



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
COMPLEJO REGIONAL MIXTECA
LICENCIATURA EN BIOTECNOLOGÍA

**ESTUDIO DEL USO DE MATERIALES INORGÁNICOS COMO POSIBLES
CATALIZADORES HETEROGÉNEOS DE LA REACCIÓN DE
TRANSESTERIFICACIÓN DE ACEITE VEGETAL**

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN BIOTECNOLOGÍA**

PRESENTA

EDUARDO JIMÉNEZ SANTIAGO

DIRECTOR DE TESIS

DR. JUAN MANUEL LEDO VIDAL

CODIRECTOR DE TESIS

DR. MARCOS CRUZ GONZÁLEZ



BUAP

Oficio No. CRM/218/2024

**OFICIO DE MODALIDAD DE TITULACIÓN POR
PRESENTACIÓN DE EXAMEN PROFESIONAL POR TESIS**

Mtro. Ricardo Valderrama Valdez
Director de Administración Escolar
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
PRESENTE

At'n: Psic. Marcela Juárez Zenteno
Jefa del Departamento de Titulación

Por medio de la presente me permito enviarle un cordial saludo, al mismo tiempo hago de su conocimiento que:

C. EDUARDO JIMÉNEZ SANTIAGO

Matrícula

201837710

Pasante de la Licenciatura en:

BIOTECNOLOGÍA

Presentará examen profesional: 31/05/2024 a las 11:00hrs.

El Comité de Titulación acordó nombrar como integrantes del jurado a los siguientes profesores:

Presidente: Dr. Gabriel Pérez Galmiche

Secretario: Dr. Juan Manuel Ledo Vidal

Vocal: Dr. Marcos Cruz González

NOTA 1: ESTE DOCUMENTO TIENE VIGENCIA POR 6 MESES A PARTIR DE SU EXPEDICIÓN.

No existiendo inconveniente por parte de ésta Unidad Académica, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

"Pensar bien, para vivir mejor"

H. Ciudad de Atlixco, Puebla a 29 de abril de 2024.

Dr. Gabriel Pérez Galmiche
Director Complejo Regional Mixteca

Ccp. Archivo
G.P.G./ACMS.



BUAP

Oficio No. CRM/219/2024

Mtro. Alfredo Avendaño Arenaza
Dirección General de Bibliotecas
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
PRESENTE.

Por este medio, y de acuerdo con la solicitud presentada por la pasante **EDUARDO JIMÉNEZ SANTIAGO** de la **Licenciatura en BIOTECNOLOGÍA** con matrícula **201837710**, hago de su conocimiento que esta unidad académica no tiene inconveniente para que se beneficie con modalidad de **Titulación POR TESIS.**

Por lo anterior, solicito a usted tenga a bien llevar a cabo el trámite de la Liberación de Bibliotecas con los requisitos establecidos, a fin de que continúe con los demás trámites de Titulación.


NOTA: ESTE DOCUMENTO TIENE VIGENCIA POR 6 MESES A PARTIR DE LA FECHA DE EXPEDICIÓN.

Sin otro particular, le reitero mi más alta y distinguida consideración.

ATENTAMENTE

"Pensar bien, para vivir mejor"

H. Ciudad de Atlixco, Puebla a 29 de abril de 2024.


Dr. Gabriel Pérez Galmiche
Director Complejo Regional Mixteca

C.c.p. Archivo
G.P.G./ACMS.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todos aquellos que han contribuido al desarrollo de esta tesis. Su apoyo ha sido invaluable en este viaje académico.

Al Dr. Juan Manuel Ledo Vidal: Agradezco profundamente a mi tutor, cuya guía experta y apoyo constante han sido la luz que guio este trabajo de investigación. Su paciencia y dedicación han sido fundamentales para alcanzar este logro.

A los Profesores y Personal Académico: Mi gratitud a los profesores y al personal académico por su disposición a compartir su sabiduría y experiencia. Cada lección aprendida ha sido un pilar en la construcción de este proyecto. En particular, a los doctores José Albino Moreno Rodríguez, Rosalía Torralba Sánchez y Manuel Velasco Ximello, por su apoyo para la obtención y caracterización de los materiales de estudio de este trabajo.

Al Comité de Titulación, Comisión Revisora y Jurado de esta tesis: Por su tiempo, paciencia y dedicación en la revisión del trabajo. Sus comentarios y consejos sirvieron para enriquecerlo.

A la Universidad: Un agradecimiento especial a la Universidad por proporcionar los recursos y el ambiente propicio para la investigación y el aprendizaje. Este trabajo es también un reflejo del compromiso de la institución con la excelencia educativa.

A mis Seres Queridos: A mi familia, amigos y Alejandra Hernández Reyes, les agradezco por ser mi refugio y fuente de motivación. Su amor incondicional y su fe inquebrantable en mis capacidades me han dado la fuerza para perseguir mis sueños.

Cada uno de ustedes ha dejado una huella imborrable en mi vida y en este trabajo. Les estoy eternamente agradecido.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	I
1. ANTECEDENTES.....	1
1.1. Biocombustibles.....	1
1.2. Biodiesel.....	5
1.3. Materias primas para la síntesis de biodiesel.....	8
1.3.1. Grasas animales.....	10
1.3.2. Aceites vegetales.....	10
1.3.3. Otras materias primas.....	11
1.3.4. Aceites reciclados.....	12
1.4. Uso de aceites residuales.....	12
1.4.1. Caracterización de los aceites usados.....	14
1.5. Transesterificación de grasas y aceites para la obtención de biodiesel.....	15
1.6. Catálisis.....	17
1.6.1. Catálisis homogénea.....	18
1.6.2. Catálisis heterogénea.....	18
1.6.3. Catalizadores sólidos.....	20
1.6.4. Catalizadores utilizados en la producción de biodiesel.....	21
1.7. Productos de la reacción de transesterificación.....	22
1.7.1. Glicerina.....	23
1.7.2. Ésteres de alquilo.....	24
2. JUSTIFICACIÓN.....	25
3. OBJETIVOS.....	26
3.1. Objetivo General.....	26
3.2. Objetivos Particulares.....	26
4. HIPÓTESIS.....	26
5. METODOLOGÍA.....	27
5.1. Diagrama de trabajo.....	27
5.2. Materiales y reactivos.....	28
5.3. Pretratamiento del aceite reciclado.....	29

5.4. Determinación del índice de acidez	29
5.5. Determinación del índice de saponificación	29
5.6. Determinación del índice de yodo	30
5.7. Determinación del índice de peróxido	31
5.8. Reacción de transesterificación	31
5.8.1. Transesterificación alcalina tradicional	31
5.8.2. Propuesta de transesterificación utilizando materiales inorgánicos	32
5.9. Caracterización de los productos	32
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
6.1. Elección de la materia prima para la reacción de transesterificación.....	34
6.2. Índice de acidez	38
6.3. Índice de saponificación.....	39
6.4. Resultados de la reacción de transesterificación	40
6.5. Elucidación de grupos funcionales mediante espectroscopía de infrarrojo	43
7. CONCLUSIONES	51
8. RECOMENDACIONES	52
REFERENCIAS	53

INTRODUCCIÓN

Uno de los residuos de la cadena de producción de alimentos que más se genera día con día es el aceite. Los aceites utilizados en la preparación de alimentos en el ámbito doméstico y comercial experimentan cambios químicos durante los distintos procesos a los que son sometidos, esto provoca que no se puedan reutilizar y que posteriormente sean desechados, en muchos casos de maneras incorrectas. Lo anterior causa un impacto ambiental negativo, ya que, por desgracia, las maneras más comunes de desecharlos son a través del drenaje o directamente en bolsas de basura, lo que origina contaminación de suelos y mantos acuíferos.

El aceite usado tiene un impacto contaminante significativo, se estima que un litro de este aceite puede contaminar hasta mil litros de agua. De acuerdo con González Canal y González Ubierna (2015), la proporción es de 1:40000, el equivalente al consumo anual de una persona.

El aceite es un contaminante dañino tanto para el medio ambiente como para los seres vivos, sus propiedades fisicoquímicas lo hacen muy difícil de eliminar una vez que ya está en el ambiente; tiene moléculas orgánicas apolares que al ingresar en cuerpos de agua crean una capa que limita la actividad biológica de la flora y fauna del lugar. Por otro lado, con el aumento de las industrias, vehículos y el uso desmedido de aceite comestible en restaurantes y hogares, la contaminación causada por éste se ha incrementado (González Canal y González Ubierna, 2015).

El aceite de cocina es una parte básica de la alimentación humana en las grandes ciudades; sin embargo, en México es una de las principales fuentes de contaminación de los cuerpos de agua cercanos. Esto ha obligado, por ejemplo, a que la Ciudad de México implemente una norma de separación de estos residuos para facilitar su aprovechamiento y valorización reincorporándolos a procesos productivos (Norma Ambiental para la Ciudad de México NADF-012-AMBT-2015, 2018).

Por otro lado, en los últimos años, la producción de biocombustibles es una manera de aprovechar los residuos generados por el hombre; por ejemplo, se puede producir

biogás a partir de la biomasa de residuos orgánicos. En la producción de biodiesel las grasas y aceites sirven como materia prima, permitiendo obtener un combustible renovable y respetuoso con el medio ambiente.

El reciclaje de aceite usado es de gran importancia, ya que evita su disposición inadecuada y su impacto negativo en el medio ambiente. Este aceite, puede recuperarse de cocinas, industrias o cualquier establecimiento de la cadena de producción de alimentos donde sea generado; puede ser refinado y transformado en biodiesel mediante un proceso de esterificación. El biodiesel, a diferencia de los combustibles fósiles, produce emisiones reducidas de gases de efecto invernadero y contribuye a la disminución de la dependencia de los combustibles no renovables (Demirbas, 2009). Al reciclar el aceite y promover la producción de biodiesel, se fomenta la conservación de los recursos naturales, se disminuye la contaminación y se impulsa una transición hacia fuentes de energía sostenibles.

Asimismo, la producción de biodiesel a partir del aceite reciclado puede mejorarse con la utilización de nuevos materiales inorgánicos, los cuales pueden actuar como catalizadores. Estos catalizadores pueden aumentar la velocidad de las reacciones donde participan y llevar a cabo una catálisis heterogénea para obtener un proceso de producción más eficiente (Medina Ramírez et al., 2012).

Es por ello que en este trabajo se estudiaron 5 materiales inorgánicos como una propuesta de catalizadores heterogéneos de la reacción de transesterificación de aceite vegetal y su posible utilización para mejorar la eficiencia esta reacción, en la cual se pueden utilizar aceites vegetales reciclados como materia prima.

1. ANTECEDENTES

1.1. Biocombustibles

El desarrollo de los combustibles va de la mano con el desarrollo de la humanidad. Desde el descubrimiento del fuego, sin estar consiente, el hombre ha utilizado diversos tipos de combustibles. Además de la madera, los primeros en ser usados fueron biocombustibles como ceras y aceites vegetales y animales, el aceite de ballena es un ejemplo de ello; así como metanol y etanol. Estos biocombustibles fueron utilizados en sus inicios como medios de iluminación, calefacción y para la cocción de los alimentos. Posteriormente, con el desarrollo industrial, los biocombustibles fueron reemplazados por combustibles fósiles derivados del petróleo. Sin embargo, desde hace unas décadas, se identificaron dos problemas de importancia, la disminución de las reservas de combustibles fósiles y el aumento de los problemas ambientales, esto despertó el interés por el estudio y desarrollo de los biocombustibles.

Desde la década de los 70 del siglo pasado se ha estudiado el uso de combustibles alternativos. En la actualidad, los biocombustibles son objeto de estudio ya que representan una solución a la preocupación mundial sobre el cambio climático, la disminución de los recursos fósiles y el propósito de asegurar sustentabilidad energética; esto al ser combustibles derivados de fuentes biológicas renovables (Ramos et al., 2016). Salinas Callejas y Gasca Quezada (2009) los definen como combustibles líquidos o gaseosos producidos a partir de biomasa renovable.

La biomasa es aquella fracción de materia orgánica utilizada como fuente de energía. Ésta puede clasificarse en biomasa natural, aquella que se produce en la naturaleza sin la intervención humana como la madera. La biomasa residual consiste en los residuos o subproductos derivados de actividades agrícolas e industriales, como los rastrojos, cáscaras y bagazos. Por otro lado, se puede obtener biomasa a partir de cultivos, los cuales están destinados exclusivamente a la producción de biocombustibles, por ejemplo, cultivos de cereales para producir bioetanol. Por tanto, los biocombustibles son una opción sostenible en comparación con los combustibles fósiles, ya que su producción y consumo pueden ser cíclicos y no contribuir

directamente a un aumento neto de emisiones de dióxido de carbono en la atmósfera (Dufey, A. 2006).

Los biocombustibles pueden obtenerse mediante distintos procesos y el método específico dependerá del tipo de biocombustible que se desee producir. Uno de los procesos más comunes es la fermentación de materiales ricos en azúcares o almidón utilizando microorganismos, como levaduras y bacterias para obtener biocombustibles como el biogás o el bioetanol (Ramos et al., 2016). Este último es un alcohol obtenido principalmente de cultivos como el maíz, la caña de azúcar o la remolacha azucarera. Se utiliza comúnmente como aditivo en las gasolinas para aumentar el índice de octano y mejorar la eficiencia de los motores de combustión.

Por otro lado, la transformación de grasas y aceites vegetales o animales mediante un proceso de transesterificación permite la producción de biodiesel. La transesterificación es una reacción química en la cual los triglicéridos se convierten en ésteres metílicos o etílicos, los cuales son los componentes principales del biodiesel, además de glicerina como subproducto. Este biocombustible se utiliza como sustituto o mezcla con el diésel tradicional; al igual que el etanol, es una alternativa más amigable con el medio ambiente y permite reducir las emisiones de gases contaminantes (Ramos et al., 2016).

Desde hace más de 40 años la producción de biocombustibles ha ido en aumento en todo el mundo. Los Estados Unidos junto con la Unión Europea, han promovido el desarrollo del bioetanol y del biodiesel a través de distintas medidas interrelacionadas (Llanes Cedeño et al., 2017). Estados Unidos es el mayor productor mundial de biocombustibles; en 2014 produjo 4,700 millones de litros de biodiésel y cerca de 54,300 millones de litros de bioetanol. En Latinoamérica Brasil es el pionero en la producción de biocombustibles, es el segundo productor mundial con 25,600 millones de litros de bioetanol y 3,500 millones de litros de biodiésel producidos en el mismo año (Ramos et al., 2016). Por lo tanto, la producción de estos se ha convertido en una alternativa viable a los combustibles fósiles.

En este sentido, la Agencia Internacional de Energía o IEA, por sus siglas en inglés, (International Energy Agency), es la principal autoridad energética del mundo.

