowi, O., Orege, O., Fagbohun, E., Ogundipe, T., Avor, E., Ajayi, O. y Daramola, M. (2022). Recent Advances in Heterogeneous Catalysis for Green Biodiesel Production by Transesterification. *Energy Conversion And Management*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115406>
- Osman, A., Nasr, M., Farghali, M., Rashwan, A., Abdelkader, A., Al-Muhtaseb, A., Ihara, I. y Rooney, D. (2024). Optimizing Biodiesel Production from Waste with Computational Chemistry, Machine Learning and Policy Insights: A Review. *Environmental Chemistry Letters*, 22(3), 1005-1071. <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01700-y>
- Purnama, I., Mutamima, A., Aziz, M., Wijaya, K., Maulida, I., Junaidi, J., Sari, K., Effendi, I. y Dini, I. (2025). Environmental Impacts and the Food vs. Fuel Debate: A Critical Review of Palm Oil as Biodiesel. *GCB Bioenergy*, 17(6). <https://doi.org/10.1111/gcbb.70043>
- Secretaría de Energía. (2025). *Balance Nacional de energía 2023*. Gobierno de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/977268/Balance_Nacional_de_Energ_a_2023.FIN_AL06.02.2025.1.pdf
- Silva, G., Camargo, F. y Ferreira, A. (2011). Application of Response Surface Methodology for Optimization of Biodiesel Production by Transesterification of Soybean Oil with Ethanol. *Fuel Processing Technology*, 92(3), 407-413. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.10.002>

- Soria-Figueroa, E., Mena-Cervantes, V., García-Solares, M., Hernández-Altamirano, R. y Vazquez-Arenas, J. (2020). Statistical Optimization of Biodiesel Production from Waste Cooking Oil Using Cao as Catalyst in a Robinson-Mahoney Type Reactor. *Fuel*, 282. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118853>
- Sosa-Rodríguez, F. y Vazquez-Arenas, J. (2021). The Biodiesel Market in Mexico: Challenges and Perspectives to Overcome in Latin-American Countries. *Energy Conversion And Management X*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100149>
- Szkudlarek, Ł., Chałupka-Śpiewak, K., Maniukiewicz, W., Nowosielska, M., Albińska, J., Szykowska-Jóźwik, M. y Mierczyński, P. (2024). CaO Catalysts Supported on ZSM-5 Zeolite for Biodiesel Production Via Transesterification of Rapeseed Oil. *Applied Catalysis O: Open*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.apcato.2024.206999>
- Veljković, V., Biberdžić, M., Banković-Ilić, I., Djalović, I., Tasić, M., Nježić, Z. y Stamenković, O. (2018). Biodiesel Production from Corn Oil: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 531-548. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.024>
- Verziu, M., Coman, S., Richards, R. y Parvulescu, V. (2011). Transesterification of Vegetable Oils Over CaO Catalysts. *Catalysis Today*, 167(1), 64-70. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2010.12.031>
- Vicente, G., Coteron, A., Martinez, M. y Aracil, J. (1998). Application of the Factorial Design of Experiments and Response Surface Methodology to Optimize Biodiesel Production. *Industrial Crops and Products*, 8(1), 29-35. [https://doi.org/10.1016/s0926-6690\(97\)10003-6](https://doi.org/10.1016/s0926-6690(97)10003-6)
- Vicente, G., Martínez, M. y Aracil, J. (2003). Integrated Biodiesel Production: A Comparison of Different Homogeneous Catalysts Systems. *Bioresource Technology*, 92(3), 297-305. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.08.014>
- Vilas Bôas, R. y Mendes, M. (2022). A Review of Biodiesel Production from Non-Edible Raw Materials Using the Transesterification Process with a Focus on Influence of Feedstock Composition and Free Fatty Acids. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 67(1), 5433-5444. <https://doi.org/10.4067/s0717-97072022000105433>
- Wahyudi, A., Kurniawan, W. y Hinode, H. (2017). Utilization of Modified Red Mud as a Heterogeneous Base Catalyst for Transesterification of Canola Oil. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 50(7), 561-567. <https://doi.org/10.1252/jcej.16we337>
- Wen, G., Yan, Z., Smith, M., Zhang, P. y Wen, B. (2010). Kalsilite Based Heterogeneous Catalyst for Biodiesel Production. *Fuel*, 89(8), 2163-2165. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.02.016>
- World Bioenergy Association. (2024). *Global Bioenergy Statistics 2024 Short Version*. <https://www.worldbioenergy.org/uploads/241023%20GBS%20Report%20Short%20Version.pdf>