Proporciona datos, análisis y recomendaciones de políticas confiables y autorizados con el objetivo de dar forma a un futuro energético seguro, sostenible y asequible para todos y al mismo tiempo cumplir con los objetivos de cambio climático del Acuerdo de París de 2015. La IEA fue fundada en 1974 en respuesta a la crisis petrolera de la época y con el propósito de garantizar la seguridad del suministro de petróleo. La seguridad energética sigue siendo una parte central de su misión, pero actualmente ha ampliado sus funciones adoptando un enfoque basado en todos los combustibles y todas las tecnologías, la IEA recomienda políticas que mejoren la confiabilidad, asequibilidad y sostenibilidad de la energía.

De acuerdo con datos de la IEA (2023), la proporción total de energías renovables sigue siendo pequeña. Por ejemplo, en la demanda energética correspondiente al sector del transporte, las energías renovables crecieron del 3.4% en 2017 a sólo el 3.8% en 2023. Aun así, las energías renovables representan el 12% del crecimiento de la demanda de combustible para el transporte. La producción de biocombustibles continúa aumentando, hasta un pronóstico del 15% al final del año. En la demanda de energía del sector del transporte, los biocombustibles seguirán representando casi el 90% del total de energías renovables en 2023, a pesar de que la movilidad eléctrica se expande rápidamente (figura 1). El bioetanol representa dos tercios del crecimiento de la producción de biocombustibles, mientras que el biodiesel y el aceite vegetal hidrotratado (HVO) proporcionan el resto.

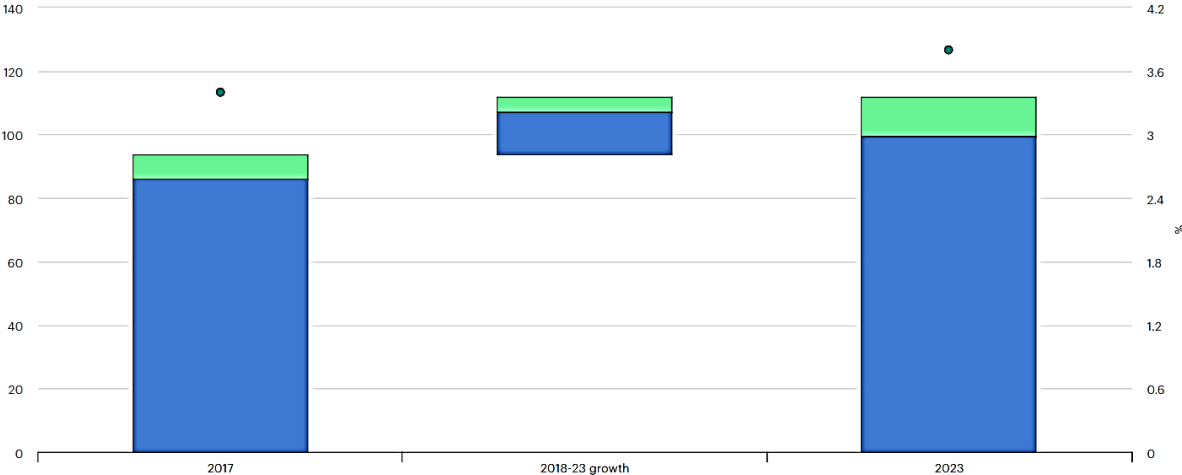


Figura 1. Energías renovables en el transporte por combustible. El color azul corresponde a biocombustibles, el color verde a electricidad renovable y los puntos al

porcentaje de energías renovables. (Tomado de Renewable energy in transport by fuel in 2023, IEA, Paris).

En 2017, la producción de biocombustibles convencionales aumentó un 4% interanual hasta alcanzar los 143,000 millones de litros, con un valor energético de 83 Mtep (megatonelada equivalente de petróleo). Se estima que para 2023, la producción mundial de biocombustibles crecerá otro 15%, hasta 165,000 millones de litros, equivalente a 97 Mtep. Los países asiáticos representan el mayor crecimiento en la producción de biocombustibles durante el período previsto: China, India y los países de la Asociación de Naciones de Asia Sudoriental (ASEAN) combinados representan la mitad de la expansión global de la producción de biocombustibles. América Latina es responsable del otro 45% del crecimiento de la producción, que proviene principalmente de Brasil, que tiene el mayor crecimiento en producción de biocombustibles que cualquier país individual. El principal impulsor de este crecimiento es su nuevo marco de políticas RenovaBio que se introducirá en la primera mitad del período previsto. Se estima que para 2023, la producción de etanol podría crecer más del 20%, siendo Brasil, China y Estados Unidos los mayores productores. Asimismo, la producción de biodiesel y HVO podría aumentar más del 30%, principalmente en Brasil, India y los países de la ASEAN (Figura 2. IEA, 2018).

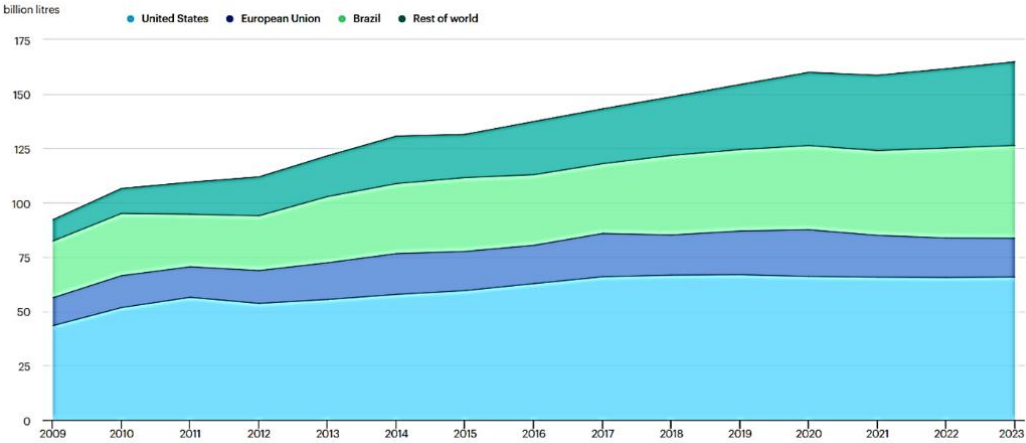


Figura 2. Producción mundial de biocombustibles convencionales, 2011-2023. (Tomado Global conventional biofuel production, 2011-2023, IEA, Paris).

Como se ha mencionado, el transporte depende casi totalmente de combustibles fósiles, en particular de derivados del petróleo, como la gasolina, el diésel, el gas licuado de petróleo, además del gas natural. La demanda mundial de estos combustibles sigue aumentando y una forma viable de satisfacerla es a través del uso de combustibles alternativos.

Un combustible alternativo debe ser técnicamente viable, económicamente competitivo, ambientalmente aceptable y fácilmente disponible. Uno de estos, que exhibe un gran potencial es el biodiesel. El uso de biodiesel puede mejorar los niveles de emisiones de algunos contaminantes y deteriorar otros. Sin embargo, para cuantificar el efecto del biodiesel es importante tener en cuenta otros factores como la materia prima, el ciclo de conducción, la tecnología del vehículo, etc. El uso de biodiesel permite buscar un equilibrio entre la agricultura, el desarrollo económico y el medio ambiente (Dermibas, 2008).

1.2. Biodiesel

Como se mencionó en la sección anterior, los biocombustibles representan casi el 90% del total de energías renovables utilizadas en el sector de transporte para 2023; un tercio de estos corresponde a la producción de biodiesel.

El biodiesel es un tipo de biocombustible líquido alternativo y renovable que se obtiene a partir de fuentes naturales como aceites vegetales y grasas animales. Se define químicamente como una mezcla de ésteres de alquilo (metilo y etilo, principalmente), con cadenas largas de ácidos grasos (Medina Ramírez et al., 2012).

De acuerdo con la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales o ASTM International por sus siglas en inglés (American Society for Testing and Materials), la cual es una organización de estándares internacionales que desarrolla y publica acuerdos de normas técnicas para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios, define al biodiesel como: ésteres monoalquílicos de ácidos

grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales o grasa de animales.

El biodiesel se ha convertido en una opción atractiva debido a su capacidad para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y su potencial para disminuir la dependencia de los combustibles fósiles no renovables. Además, es compatible con los motores diésel convencionales, lo que facilita su implementación en vehículos y maquinarias existentes (Machado, 2010).

La obtención tradicional de biodiesel se realiza mediante la reacción de transesterificación, la cual consiste en la reacción de un alcohol (generalmente metanol o etanol) con un aceite vegetal o una grasa animal en presencia de un catalizador. En esta reacción, los lípidos presentes en la materia prima son transformados en ésteres metílicos o etílicos, que son los componentes principales del biodiesel y glicerol como subproducto (Knothe, 2005). En este sentido, el tipo y calidad de las materias primas utilizadas son factores clave que determinan la calidad y eficiencia del biodiesel producido.

La transesterificación es una reacción de intercambio de los grupos funcionales de un triacilglicérido y un alcohol. Estas reacciones generalmente están catalizadas mediante la adición de un catalizador ácido o básico. Asimismo, este proceso también se puede llevar a cabo con enzimas o mediante catalizadores metálicos (Encinar et al., 2021).

La primera reacción de transesterificación de un aceite vegetal se realizó en 1853, por los científicos, E. Duffy y J. Patrick, marcando el inicio de la historia del biodiesel. Esto se realizó incluso 40 años antes de que Rudolf Diesel patentara su primer motor de combustión. El motor diésel surgió en 1893, como una alternativa a las limitaciones de las máquinas de vapor, tenía todo lo que se requería de un motor: poder y durabilidad. Funcionaba con cualquier tipo de combustible, inclusive con aceites vegetales; Diesel esperaba que los granjeros pudieran procesar sus propios combustibles en lugares lejanos. El primer modelo funcional del motor diésel trabajaba con aceite de cacahuete, pues Diesel pensaba que los aceites vegetales podían competir con los combustibles fósiles; sin embargo, eran procesados de

manera bruta y sin tratamientos posteriores. No obstante, el motor no llamó la atención, ya que el petróleo ya era una fuente energética más accesible (Dermibas, 2008).

Posterior al desarrollo del motor diesel se obtuvo el diésel o petrodiesel, producto del refinamiento del petróleo. Entonces el modelo del motor diésel fue rediseñado para trabajar con este nuevo combustible, menos viscoso que cualquier otro aceite vegetal, y por tanto, el petrodiesel se impuso como la alternativa más barata.

Durante la Segunda Guerra Mundial debido a la escasez de petróleo varios países implementaron programas para producir biodiesel a partir de aceites vegetales, pero tuvieron que trabajar con los daños a los motores debido a la diferencia de viscosidad que no podía tolerar su diseño y en otros casos si había agua emulsionada. Después de la guerra, se retomó la práctica de quemar únicamente gasolina y petrodiesel.

Sin embargo; el problema de la viscosidad lo había resuelto a baja escala el científico belga G. Chavanne en 1937, quien patentó un método para obtener ésteres de etilo de los ácidos grasos del aceite de palma tratado con etanol y catalizadores básicos. Por lo tanto, se considera que el biodiesel nació formalmente en 1937, pero su producción masiva ocurrió hasta la década de 1980. Al tratar aceites vegetales mediante una transesterificación, se resolvió el problema de la viscosidad, permitiendo igualar al petrodiesel en desempeño y representando una alternativa ecológica (Suarez & Meneghetti, 2007).

Durante el período de 1937 a 1980, el biodiesel experimentó altibajos. Aunque no se dispone de detalles específicos sobre este período, es probable que factores como la disponibilidad de materias primas, la eficiencia de la producción y el costo en comparación con los combustibles fósiles tradicionales hayan jugado un papel en estos altibajos.

La palabra “biodiesel” se usó por primera vez alrededor de 1988. La producción en masa de biodiesel se inició en 1985 en una universidad agrícola en Austria y la primera planta para su producción industrial diseñada específicamente para producir

este combustible, usando aceite de colza como materia prima, se inició también en Austria en 1991. Desde 1992, el biodiesel ha sido producido comercialmente en toda Europa, siendo Alemania el mayor productor. En los Estados Unidos, el biodiesel se fabricó comercialmente por primera vez en 1991 en Kansas City, Missouri. (Hernández et al., 2009)

La década de 1990 marcó un punto de inflexión en la historia del biodiésel. Se realizaron investigaciones exhaustivas y se llevaron a cabo avances tecnológicos para mejorar la producción y calidad del biodiésel. Las políticas gubernamentales y los incentivos para fomentar el uso de biocombustibles también ayudaron a su crecimiento. El biodiésel fue una vez más considerado como una opción sostenible y respetuosa con el clima. Además, la preocupación por los altos precios del petróleo promovió una extensa experimentación sobre técnicas de obtención de biodiesel a partir de una gran variedad de aceites vegetales y grasas animales en la búsqueda de fuentes alternativas de energía.

1.3. Materias primas para la síntesis de biodiesel

Las materias primas más comunes utilizadas en la producción de biodiésel se clasifican en cuatro categorías: algas, semillas oleaginosas, grasas animales y materiales de bajo costo, tales como aceites de cocina usados y grasas. Estos últimos deben procesarse para eliminar las impurezas de la cocción, el almacenamiento y la manipulación, como la suciedad, los alimentos carbonizados y el agua. Las materias primas para la producción de biodiesel varían según el lugar, de acuerdo con el clima y disponibilidad. Generalmente los aceites y grasas más abundantes en una determinada región son las materias primas más comunes (Faife-Pérez et al., 2012).

Dentro de las grasas y aceites empleados como materia prima para la producción de biodiesel se han investigado diversas opciones, tales como aceites de palma, soja, girasol, canola, algodón, entre otros. La elección de la materia prima dependerá de

diversos factores, como la disponibilidad, el costo, la calidad del aceite y la sostenibilidad ambiental (Ma & Hanna, 1999).

La producción de biodiesel a partir de aceite vegetal y grasas animales ha sido ampliamente explorada en diversas partes del mundo, y existen numerosos ejemplos de proyectos exitosos. Por ejemplo, países como Alemania y Austria han implementado programas de recolección de aceites vegetales usados de restaurantes y hogares para su posterior transformación en biodiesel (Dufey, 2006). Este enfoque promueve la reutilización de residuos y reduce la dependencia de los combustibles fósiles. Asimismo, en Estados Unidos, empresas avícolas han adoptado la conversión de la grasa residual de pollo en biodiesel como una forma de aprovechar un subproducto y generar un combustible renovable (Hodson de Jaramillo et al., 2019). También en Brasil, se han llevado a cabo investigaciones para utilizar la grasa animal residual proveniente de mataderos para la producción de biodiesel, lo cual permite la valorización de este residuo y contribuye a la producción de combustibles más sostenibles (Valencia et al., 2011).

Por otro lado, se plantean nuevas líneas de investigación sobre la transesterificación enzimática mediante el uso de lipasas. Además, se buscan nuevos catalizadores para esta reacción, basados en una zeolita natural, con la finalidad de facilitar la separación del biodiésel y la glicerina. También se ha investigado el uso de reactores ultrasónicos para reducir el consumo energético durante la fabricación de biodiésel (Rivera-Pérez & García-Carreño, 2007).

Asimismo, en México, desde el 2009 el Gobierno del estado de Chiapas implementó un proyecto de recolección y aprovechamiento de aceites vegetales usados para la producción de biodiésel, con el fin de emplearlo en sus sistemas de transporte público de las principales ciudades de dicho estado (Caballero Moreno et al., 2012).

Dentro de las ventajas de la obtención de biodiesel a partir de aceites vegetales o grasas animales se encuentran su renovabilidad, biodegradabilidad y capacidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, el biodiesel tiene propiedades de combustión similares al diésel convencional y puede ser utilizado en motores diésel tradicionales sin necesidad de modificaciones (Demirbas, 2009).

1.3.1. Grasas animales

Las grasas animales son los lípidos presentes en los tejidos adiposos de los animales, éstas se constituyen principalmente por triglicéridos, que son ésteres de glicerol y ácidos grasos. Estos ácidos grasos pueden ser saturados o insaturados, lo que afecta las propiedades físicas y nutricionales de la grasa (Badui Dergal, 2006). Las grasas animales son una fuente de materia prima y se utilizan comúnmente en la producción de biodiesel debido a su alta densidad energética y bajo costo. Pueden ser una alternativa eficiente y rentable con respecto a los aceites vegetales para la producción de biodiesel; sin embargo, su calidad y eficiencia dependen del tipo de animal, la dieta y el procesamiento de la misma (Corredor y Pérez, 2018).

1.3.2. Aceites vegetales

Son compuestos orgánicos que se obtienen a partir de semillas u otras partes de plantas oleaginosas. Estos aceites están compuestos principalmente por lípidos, específicamente por triglicéridos. La proporción y tipo de estos ácidos grasos son las que determinan las características de los diferentes aceites vegetales existentes (Badui Dergal, 2006).

Los aceites vegetales poseen propiedades físicas y químicas distintivas. Físicamente, son líquidos con una viscosidad alta, un punto de fusión bajo y una densidad menor que la del agua. Además, presentan una amplia gama de colores, desde amarillo claro hasta verde oscuro o marrón. La composición de ácidos grasos varía según el tipo de aceite vegetal, siendo el ácido palmítico, el ácido oleico y el ácido linoleico algunos de los más comunes (Ramírez Nieves, 2018).

Los aceites vegetales más utilizados para la producción de biodiesel son el aceite de soja, de girasol, de palma y de canola, los cuales contienen una alta proporción de ácidos grasos. La elección del tipo de aceite vegetal depende de su disponibilidad, costo y calidad. De acuerdo con Álvarez (2013), el aceite de soja es una de las materias primas más utilizadas en la producción de biodiesel debido a su alta eficiencia y bajo costo. Sin embargo, otros estudios señalan que el aceite de palma

es una de las materias primas más eficientes para la producción de biodiesel (Aransiola et al., 2014). Cabe destacar que el uso de aceite de palma ha sido objeto de controversia debido a su impacto ambiental negativo en la producción a gran escala (Meher et al., 2006).

1.3.3. Otras materias primas

Además de los aceites vegetales y las grasas animales, se han buscado nuevas fuentes de materias primas para la producción de biodiesel, como microorganismos y subproductos de la industria alimentaria (Gómez, 2013). Con esto se pretende mejorar la sostenibilidad del proceso y reducir su impacto ambiental.

Por ejemplo, el aceite obtenido a partir de microalgas o de *Jatropha curcas*. El aceite de microalgas es una materia prima emergente con un alto potencial para la producción de biodiesel debido a su alta productividad y contenido de lípidos (Chisti, 2007). Por otro lado, la *Jatropha curcas* es una planta que se ha utilizado como fuente de materia prima en la producción de biodiesel debido a su alta tolerancia a condiciones adversas y su rápido crecimiento (Pandey et al., 2012).

Asimismo, actualmente se buscan técnicas y métodos relacionados con la mutación genética y el cultivo de microorganismos para mejorar la producción de biodiésel. Los microorganismos, como bacterias, hongos y levaduras, pueden ser modificados genéticamente para aumentar su capacidad de producir lípidos, que luego pueden ser convertidos en biodiésel (Meng et al., 2009; Vicente et al., 2010).

También, para la producción de biodiésel, las lipasas son comúnmente utilizadas para catalizar la reacción de transesterificación. Las lipasas son enzimas que catalizan la hidrólisis de los triglicéridos en glicerol y ácidos grasos. Estos ácidos grasos pueden ser esterificados posteriormente para producir biodiésel. Sin embargo, la utilización de enzimas implica un alto costo, la necesidad de condiciones de reacción adecuadas para mantener la actividad enzimática y la dificultad de separarlas del producto final (Rivera-Pérez & García-Carreño, 2007).

1.3.4. Aceites reciclados

El uso de aceites reciclados para la síntesis de biodiesel se ha convertido en una alternativa importante para la producción de biocombustibles sostenibles. La utilización de estos aceites reduce los costos de producción y evita la acumulación de residuos nocivos en el medio ambiente. (Campos Uriarte et al., 2018).

Se estima que, en 2019, en México el consumo per cápita de aceite fue de aproximadamente diez litros por año. Esta cifra refleja la cantidad promedio de aceite que se utiliza por persona en nuestro país durante dicho período. Es importante destacar que el consumo de aceite puede variar según las preferencias culinarias, la región y los hábitos alimentarios de la población (Ferney Virgüez et al., 2019).

Esta materia prima alternativa proviene principalmente de la cocina de los hogares, restaurantes y otros establecimientos; por tanto, puede reciclarse y convertirse en biodiesel, un combustible renovable y limpio con respecto a los combustibles fósiles convencionales.

El uso de biodiesel producido a partir de aceite usado puede ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. La ventaja medioambiental más significativa del biodiesel radica en su contribución al cierre del ciclo de vida del CO₂, lo que resulta en una emisión nula de este gas. Esto se debe a que las plantas oleaginosas, a través de la fotosíntesis, capturan el CO₂ y lo convierten en oxígeno, generando un efecto beneficioso a nivel global (Agudelo Santamaría, et al., 2003).

1.4. Uso de aceites residuales

Para poder utilizar aceite reciclado para producir biodiesel éste debe tratarse previamente. El pretratamiento del aceite es un paso importante durante el proceso de reciclaje de los aceites usados de cocina. Esta etapa tiene como objetivo acondicionar los aceites para que puedan ser procesados, eliminando los sólidos disueltos y suspendidos, la humedad y el contenido de ácidos grasos libres que pueden interferir en el proceso de transesterificación (Méndez Mesa, 2019).

Existen diversos métodos de pretratamiento para reducir el alto contenido de ácidos grasos libres de los aceites, entre los que se incluyen la destilación por arrastre de vapor, la extracción con alcoholes y la esterificación por catálisis ácida. Sin embargo, la destilación por arrastre de vapor requiere de una alta temperatura y tiene una baja eficiencia. Por otro lado, debido a la solubilidad limitada de los ácidos grasos libres en los alcoholes, este método de extracción requiere una gran cantidad de disolventes y el proceso es poco eficiente. En comparación con los dos anteriores, la esterificación por catálisis ácida es el método más adecuado para la conversión completa de los ácidos grasos libres en los aceites, por tanto, este es el pretratamiento más común utilizando catalizadores ácidos, generalmente ácido sulfúrico (Leung & Leung, 2010).

Además, para que un aceite sea adecuado como materia prima para la obtención de biodiesel, debe cumplir las siguientes características:

- Bajo contenido de ácidos grasos libres. El aceite debe tener un bajo contenido de ácidos grasos libres, ya que estos pueden interferir en la reacción de transesterificación, formando productos no deseados y afectar la calidad del biodiesel producido.
- Nulo contenido de agua. El aceite utilizado no debe contener agua. La presencia de agua puede provocar la hidrólisis de los ésteres durante la reacción de transesterificación, reduciendo el rendimiento del biodiesel.
- Baja viscosidad. La viscosidad del aceite influye en la eficiencia de la reacción de transesterificación. Se prefiere un aceite con baja viscosidad, ya que esto facilita la mezcla con los reactivos y aumenta la eficiencia de la reacción.
- Bajo contenido de impurezas. El aceite debe estar relativamente libre de impurezas, como partículas sólidas, sedimentos y compuestos no deseables, que podrían afectar la calidad y estabilidad del biodiesel producido.
- Compatibilidad con el proceso de transesterificación. El aceite debe ser compatible con los reactivos y catalizadores utilizados en la reacción de transesterificación. Esto implica que no debe tener componentes que inhiban o

interfieran en la reacción y que sea capaz de reaccionar eficientemente para producir los ésteres metílicos o etílicos deseados.

Es importante tener en cuenta que el biodiesel puede obtenerse a partir de diferentes fuentes de aceites, tales como, el aceite de cocina usado, aceite de soja, de palma, de canola, entre otros. Cada tipo de aceite tiene características específicas que afectan la producción y calidad del biodiesel.

1.4.1. Caracterización de los aceites usados

Una forma de determinar la calidad de un aceite para su utilización como materia prima para la producción de biodiesel es mediante la caracterización de sus diferentes índices.

- Índice de acidez. Corresponde a la masa de NaOH necesaria para neutralizar la acidez libre en 1 gramo de grasa. Este índice indica la cantidad de ácidos grasos libres presentes en la muestra (NMX-F-101-SCFI-2012).
- Índice de saponificación. El proceso de saponificación consiste en descomponer una molécula de grasa en dos componentes (un ácido y un alcohol). Aquellos componentes de las grasas que no se descomponen se llaman insaponificables. El índice de saponificación expresa el peso en mg de KOH necesarios para saponificar un gramo de grasa e indica la cantidad de material saponificable presente (NMX-F-174-SCFI-2014).
- Índice de yodo. Es la medida del grado de insaturaciones de las grasas y aceites. Se expresa en términos del número de centigramos de yodo absorbido por gramo de muestra (porcentaje de yodo absorbido) (NMX-F-152-SCFI-2011).
- Índice de peróxidos. Este índice indica el grado de oxidación de los lípidos. Se le define como el número de miliequivalentes de peróxido por kilogramo de muestra, que oxidan al yoduro de potasio (NMX-F-154-SCFI-2010).

1.5. Transesterificación de grasas y aceites para la obtención de biodiesel

La transesterificación es el proceso químico necesario para la producción de biodiesel. En esta reacción los aceites o grasas se convierten en ésteres de metilo o etilo del ácido graso respectivo, y son los componentes principales del biodiesel (Castellar et al, 2014). La transesterificación se lleva a cabo en presencia de un catalizador generalmente alcalino y puede realizarse mediante un método de lotes o continuo (Kusdiana & Saka, 2001; Reategui Romero et al., 2013).

El proceso de transesterificación comienza con la mezcla del aceite o la grasa con un alcohol, en presencia de un catalizador (Demirbas, 2008). Para esta reacción, los triacilglicéridos, componentes principales de aceites y grasas, reaccionan con metanol en una proporción 1:3, en presencia de hidróxido de sodio para formar ésteres y glicerol, tal como se muestra en la figura 3.

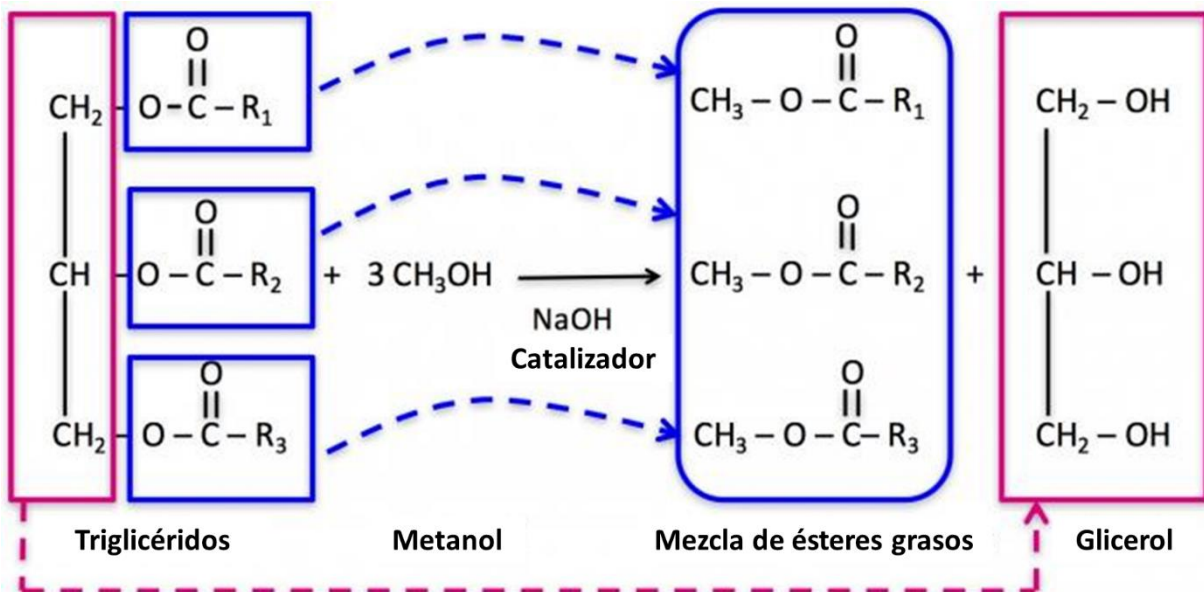


Figura 3. Reacción de transesterificación (Tomado de Rodríguez-Álvarez et al., 2019).

La transesterificación es una reacción de equilibrio y se lleva a cabo en condiciones de temperatura y presión elevadas para desplazar el equilibrio hacia la formación de

productos (Martín et al, 2015). A medida que avanza la reacción, los ésteres se separan del glicerol y otros componentes no deseados mediante decantación o centrifugación (Knothe, 2005).

Por tanto, la calidad del biodiesel producido depende en gran medida de las materias primas utilizadas, las condiciones de transesterificación y el catalizador utilizado. Por ejemplo, el uso de aceites o grasas de baja calidad, la presencia de agua o ácidos grasos libres pueden afectar negativamente la eficiencia y calidad del proceso de transesterificación (Martín et al, 2015).

La cantidad de catalizador utilizado también es un factor importante que puede afectar el rendimiento y la calidad del biodiesel. Un exceso de catalizador puede aumentar la velocidad de la reacción, pero también puede aumentar la cantidad de subproductos no deseados. Por otro lado, una cantidad insuficiente de catalizador puede reducir la velocidad de la reacción y producir ésteres de baja calidad (Demirbas, 2008).

Entre otras desventajas de la producción de biodiesel, se encuentran el empleo de grandes cantidades de alcohol y el requerimiento energético para llevar a cabo la reacción, lo que aumenta los costos de producción (Freedman et al., 1986).

Por tanto, un aspecto importante es la optimización de las condiciones de reacción para maximizar la eficiencia y la calidad del producto final. Esto implica estudiar la proporción molar de alcohol y aceite, la temperatura, la presión y el tiempo de reacción (Srivastava y Prasad, 2000). Asimismo, se han investigado métodos de purificación del biodiesel, como la extracción con agua y la adsorción con resinas de intercambio iónico (Darnoko y Cheryan, 2000).

Además, se han estudiado nuevas tecnologías para mejorar la producción de biodiesel; por ejemplo, el uso de microondas, ultrasonidos y sistemas de cavitación para mejorar la eficiencia de la transesterificación. También se han investigado nuevos sistemas de separación, como la extracción con CO₂ supercrítico y la destilación, para mejorar la pureza y la calidad del biodiesel (Ma & Hanna, 1999).

Asimismo, para la síntesis de biodiesel se busca desarrollar nuevos catalizadores y tecnologías de producción para mejorar la eficiencia y reducir los costos del proceso. Por ejemplo, se han estudiado catalizadores heterogéneos basados en materiales mesoporosos y nanopartículas de metales nobles, los cuales han mostrado una alta actividad y selectividad en la producción de este biocombustible (Benedicto, 2019).

Para mejorar las condiciones de la reacción, se han investigado otros catalizadores para hacer más eficiente dicho proceso. Los ácidos son una alternativa interesante para la producción de biodiesel en ausencia del alcohol (Ma & Hanna, 1999); sin embargo, también pueden formar subproductos no deseados y generar corrosión. Las enzimas son otro tipo de catalizador estudiado (Kusdiana y Saka, 2004), éstas pueden ser más selectivas y eficientes que los catalizadores químicos convencionales y son más amigables con el medio ambiente. Sin embargo, su alto costo y su sensibilidad a las condiciones de reacción (temperatura y pH) limitan su uso para fines especializados (Ranganathan et al., 2008).

1.6. Catálisis

Uno de los objetivos de la cinética química es incrementar la velocidad de las reacciones químicas con el fin de reducir tiempos y costos. La catálisis es un proceso fundamental en la síntesis y producción de una amplia variedad de productos químicos. Consiste en aumentar la velocidad de una reacción química por medio de un catalizador, una sustancia que no se consume en la reacción (Thomas y Thomas, 2014).

Los catalizadores son necesarios en la producción de muchos productos químicos, y pueden ser diseñados y optimizados utilizando métodos de catálisis. Los catalizadores son clave en una gran cantidad de procesos químicos modernos. Desde la producción de plásticos hasta la eliminación de contaminantes, los catalizadores están en el centro de la producción química.

Para facilitar su estudio, la catálisis se divide en catálisis homogénea y catálisis heterogénea.

1.6.1. Catálisis homogénea

La catálisis homogénea es un proceso en el cual el catalizador y los reactivos se encuentran en la misma fase, típicamente en fase líquida o gaseosa. Ha sido ampliamente utilizada en la producción de diversos productos químicos, combustibles y derivados del petróleo, farmacéuticos y polímeros, y ha sido objeto de intensa investigación en química y ciencias de los materiales.

En este tipo de catálisis, los catalizadores generalmente son sales metálicas o compuestos de coordinación en disolución. Los catalizadores homogéneos pueden ser muy activos y selectivos en la aceleración de reacciones químicas, pero también tienen algunas limitaciones, como la dificultad para separar el catalizador del producto final y la formación de subproductos no deseados.

La investigación en catálisis homogénea ha llevado a importantes avances en la producción de productos químicos y materiales. Por ejemplo, la producción de plásticos como el polipropileno y el poliestireno se realiza mediante la catálisis homogénea de los monómeros propileno y estireno, respectivamente (Rothenberg, 2017). Asimismo, la reacción de transesterificación de grasas y aceites también es un proceso favorecido mediante catálisis homogénea.

1.6.2. Catálisis heterogénea

La catálisis heterogénea es un proceso químico en el cual la reacción química se lleva a cabo en la superficie de un catalizador generalmente sólido, el cual no se disuelve ni se mezcla con los reactivos. Este tipo de catálisis es la más utilizada en la producción de diversos productos químicos y se ha convertido en un campo de investigación en constante evolución en la química y la ingeniería de materiales.

La catálisis heterogénea tiene varias ventajas sobre la catálisis homogénea, como la posibilidad de separar fácilmente el catalizador del producto final y la capacidad de reutilizar el catalizador. Además, los catalizadores sólidos pueden soportar

condiciones de reacción más severas y tienen una mayor estabilidad térmica y química en comparación con los catalizadores líquidos.

Los catalizadores heterogéneos pueden ser metales, óxidos metálicos, zeolitas, materiales mesoporosos y nanopartículas. Estos materiales tienen diferentes propiedades y estructuras, lo que les confiere diferentes capacidades catalíticas para diferentes reacciones químicas. Por ejemplo, los óxidos metálicos como el óxido de titanio y el óxido de hierro se utilizan comúnmente en la oxidación de hidrocarburos, mientras que las zeolitas se utilizan en la producción de petróleo y gas (Zanella, 2012).

La cinética de la catálisis heterogénea es compleja y depende de varios factores, como la estructura y la composición del catalizador, la temperatura, la presión, la velocidad de flujo y la superficie específica del catalizador. Por lo tanto, la optimización del catalizador y de las condiciones de reacción es esencial para maximizar la eficiencia del proceso y reducir los costos de producción.

Algunos procesos en los que se emplea la catálisis heterogénea destacan, la producción de biodiesel mediante un proceso de transesterificación usando un catalizador heterogéneo, como una zeolita o un óxido metálico (Medina Ramírez et al., 2012). Además, la conversión de dióxido de carbono en productos químicos valiosos, como el metanol y la síntesis de amoníaco, también se ha logrado mediante la catálisis heterogénea (Nudelman, 2004).

En años recientes se han realizado diferentes investigaciones sobre catalizadores heterogéneos aplicados en la producción de biodiesel con la finalidad de mejorar aspectos del proceso, tales como, la facilidad de separación del biodiésel y la glicerina, mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de la producción de biodiésel, así como reducir su impacto ambiental. En un estudio realizado en el Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Tamaulipas, se sintetizaron y caracterizaron 4 catalizadores ácidos y básicos heterogéneos, de tipo alúmina soportada ($\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{SO}_4$, $\gamma\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Na}$, $\gamma\text{Al}_2\text{O}_3\text{NH}_2\text{PO}_4$) (Vázquez Castillo, 2020). Por otro lado, en la Universidad Tecnológica Nacional de Argentina se estudiaron 17 catalizadores entre los cuales se incluyen sólidos microporosos de alta superficie (como zeolitas),

catalizadores basados en estructuras inorgánicas de tipo laminar (como hidrotalcitas Mg-Al sintetizadas en medio sódico y potásico) y materiales mesoporosos (como SBA-15, compósito SBA-15/hidrotalcita y productos derivados de carbonato de magnesio mesoporoso) (Benedicto, 2019).

Además, el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) ha desarrollado un catalizador heterogéneo con carácter ácido y/o básico que es altamente activo para producir biodiesel. Este catalizador transforma los ácidos grasos presentes en los aceites vegetales en sus correspondientes alquil-ésteres. El desempeño de los catalizadores se evaluó a escala de microrreacción y/o planta piloto, y se realizaron estudios técnicos y económicos preliminares del proceso a nivel piloto para determinar el potencial de aplicación industrial (Instituto Mexicano del Petróleo, 2014).

1.6.3. Catalizadores sólidos

Como se mencionó, la catálisis heterogénea es la más utilizada en la producción de diversos productos químicos, y dentro de ella el uso de catalizadores en estado sólido son los más comunes. El diseño de este tipo de catalizadores dependerá de la forma y tamaño de poros que se busquen obtener para su aplicación específica. La fabricación de estos materiales con las características deseadas puede realizarse mediante preparación de mezclas, formación de lodos, conformado, y mediante secado o calcinación. Los catalizadores sólidos pueden prepararse en polvos, gránulos, cilindros, anillos y esferas. En algunos casos, el catalizar se mezcla con su soporte en estado polvo y después se le da a la mezcla la forma adecuada; en otros casos, se dispone el catalizadores sobre la superficie del soporte, al que previamente se le ha dado la forma requerida. Asimismo; la deposición del catalizador sobre el soporte puede realizarse por varios métodos, como la impregnación por inmersión del soporte en una disolución de una sal del catalizador; por precipitación del catalizador sobre la superficie del soporte; coprecipitación del soporte junto con el catalizador; mezcla en húmedo de los componentes para formar un lodo; pulverización o rociado de la superficie externa para sólidos no porosos; entre otros (Rodríguez & Ramos, 2011).

El proceso de impregnación del catalizador sobre la superficie del soporte implica la elección del soporte más adecuado para posteriormente evaluar su viabilidad y finalmente preparar el catalizador soportado final. Los catalizadores soportados presentan una mejor dispersión de la fase activa y buena estabilidad durante la sinterización, a diferencia de los catalizadores no soportados. Sin embargo; los procesos de fabricación de catalizadores soportados son complejos, ya que presentan un gran número de variables que cuidar para mantener las características del catalizador deseado (Rodríguez & Ramos, 2011).

1.6.4. Catalizadores utilizados en la producción de biodiesel

Uno de los objetivos de la preparación de catalizadores sólidos soportados es encontrar un método adecuado que permita dispersar al catalizador, con la mayor extensión posible sobre la superficie del material de soporte para tener una mayor cantidad de sitios activos y por lo tanto, una mayor eficiencia. Moreno-Rodríguez ha propuesto en diversos trabajos el método de sol-gel, como un método adecuado para la síntesis de nanomateriales de óxido de titanio (TiO_2) como posibles sistemas de soporte. Las nanomatrices de TiO_2 , son químicamente inertes, hidrofílicas y de fácil síntesis, además de poseer alta resistencia mecánica y baja toxicidad (Zanella et al., 2011; Langle et al., 2015).

El método sol-gel es un proceso químico húmedo utilizado para la síntesis de diversas nanoestructuras, especialmente de nanopartículas de algún óxido metálico. En este método, una solución química o sol que actúa como el precursor molecular (generalmente un alcóxido de metal) se disuelve en agua o alcohol y se convierte en gel mediante calentamiento y agitación por hidrólisis/alcoholisis. El gel obtenido debe secarse mediante métodos adecuados en función de las propiedades deseadas y de la aplicación del gel. Los materiales obtenidos por el método sol-gel se utilizan en diversas tecnologías ópticas, electrónicas, energéticas, de ingeniería de superficies, de biosensores y farmacéuticas y de separación (Zanella, 2012).

La transesterificación catalizada por una base es el método convencional utilizado para producir biodiesel, pero tiene algunos inconvenientes, como la producción de ácidos grasos libres y agua, que pueden causar la formación de jabón y la desactivación del catalizador. El método supercrítico no catalítico es una alternativa respetuosa con el medio ambiente que no requiere catalizador y permite alcanzar una conversión muy alta. Aunque el método supercrítico tiene algunas desventajas, como la necesidad de altas presiones y temperaturas, es una opción viable para la producción de biodiesel. Los catalizadores sólidos también se han utilizado en la producción de biodiesel y tienen algunas ventajas sobre los catalizadores líquidos, como la facilidad de separación de los productos de la reacción, disminución de la corrosión, toxicidad y problemas ambientales (Helwani et al., 2009).

La producción de biodiesel que emplea un proceso catalizado por base homogéneo sigue siendo favorable a pesar de los problemas discutidos anteriormente. La razón principal se debe al hecho de que es cinéticamente mucho más rápido que la transesterificación catalizada heterogéneamente y es económicamente viable. Sin embargo, el alto consumo de energía y la costosa separación del catalizador homogéneo de la mezcla de reacción han requerido el desarrollo de catalizadores heterogéneos. Recientemente ha aumentado el número de investigaciones en el campo de los catalizadores heterogéneos. Se han utilizado una gran variedad de catalizadores en la transesterificación catalítica de aceites vegetales. Estos incluyen zeolitas, hidrotalcitas, óxidos, γ -alúmina, entre otros. La mayoría de estos catalizadores son álcalis u óxidos alcalinos soportados sobre soportes de gran superficie. Al igual que sus homólogos homogéneos, los catalizadores básicos sólidos son más activos que los catalizadores ácidos sólidos (Helwani et al., 2009).

1.7. Productos de la reacción de transesterificación

Los metil ésteres y la glicerina son los productos principales del proceso de transesterificación. Dado que estos productos son poco solubles entre sí y tienen densidades diferentes, pueden ser separados fácilmente para obtener productos finales de alta calidad (Álvarez Barrera, 2014).

La forma más común de separar los productos de la reacción de transesterificación es mediante decantación. Esta es una técnica de separación de fases que se basa en la diferencia de densidad entre los componentes. El líquido más denso se depositará en el fondo del recipiente, mientras que el menos denso permanecerá en la parte superior.

Otra técnica de separación de fases utilizada para separar los metil ésteres y la glicerina es la centrifugación. En esta técnica, el líquido se somete a una fuerza centrífuga para separar los componentes con diferentes densidades. Mediante la centrifugación es posible separar los componentes con mayor eficiencia y rapidez que con la decantación.

1.7.1. Glicerina

La glicerina, también conocida como glicerol o propanotriol, es un compuesto orgánico líquido y viscoso que desempeña un papel importante en diversos sectores industriales. Está compuesta por un alcohol trivalente con tres grupos hidroxilo (-OH) unidos a un esqueleto de propano. Esta estructura química confiere a la glicerina propiedades únicas y versátiles (McMurry, 2018).

La glicerina tiene una amplia gama de aplicaciones, uno de sus principales usos es en la industria de los alimentos y bebidas, donde se utiliza como agente humectante, edulcorante y estabilizante. Además, debido a su capacidad para retener la humedad, se utiliza en la fabricación de productos cosméticos, como cremas y lociones (U.S. Soybean Export Council, 2007)

La glicerina también encuentra aplicación en la industria farmacéutica, donde actúa como un excipiente en formulaciones de medicamentos y en productos de cuidado oral, como enjuagues bucales y pastas dentales (Mora Montañez, 2008). Otro uso importante es en la fabricación de productos químicos, como solventes y plastificantes.

1.7.2. Ésteres de alquilo

El biodiésel está constituido por ésteres monoalquílicos de cadena larga (C14 – C22) de ácidos grasos tales como, el ácido láurico, palmítico, esteárico y oleico que se encuentran en estado líquido. Además, puede contener alcoholes de cadena corta provenientes del metanol o el etanol. Se obtiene a partir de recursos renovables como aceites vegetales, es considerado un combustible alternativo para motores de combustión interna (Alvarez, 2013).

El uso de biodiésel supone una disminución de las emisiones de CO₂ producidas por los combustibles derivados del petróleo. Además, permite disminuir los gases de efecto invernadero producidos por el transporte, ya que no contiene compuestos de azufre que no se eliminan como gases de combustión (Blumberg K, 2003).

La caracterización del biodiesel es importante para evaluar su calidad y su capacidad de cumplir con los requisitos de los estándares internacionales. Los parámetros más comunes que se miden son la densidad, la viscosidad, el punto de nube, el índice de cetano y el contenido de glicerol (ASTM International, 2018).

Por lo tanto, la purificación del biodiesel es necesaria para eliminar los subproductos y los restos de catalizador. Esto se puede realizar mediante métodos físicos o químicos, como el lavado con agua, la adsorción con resinas de intercambio iónico o la destilación (Freedman et al., 1986; Canakci y Van Gerpen, 2001)

2. JUSTIFICACIÓN

El uso excesivo y descontrolado del aceite vegetal en la preparación de comida y frituras tiene un gran impacto negativo en los ecosistemas locales. En el municipio de Izúcar de Matamoros, la falta de prácticas adecuadas en el manejo de residuos por parte de los ciudadanos, como el desecho directo de aceite usado al drenaje sin tratamiento previo, puede causar daños significativos en la infraestructura pública, la destrucción de la biosfera y pérdidas económicas. Una alternativa para minimizar este problema a través de la transesterificación de los aceites usados en productos de valor y con menor impacto ecológico.

La producción de biodiésel a partir de aceites usados también tiene la ventaja de ser una tecnología madura y disponible, lo que significa que ya se ha demostrado su viabilidad en términos de escalabilidad y eficiencia. Además, al utilizar aceites usados como materia prima en lugar de recursos naturales no renovables, se aprovechan los recursos existentes y se reduce el impacto ambiental en la extracción y producción de estos recursos.

Por otro lado, el estudio de diferentes materiales inorgánicos como posibles catalizadores de este proceso puede aumentar su eficiencia con lo cual se pueden reducir los recursos invertidos durante la reacción.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Evaluar el efecto de distintos materiales inorgánicos, sobre las condiciones de la reacción de transesterificación de aceite vegetal y establecer su viabilidad como posibles catalizadores de ésta.

3.2. Objetivos Particulares

- Estudiar una serie de 5 materiales inorgánicos (TiO_2NaOH , HTZn/Al , HTZnMg/Al , SBA-HTZn/Al , y HTLi/Al) en la reacción de transesterificación de aceite vegetal comercial, para evaluar los tiempos de reacción en función de la temperatura.
- A partir del efecto sobre la temperatura y el tiempo de reacción de los materiales utilizados, estudiar su viabilidad como catalizadores de la reacción.
- Evaluar el efecto de los materiales inorgánicos utilizados sobre la reacción de transesterificación de aceite vegetal reciclado.
- Determinar las propiedades fisicoquímicas de los productos de la reacción de transesterificación de aceite vegetal comercial limpio y usado.
- Aplicar la metodología establecida para obtener productos de valor a partir de aceite vegetal reciclado.

4. HIPÓTESIS

Los materiales inorgánicos utilizados en la reacción de transesterificación tendrán un efecto catalítico favorable en la misma, permitiendo reducir temperaturas y tiempos de reacción.

5. METODOLOGÍA

5.1. Diagrama de trabajo

El esquema de trabajo que se siguió para la realización de este proyecto se muestra en la Figura 4 y se describe con a detalle más adelante.

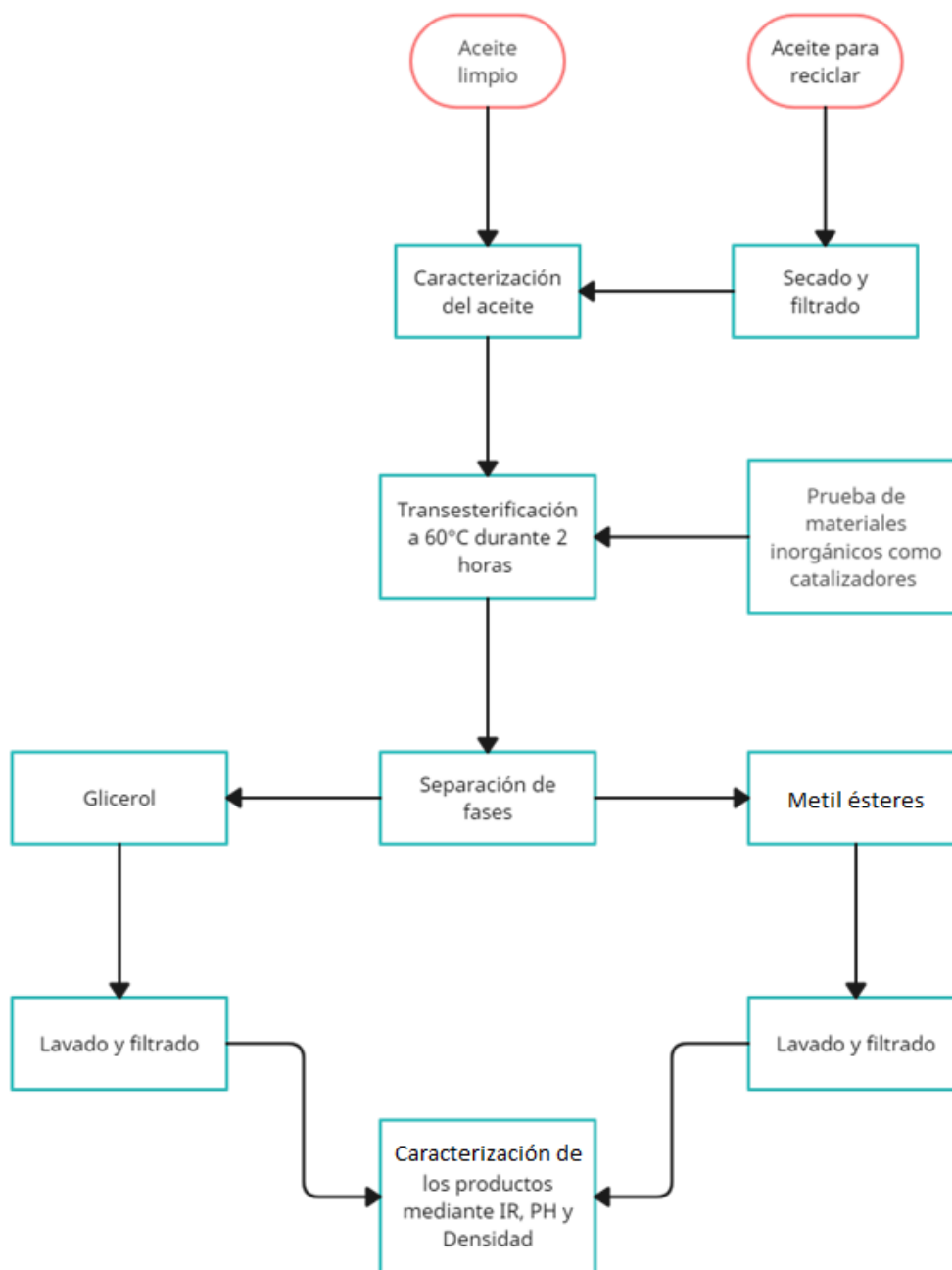


Figura 4. Esquema de trabajo para la transesterificación de aceites vegetales.

5.2. Materiales y reactivos

- Material de vidrio: El necesario para cada determinación.
- Equipos: Parrilla de calentamiento con agitación magnética; balanza analítica.
- Reactivos: Los necesarios para cada determinación grado analítico: metanol, hidróxido de sodio, agua destilada, carbón activado. Aceite vegetal comercial y reciclado. Materiales inorgánicos.

Tabla 1. Métodos y referencias utilizados en la investigación.

Determinación	Métodos	Referencia
Caracterización de los aceites		
Ácidos grasos libres	Índice de acidez	NMX-F-101-SCFI-2012
Material saponificable	Índice de saponificación	NMX-F-174-SCFI-2014
Grado de insaturaciones	Índice de yodo	NMX-F-152-SCFI-2011
Grado de oxidación	Índice de peróxidos	NMX-F-154-SCFI-2010
Obtención de biodiesel		
Transesterificación	Alcalino con NaOH como catalizador y con materiales inorgánicos	Medina Ramírez et al., 2012
Caracterización de los productos de la reacción de transesterificación		
Acidez	Potenciometría	
Densidad	Picnometría	
Elucidación de grupos funcionales	Espectroscopia IR	McMurry, 2018

Tabla 2. Equipos utilizados en la investigación.

Equipo	Marca	Modelo
Balanza analítica	Ohaus – Serie Pioneer	PA 224C
Medidor de pH portátil	Conductronic	PH10
Parrilla digital	Anzeser	SH-2
Espectrofotómetro FTIR	Perkin-Elmer	RMT510

5.3. Pretratamiento del aceite reciclado

El pretratamiento del aceite recolectado consiste en 2 etapas.

1. Filtrado inicial. El aceite recolectado se filtra inicialmente a través de un papel filtro para eliminar partículas sólidas más grandes, como restos de alimentos o sedimentos.
2. Calentamiento del aceite. El aceite filtrado se calienta a una temperatura de 60 °C durante una hora para eliminar restos de agua.

El aceite comercial se utiliza sin tratamiento previo.

5.4. Determinación del índice de acidez

Disolver 5 g de aceite en 50 mL de alcohol etílico absoluto y 1 mL de fenolftaleína al 1 % p/v en etanol, colocar en agitación durante 5 minutos para disponer de una solución homogénea.

La mezcla se titula con una solución estándar de hidróxido de sodio 0.1 N y fenolftaleína como indicador. Cuantificar el volumen de NaOH consumido y calcular el índice de acidez a partir de la ecuación (1).

$$\text{Índice de acidez (I.A.)} = \frac{N \cdot V \cdot meq}{m} \quad (1)$$

donde:

meq: es el miliequivalente químico del ácido graso de referencia (oleico 0.282, láurico 0,200, palmítico 0.256).

N: es la normalidad de la solución de NaOH utilizada para titular la muestra.

V: mililitros de solución valorada de NaOH gastados en la titulación de la muestra.

m: es la masa de la muestra en gramos.

5.5. Determinación del índice de saponificación

Realizar la saponificación bajo reflujo de 4-5 g de aceite filtrado con 50 mL de KOH 0.5 N en etanol al 96 % durante 30-60 min. El exceso de KOH se determina por titulación con solución estandarizada de HCl 0.5 N con fenolftaleína como indicador. El índice de saponificación (I.S.) se calcula a partir de la ecuación (2).

$$I.S. = \frac{(B - V) \cdot N \cdot 56.1}{m} \quad (2)$$

donde:

B: volumen de HCl consumido en la titulación del blanco (sin grasa).

V: volumen de HCl consumido en la titulación de la muestra.

N: normalidad de la solución estandarizada de HCl.

56.1: equivalente del hidróxido de potasio.

m: masa de la muestra en gramos.

5.6. Determinación del índice de yodo

Pesar 10 g de muestra y colocarla en un matraz para yodo de 500 mL. Agregar 20 mL de ciclohexano y agitar hasta que la muestra esté completamente disuelta. Después agregar a la disolución 25 mL de solución Wijs. Tapar y agitar para asegurar una mezcla homogénea. Dejar en reposo la mezcla en oscuridad durante 1 h.

Transcurrido el tiempo, adicionar 20 mL de solución de KI al 15% y 100 mL de agua destilada. La porción de prueba debe de ser titulada dentro de los 30 min del término de la reacción.

Titular con una solución estandarizada de tiosulfato de sodio 0.1 M, hasta que el color amarillo casi desaparezca. Agregar 1-2 mL de solución indicadora de almidón y continuar la titulación hasta que desaparezca la coloración azul. Al final de la titulación agitar vigorosamente el matraz bien tapado para asegurar que todo el yodo se haya titulado.

Realizar la titulación en blanco, siguiendo el procedimiento descrito, excluyendo la muestra. Calcular el índice de yodo (I.Y.) mediante la ecuación (3).

$$I.Y. = \frac{(B - S) \cdot M \cdot 12.69}{m}$$

donde:

B: volumen de solución de tiosulfato de sodio gastado en la titulación del blanco.

S: volumen de solución de tiosulfato de sodio gastado en la titulación de la muestra.

M: molaridad de la solución de tiosulfato de sodio.

12.69: equivalente del yodo.

m = Masa de la muestra en gramos.

5.7. Determinación del índice de peróxido

Disolver 5 g de muestra en 50 mL de una solución 3:2 de ácido acético-isooctano y agregar 0.5 mL de solución saturada de yoduro de potasio. Reposar un minuto en agitación y agregar 30 mL de agua destilada. Titular con una solución 0.1 N de tiosulfato de sodio hasta que el color amarillo haya desaparecido casi en su totalidad.

Agregar 0.5 mL de una solución de lauril sulfato de sodio al 10 % y 0.5 mL de solución indicadora de almidón. Continuar la titulación con el tiosulfato de sodio gota a gota con agitación constante, especialmente al aproximarse el punto final, hasta que el color azul desaparezca. Repetir con la muestra blanco. La titulación de este testigo no debe de exceder 0.1 mL de la solución 0.1 N de tiosulfato de sodio. El índice de peróxido (I.P. = miliequivalentes de peróxido/1000g muestra) se calcula a partir de la ecuación (4).

$$I.P. = \frac{(M - T) \cdot N \cdot 1000}{m}$$

donde:

T: volumen de solución de tiosulfato de sodio gastado en la titulación del blanco.

M: volumen de solución de tiosulfato de sodio gastado en la titulación de la muestra.

N: normalidad de la solución de tiosulfato de sodio.

m = Masa de la muestra en gramos.

5.8. Reacción de transesterificación

5.8.1. Transesterificación alcalina tradicional

Preparar una mezcla de 100 mL de aceite, con 1 g de KOH disuelto en 10 mL de metanol. La solución resultante se coloca en agitación durante 2 horas a 60 °C.

Transcurrido el tiempo de la reacción los productos son separados mediante decantación para su posterior lavado y caracterización (López et al., 2015).

5.8.2. Propuesta de transesterificación utilizando materiales inorgánicos

Durante el proceso de transesterificación alcalina tradicional descrito en el punto anterior, se agregó un material inorgánico a la fase alcalina.

Los materiales propuestos a usar en este trabajo son los siguientes: TiO_2/NaOH , HTZn/Al , HTZnMg/Al , $\text{SBA-HTZn}/\text{Al}$, y HTLi/Al . El primero fue sintetizado en el Laboratorio de Química General y los otros 4 en el Laboratorio de Adsorción de la Facultad de Ciencias Químicas de la BUAP, a cargo del Dr. José Albino Moreno Rodríguez y la Dra. Rosalía Torralba Sánchez, respectivamente.

Se estudiaron 2 parámetros de la reacción, la temperatura y el tiempo. Con cada uno de los materiales utilizados se analizó el efecto de estos sobre los tiempos de reacción en función de la temperatura, manteniendo constantes las concentraciones de los reactivos.

Posteriormente, terminada la reacción, se continua con el proceso de lavado y filtrado de las fases acuosa y orgánica y la recuperación del material inorgánico empleado. Finalmente, ambas fases son caracterizadas para estudiar la viabilidad del uso de dicho material en el proceso de transesterificación.

Asimismo, aquellos materiales que resulten óptimos como catalizadores de la reacción de transesterificación se prueban en la misma reacción utilizando aceite reciclado como materia prima.

5.9. Caracterización de los productos

La reacción de transesterificación de aceites vegetales en medio alcalino implica la formación de 2 fases: una fase orgánica compuesta mayoritariamente por metil ésteres y una fase acuosa compuesta principalmente de glicerol. Una vez separados

y lavados los productos obtenidos, se realiza su caracterización fisicoquímica, la cual consiste en las siguientes determinaciones:

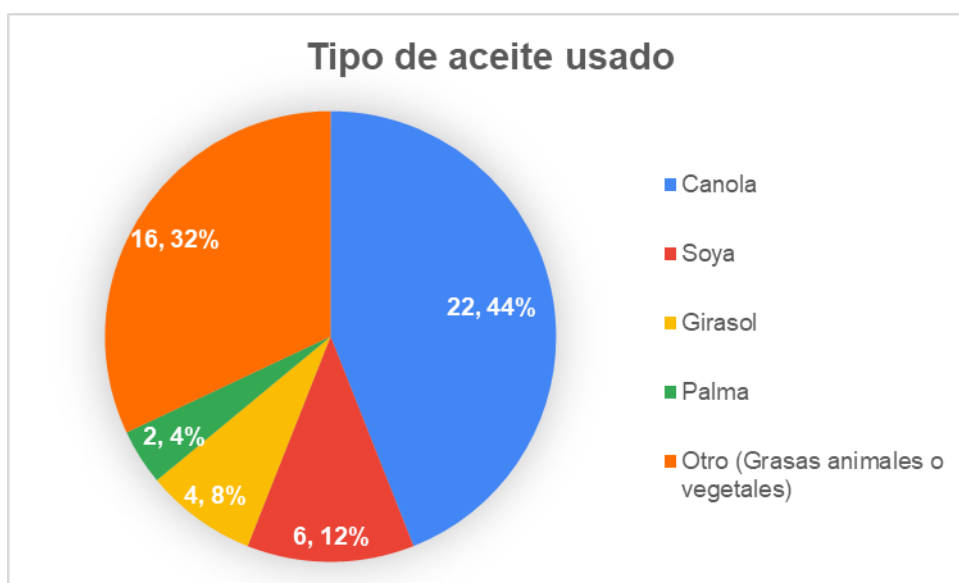
- pH mediante potenciometría
- Densidad por volumetría
- Elucidación de grupos funcionales mediante espectroscopia de infrarrojo
- Cuantificación del poder calorífico del biodiesel por calorimetría de combustión

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Elección de la materia prima para la reacción de transesterificación

Previo al desarrollo experimental, conociendo que existe una gran variedad de aceites vegetales comerciales, se realizó una breve encuesta. Ésta se realizó en el centro del municipio de Izúcar de Matamoros, Puebla; con el fin de identificar el tipo de aceite vegetal comercial más utilizado en establecimientos de preparación de alimentos fritos. Asimismo, se buscó conocer la cantidad de aceite vegetal empleado, el método de desecho del mismo y si el establecimiento estaría dispuesto a participar en un programa de reciclaje.

Se realizaron 50 encuestas en comercios de preparación de alimentos en la zona circundante al zócalo de la ciudad. Respecto al tipo de aceite utilizado, los resultados se presentan en la gráfica 1, en la cual se puede ver que, el aceite vegetal más utilizado en estos establecimientos es el aceite de canola con un 44% seguido del de soya con un 12%. Otro tipo de aceites utilizados son de girasol y de palma; asimismo, en algunos lugares se emplean grasas de tipo animal y vegetal para la preparación de los alimentos.



Gráfica 1. Tipos de aceites usados en comercios en Izúcar de Matamoros.

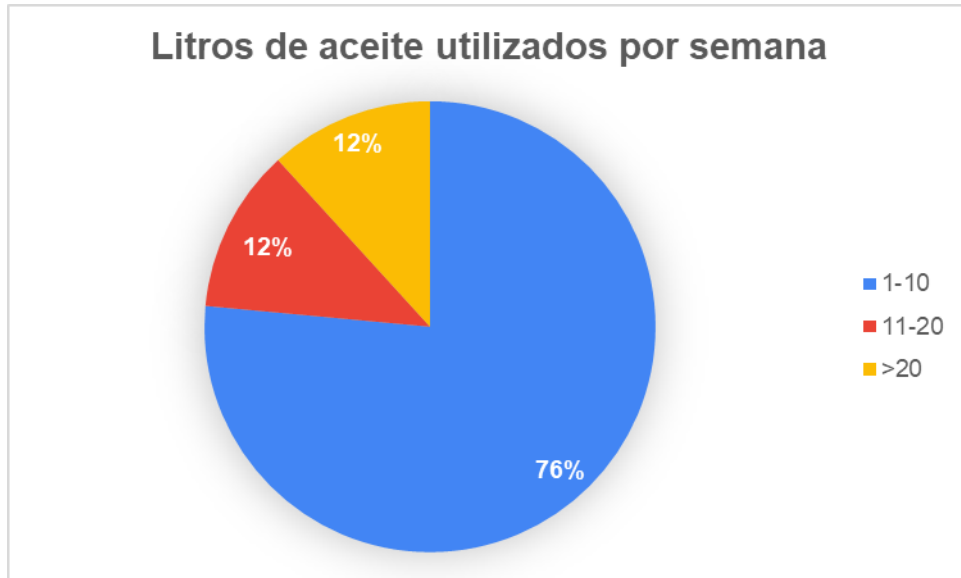
A partir de los resultados de la gráfica 1, la tendencia evidente hacia el aceite de canola por parte de los comercios es debido al precio de éste de acuerdo con los encuestados. Por tanto, con base en estos resultados, y con el fin de delimitar el estudio sólo en un tipo de aceite vegetal, la parte experimental se realizó únicamente con aceite de canola.

Cabe señalar que el aceite de canola es uno de los aceites vegetales comestibles más utilizados. En este trabajo se utilizó aceite de canola comercial de la marca más mencionada por los encuestados; asimismo, el aceite vegetal reciclado también fue de la misma marca, obtenido de los comercios en cuestión.

La popularidad del aceite de canola se debe, además de ser asequible, a que es uno de los aceites de cocina más saludables disponibles, sin grasas trans y con la cantidad más baja de grasas saturadas respecto a los demás aceites vegetales comestibles. También es ideal para preparar una amplia variedad de alimentos, tanto en el hogar como a escala comercial, debido a su textura ligera, sabor neutro y con un punto de humo de los más altos con respecto a los demás aceites comestibles, lo que lo hace ideal para saltear y freír (Canola Council of Canada).

Por otro lado, uno de los objetivos de la encuesta fue conocer la cantidad de aceite que emplean los establecimientos de preparación de alimentos en el centro de Izúcar de Matamoros, dado que existen diversos comercios que tienen como productos principales a las frituras.

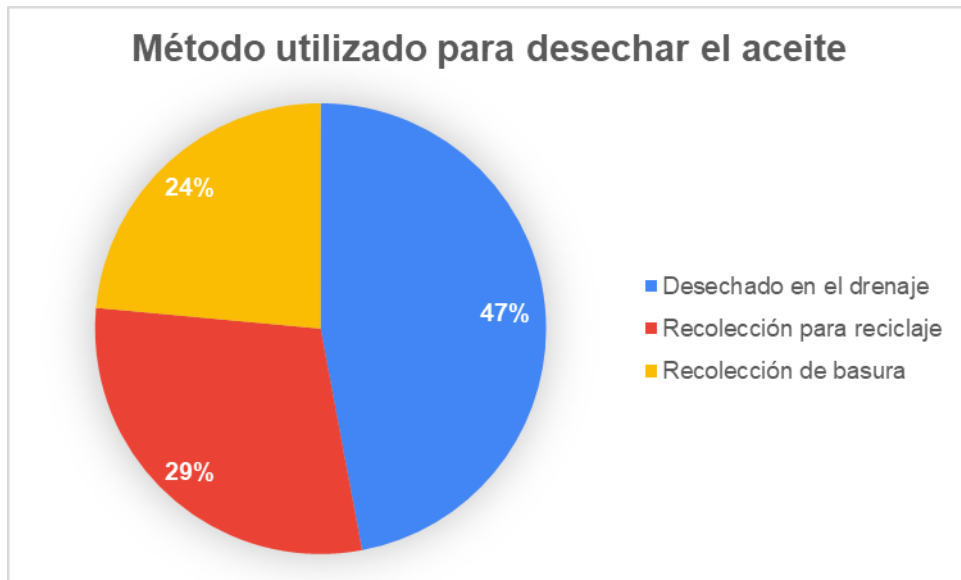
La gráfica 2 muestra que, dentro de la población encuestada, el 76% de los comercios presenta un consumo de entre 1 y 10 litros semanales, 12% consumen entre 11 y 20 litros, mientras que el 12 % restante consume en promedio más de 20 litros por semana.



Gráfica 2. Cantidad de aceite utilizado por semana en comercios en Izúcar de Matamoros.

Con la información anterior se tiene una idea aproximada del consumo de aceite vegetal, sólo en el centro del municipio, así como la cantidad de residuos que se estarían generando semanalmente.

De acuerdo con la gráfica 3, se observa que casi el 50% de los establecimientos encuestados se limitan a desechar el aceite residual directamente a los drenajes, lo cual genera un problema de contaminación. Sumado a lo anterior 24% desechan sus residuos mediante la recolección de basura, método que no garantiza que exista contaminación de suelos y mantos acuíferos. Sin embargo; se puede apreciar una tendencia al reciclaje que puede ser aprovechada para la implementación de futuros protocolos de recolección con el fin de reducir el impacto ambiental por estos residuos.



Gráfica 3. Métodos utilizados para desechar el aceite utilizado en establecimientos de preparación de alimentos en el centro de Izúcar de Matamoros.

Finalmente, como parte del instrumento aplicado en establecimientos de preparación de alimentos en el centro de Izúcar de Matamoros, una gran mayoría (88%) no estaría dispuesto a participar en un programa de reciclaje del aceite vegetal utilizado. El argumento mayoritario es que se carece de información respecto al daño que generan sus residuos y les resulta complicado almacenarlos después del proceso de freído.



Gráfica 4. Métodos utilizados para desechar el aceite utilizado en establecimientos de preparación de alimentos en el centro de Izúcar de Matamoros.

6.2. Índice de acidez

Los ácidos grasos libres presentes en la materia prima afectan el rendimiento de la reacción de transesterificación debido a que reaccionan con los catalizadores alcalinos como el KOH, produciendo emulsiones en una reacción de saponificación.

Los niveles de ácidos grasos libres en aceites vegetales suelen ser inferiores al 1%, mientras que en aceites vegetales reciclados son mayores al 5%. Un nivel de ácidos grasos libres en la materia prima debe ser menor del 1% antes de utilizar un catalizador alcalino en la reacción de transesterificación (Alptekin et al., 2014).

En este trabajo el índice de acidez y porcentaje de ácidos grasos libres se determinaron por triplicado tanto para el aceite comercial como para el aceite reciclado de acuerdo con la norma NMX-F-101-SCFI-2012.

Los ácidos grasos libres son expresados frecuentemente en términos del índice de acidez o en el porcentaje de ácidos grasos libres. El índice de acidez se define como el número de miligramos de hidróxido necesario para neutralizar un gramo de muestra. Para convertir el índice de acidez a porcentaje de ácidos grasos libres (como oleíco), se divide el índice de acidez por 1.99.

Los índices de acidez obtenidos para el aceite vegetal comercial y para el aceite reciclado fueron de 0.112 y 0.337 mg KOH/g, respectivamente. El porcentaje de ácidos grasos libres corresponde a un 0.06% y 0.17%, respectivamente para ambos aceites. Estos resultados son consistentes con lo marcado en la literatura para el aceite de canola (0.34%) (Sanford et al., 2009), lo cual indica que la degradación en el aceite reciclado es despreciable; por lo que se consideró como óptima la materia prima para llevar a cabo los procesos de transesterificación sin un tratamiento adicional previo.

6.3. Índice de saponificación

El índice de saponificación se define como los miligramos de KOH necesarios para saponificar un gramo de grasa o aceite. Con base en la longitud de los ácidos grasos presentes en la molécula de triacilglicerol, el peso de ésta cambia, lo que a su vez afecta la cantidad de KOH requerida para saponificarla. Por lo tanto, el índice de saponificación es una medida del peso molecular promedio o la longitud de la cadena de los ácidos grasos presentes. Como la mayor parte de la masa de un triglicérido depende de los tres ácidos grasos, permite la comparación de la longitud promedio de la cadena de ácidos grasos (Sanford et al., 2009).

El índice de saponificación se determinó por triplicado para el aceite comercial y para el aceite reciclado de acuerdo con la norma NMX-F-174-SCFI-2014. Se obtuvieron valores de 196 y 84 mg KOH/g. El valor para el aceite comercial está en concordancia con el reportado para el aceite de canola, el cual es de 189.80 mg KOH/g, éste es un valor típico para aceites que tienen mayoritariamente ácidos grasos con una longitud de cadena entre C16 y C18 (Sanford et al., 2009). En el caso del aceite reciclado el resultado indica la presencia de ácidos grasos con una longitud de cadena más larga que C18, esto permite la formación de ésteres de alquilo de cadena larga en la reacción de transesterificación.

Índices de saponificación más altos indican la presencia de longitudes de cadena más cortas o material saponificable por lo que en el caso de la materia prima utilizada no se favorece la saponificación de los triacilglicéridos.

6.4. Resultados de la reacción de transesterificación

Se realizaron 17 reacciones de transesterificación, en las cuales, se mantuvo constante la cantidad de materia prima, la agitación y la cantidad de reactivos empleados y se modificaron parámetros como el tipo de catalizador, el tipo de aceite (comercial o reciclado) y la temperatura de la reacción.

Lo anterior permitió estudiar si el uso de materiales inorgánicos era adecuado para acelerar la transesterificación de un aceite comercial y uno reciclado. En la Tabla 3 se resumen los datos asociados a cada reacción realizada. En cada caso, la reacción se realizó por duplicado bajo las mismas condiciones.

Tabla 3. Condiciones de las reacciones de transesterificación realizadas.

No. De reacción	Condiciones de reacción			
	Tipo de aceite	Catalizador	Temperatura/°C	Tiempo/min
1	Comercial	KOH	65	10
2	Comercial	KOH	60	10
3	Reciclado	KOH	65	10
4	Reciclado	KOH	60	10
5	Comercial	KOH + TiO ₂ NaOH	45	6
6	Reciclado	KOH + TiO ₂ NaOH	45	6
7	Comercial	KOH + TiO ₂ NaOH	40	6
8	Reciclado	KOH + TiO ₂ NaOH	40	6
9	Reciclado	KOH	50	10
10	Comercial	KOH + HTZn/Al	60	10
11	Comercial	KOH + HTZnMg/Al	60	10
12	Comercial	KOH + SBA-HTZn/Al	60	10
13	Comercial	KOH + HTLi/Al	60	10
14	Reciclado	KOH + HTZn/Al	60	10
15	Reciclado	KOH + HTZnMg/Al	60	10

16	Reciclado	KOH + SBA-HTZn/Al	60	10
17	Reciclado	KOH + HTLi/Al	60	10

Las reacciones de transesterificación tomadas como blanco se realizaron de acuerdo con la literatura (Medina Ramírez et al., 2012), obteniendo mejores resultados cuando la temperatura de trabajo se mantuvo en 60 °C durante 10 minutos. Se podría esperar que los resultados se favorecieran a una mayor temperatura; sin embargo, esto no ocurrió debido a que se trabajó en un reactor abierto y no bajo reflujo, por lo que a temperaturas superiores a 60 °C se producía evaporación del metanol.

Una vez establecidas las condiciones de reacción de referencia, las reacciones de transesterificación se realizaron adicionando un material inorgánico de prueba para estudiar su efecto sobre dicha reacción. Se trabajó con 5 materiales inorgánicos: TiO₂NaOH, HTZn/Al, HTZnMg/Al, SBA-HTZn/Al, y HTLi/Al, utilizando aceite comercial limpio y aceite reciclado. De los 5 materiales estudiados, únicamente se llevó a cabo la reacción con el material TiO₂NaOH. Como se puede observar en la tabla 3 cuando se empleó este material la transesterificación se llevó a cabo a una menor temperatura y disminuyendo el tiempo de reacción. Bajo estas condiciones se le puede considerar al material como un catalizador adecuado de la reacción de transesterificación.

Para el caso de los materiales HTZn/Al, HTZnMg/Al, SBA-HTZn/Al, y HTLi/Al, se mantuvieron las condiciones de las reacciones de referencia y se observó que, en estos casos, en vez de realizarse una transesterificación se realizaba una saponificación, observando jabón al finalizar el proceso. Esto puede atribuirse a las características estructurales de estos materiales, las cuales podrían favorecer la saponificación en vez de la transesterificación.

Para el caso de las reacciones en las que sí se obtuvieron resultados favorables, a decir de, la formación de una fase no polar de menor densidad con respecto a una fase polar con características similares a la glicerina, a los productos de reacción se les realizó la caracterización correspondiente. En la tabla 4 se muestra el volumen

obtenido de la fase no polar, así como su densidad y pH. Para el caso de la fase polar, no fue posible cuantificar estas propiedades, debido a que se obtuvo en pequeñas cantidades y su recuperación de los vasos de precipitados donde se recolectó fue complicada debido a su alta viscosidad. Para ambas fases se realizó la elucidación de grupos funcionales mediante espectroscopía de infrarrojo.

Tabla 4. Propiedades físicas de la fase no polar obtenida en la reacción de transesterificación.

No. De reacción	Propiedades de la fase no polar obtenida		
	Volumen / mL	Densidad / g·cm ⁻³	pH
1	94	0.8844	6
2	96	0.9184	6
3	94	0.9308	6
4	98	0.9004	6
5	96	0.9101	6
6	96	0.9104	6
7	98	0.9023	6
8	97	0.9200	6
9	92	0.9240	6

Como se puede ver en la tabla 4, la densidad de la fase no polar, cuya composición se asume a ésteres de metilo, corresponde con la densidad obtenida para esta reacción utilizando aceite de canola (Sanford et al., 2009).

Los valores de referencia establecidos en la bibliografía especializada para la densidad de los metil ésteres en el biodiesel oscilan típicamente entre 0.86 y 0.90 g/cm³ a una temperatura de 20 °C. Estos valores son importantes para evaluar la calidad y las propiedades del biodiesel, ya que una densidad fuera de este rango puede indicar impurezas o variaciones en la composición química del biocombustible.

Los resultados obtenidos confirmaron que la densidad de los metil ésteres en la muestra de biodiesel es concordante con los valores de referencia establecidos en la bibliografía. Estos resultados validan la calidad y consistencia del biodiesel

producido, asegurando que cumple con los estándares requeridos para su uso como combustible alternativo.

Por otro lado, como se aprecia en la Tabla 4, el volumen promedio obtenido para la fase orgánica fue de 96 mL. Esto puede ser un indicativo del rendimiento de la reacción, en donde a mayor volumen producido de la fase orgánica respecto a la cantidad de aceite utilizado, la reacción resulta más eficiente.

Es importante tener en cuenta que el rendimiento de la transesterificación puede verse afectado por diferentes factores, como la calidad del aceite utilizado, la cantidad del catalizador, la temperatura y el tiempo de reacción. Estos factores pueden influir en la eficiencia de la reacción y, por lo tanto, en el rendimiento final.

En resumen, el rendimiento de la transesterificación de 100 ml de aceite que ha dado como resultado 96 ml de biodiesel es del 96%. Este rendimiento indica una conversión exitosa del aceite en biodiesel y refleja una alta eficiencia del proceso de transesterificación propuesto.

6.5. Elucidación de grupos funcionales mediante espectroscopía de infrarrojo

La elucidación de grupos funcionales se realizó mediante espectroscopía infrarroja (IR). Esta técnica ampliamente utilizada permite relacionar la vibración de un enlace químico con una banda de absorción a una determinada frecuencia e intensidad. Con esta técnica se corroboró que los productos de las reacciones corresponden con aquellos esperados en la reacción de transesterificación. En esta reacción los productos obtenidos son metil ésteres y glicerina, por tanto, se espera obtener las señales características en IR para los grupos funcionales presentes en estos compuestos.

Las Figuras 5 a 13 muestran los espectros de infrarrojo más representativos obtenidos a partir de la caracterización de la fase no polar producida en cada una de las reacciones de transesterificación indicadas en la Tabla 3. Se puede observar que, en todos los casos, los espectros son muy similares entre sí, y corresponden a los metil ésteres esperados de acuerdo con lo que se describe a continuación.

En dichas figuras, se puede observar la presencia de bandas intensas en la región de 3000 – 2800 cm^{-1} las cuales se atribuyen a los modos vibracionales de estiramiento simétrico y asimétrico de los enlaces C–H. Asimismo, en la región de 1750 – 1740 cm^{-1} , se observa una banda de gran intensidad, característica del modo vibracional de estiramiento del grupo carbonilo (C=O) presente en los ésteres. Finalmente, en la región de 1500 a 1100 cm^{-1} se aprecian otras bandas de intensidad moderada correspondientes a grupos alifáticos. Estos resultados son consistentes con datos de espectroscopía infrarroja reportados en la literatura (Romero et al., 2016) para metil ésteres obtenidos de reacciones de transesterificación de aceite vegetal reciclado.

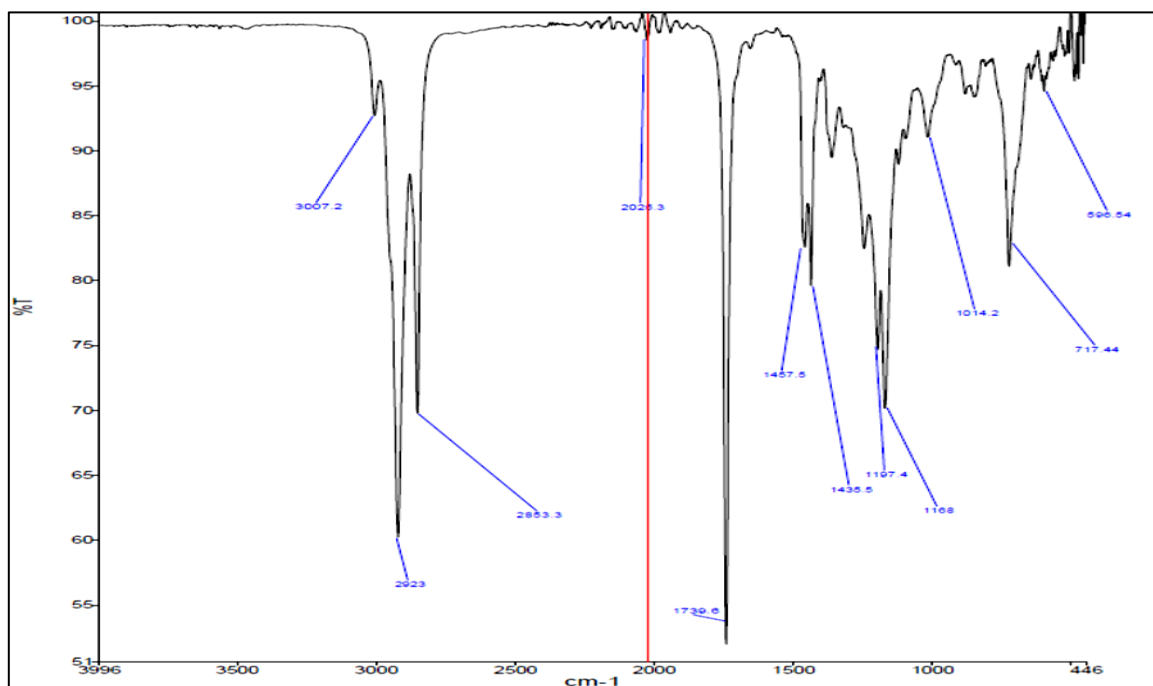


Figura 5. Espectro de infrarrojo correspondiente a la fase no polar de la reacción 1.

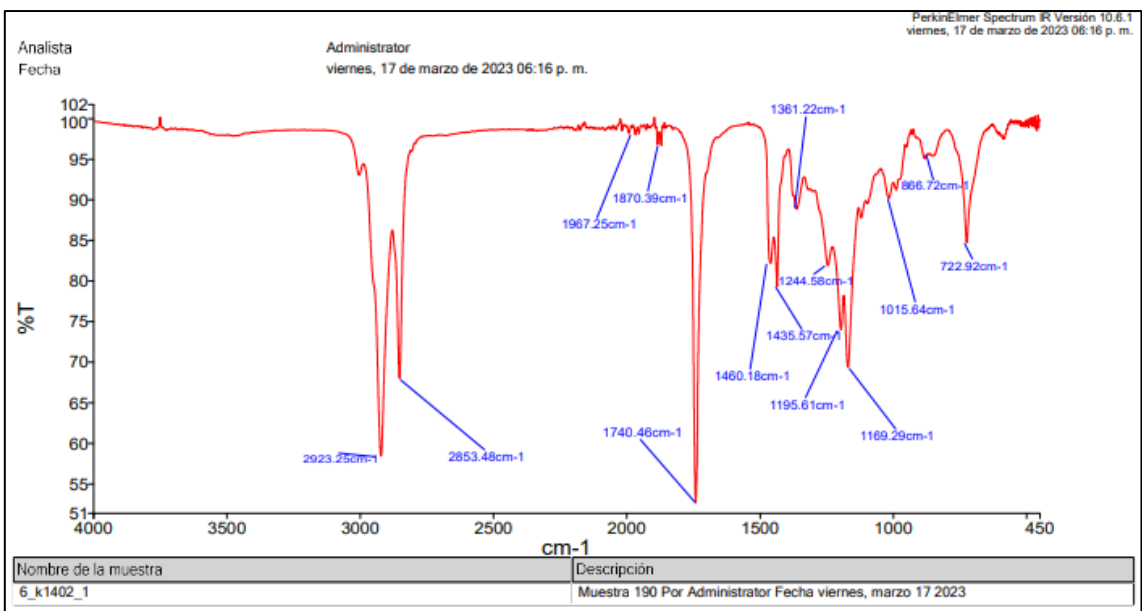


Figura 6. Espectro de infrarrojo correspondiente a la fase no polar de la reacción 2.

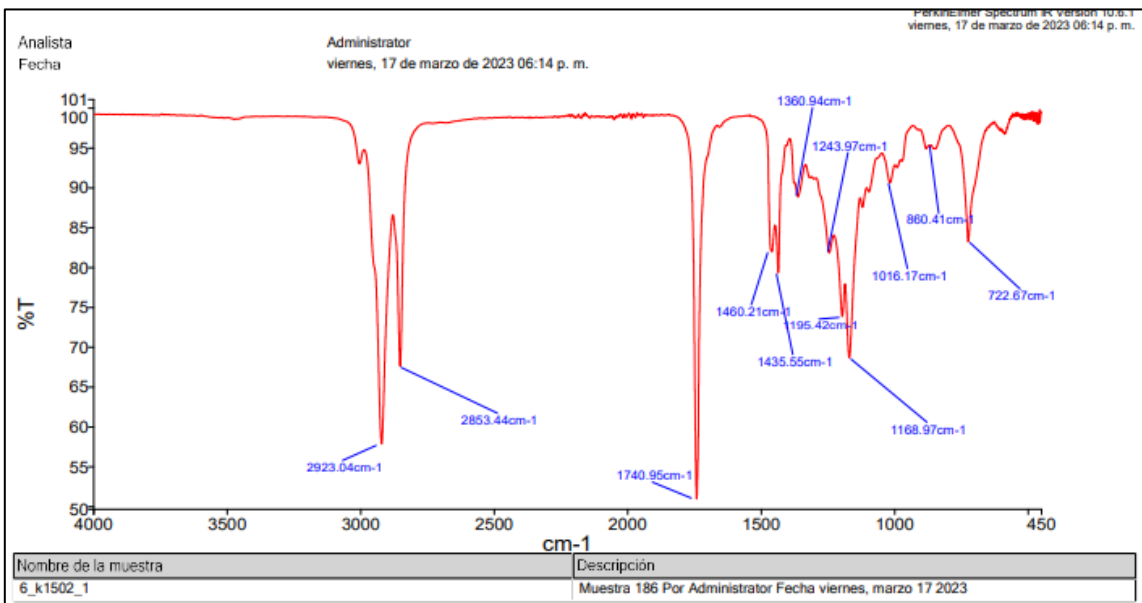


Figura 7. Espectro de infrarrojo correspondiente a la fase no polar de la reacción 3.

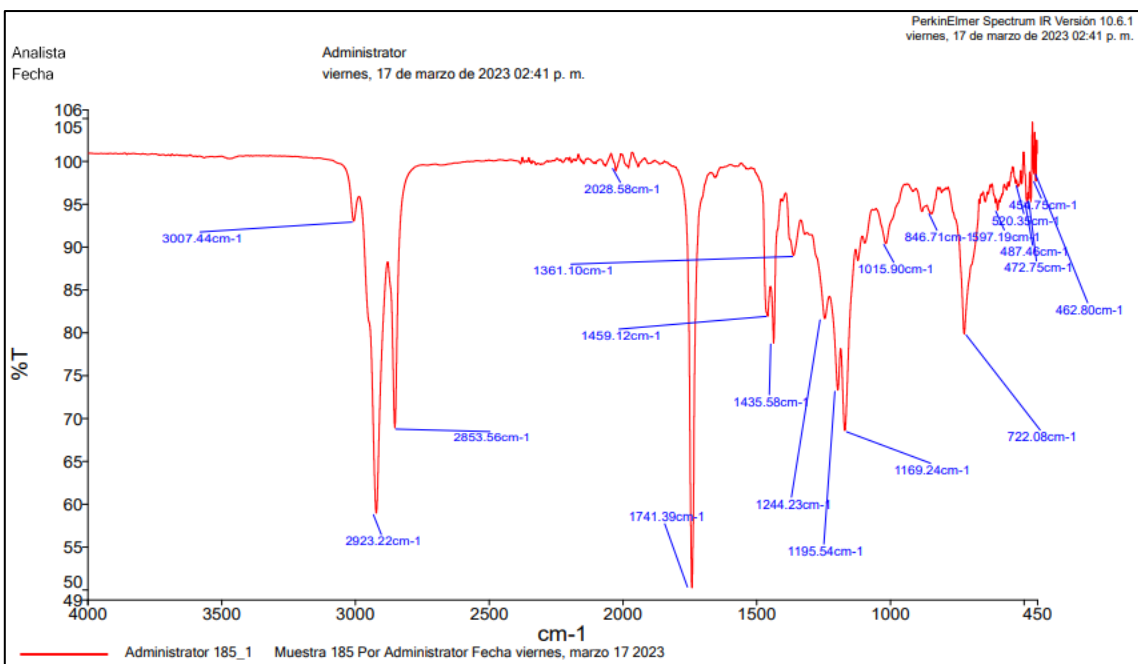


Figura 8. Espectro de infrarrojo correspondiente a la fase no polar de la reacción 4.

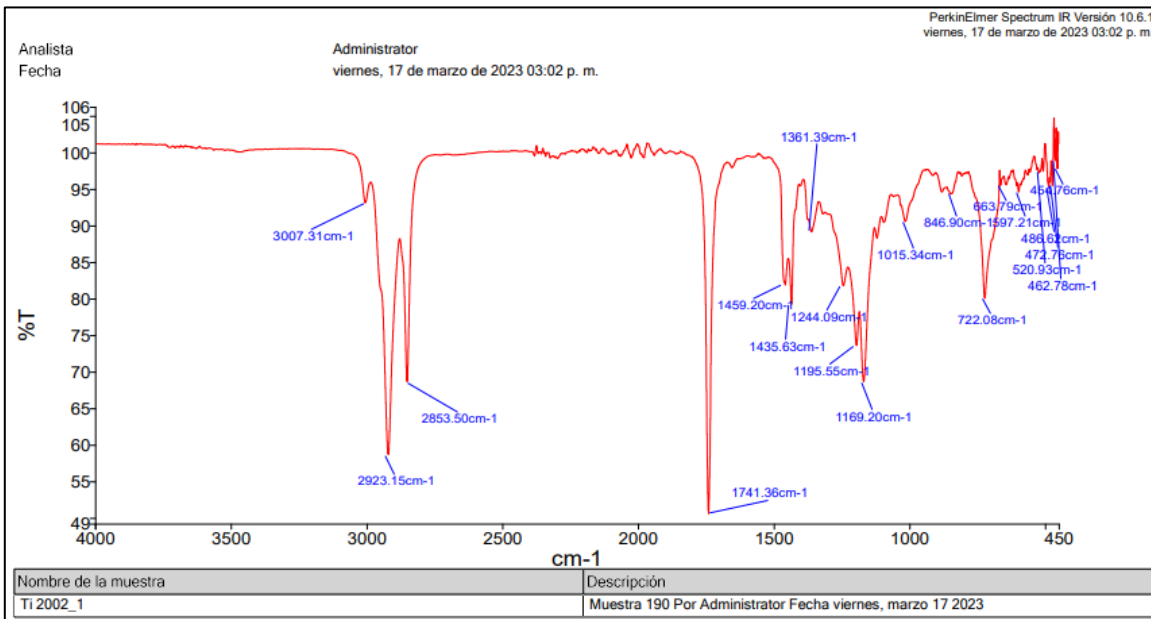


Figura 9. Espectro de infrarrojo correspondiente a la fase no polar de la reacción 5.

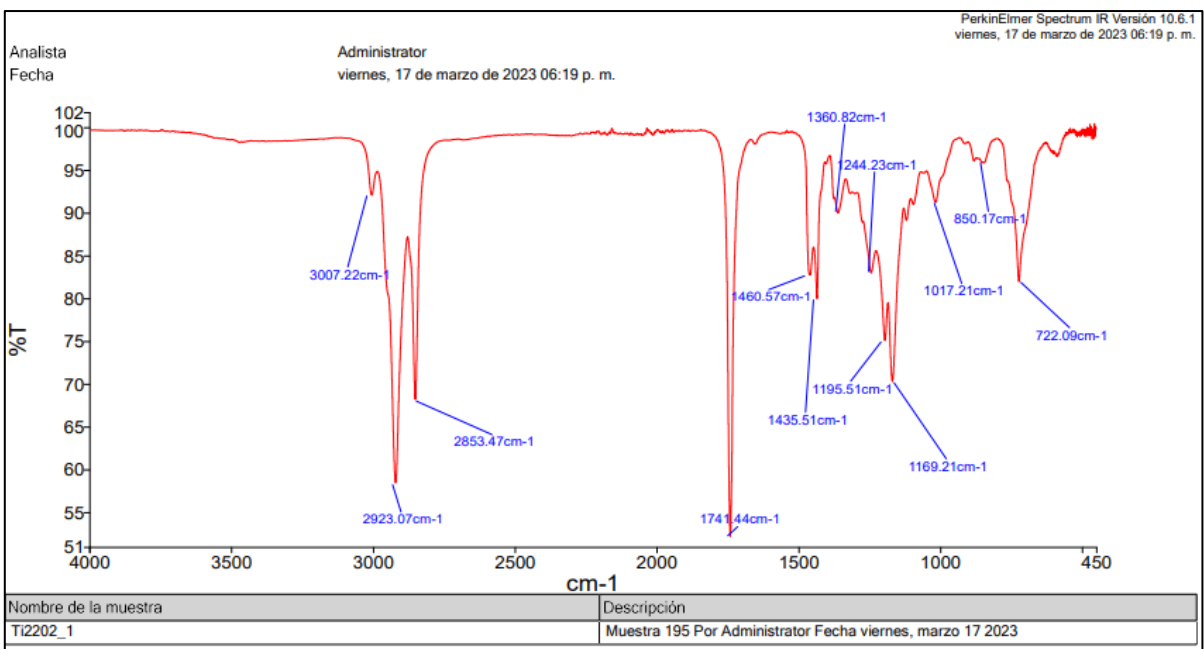


Figura 10. Espectro de infrarrojo correspondiente a la fase no polar de la reacción 6.

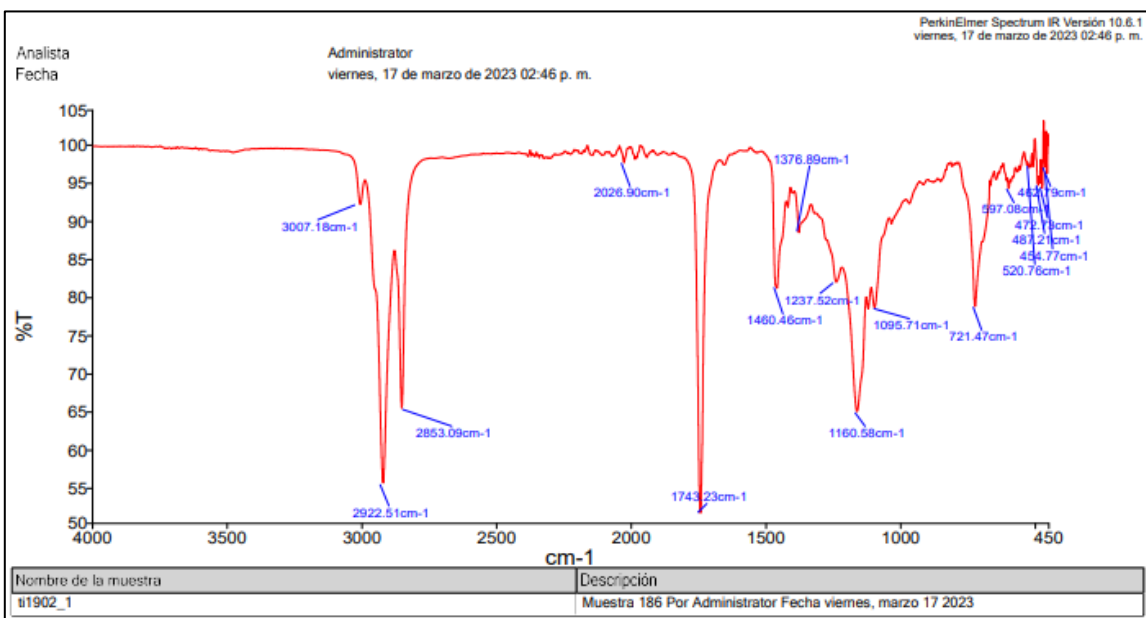


Figura 11. Espectro de infrarrojo correspondiente a la fase no polar de la reacción 7.

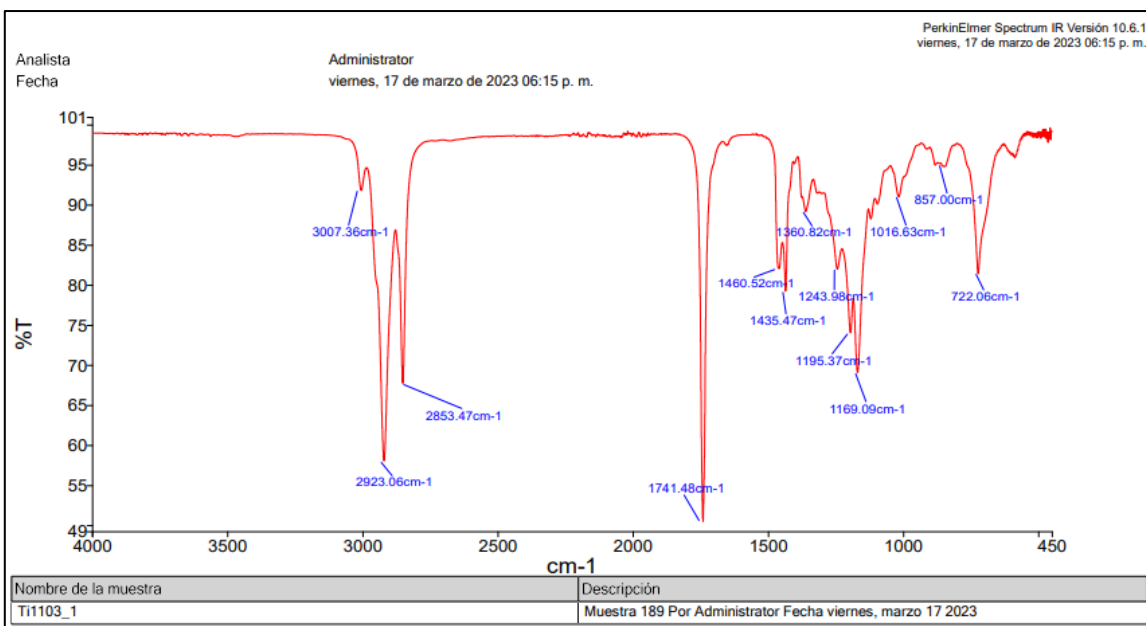


Figura 12. Espectro de infrarrojo correspondiente a la fase no polar de la reacción 8.

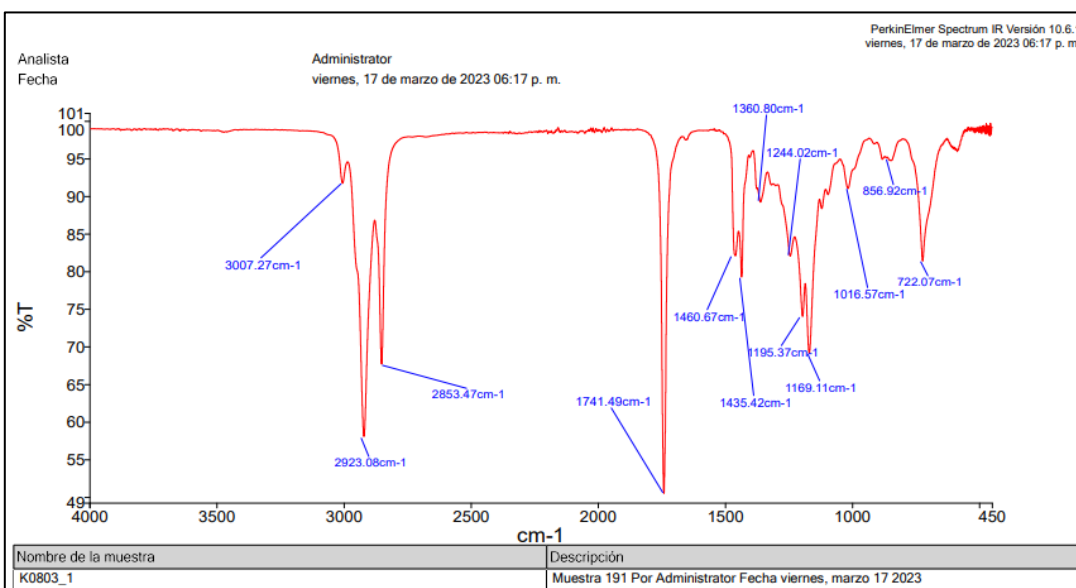


Figura 13. Espectro de infrarrojo correspondiente a la fase no polar de la reacción 9.

Por otro lado, los espectros de la fase polar se muestran en las figuras 14 y 15. Ambos espectros son similares y se pueden observar las bandas correspondientes al modo vibracional de estiramiento del enlace O–H, las cuales se encuentran en la

región entre 3200 y 3600 cm^{-1} , con una intensidad característica de este enlace. Al comparar estos espectros con los de la literatura, se confirma que la fase polar corresponde a la formación de glicerol. Para esta fase, únicamente fue posible realizar 2 caracterizaciones por IR dadas las cantidades y características de la muestra obtenida.

La caracterización realizada por espectroscopía infrarroja permitió corroborar que se obtuvieron los productos esperados para las reacciones de transesterificación 1 a 9. En el caso de las reacciones 10 a 17, no se realizó la caracterización de los productos ya que estos presentaron características distintas a las esperadas.

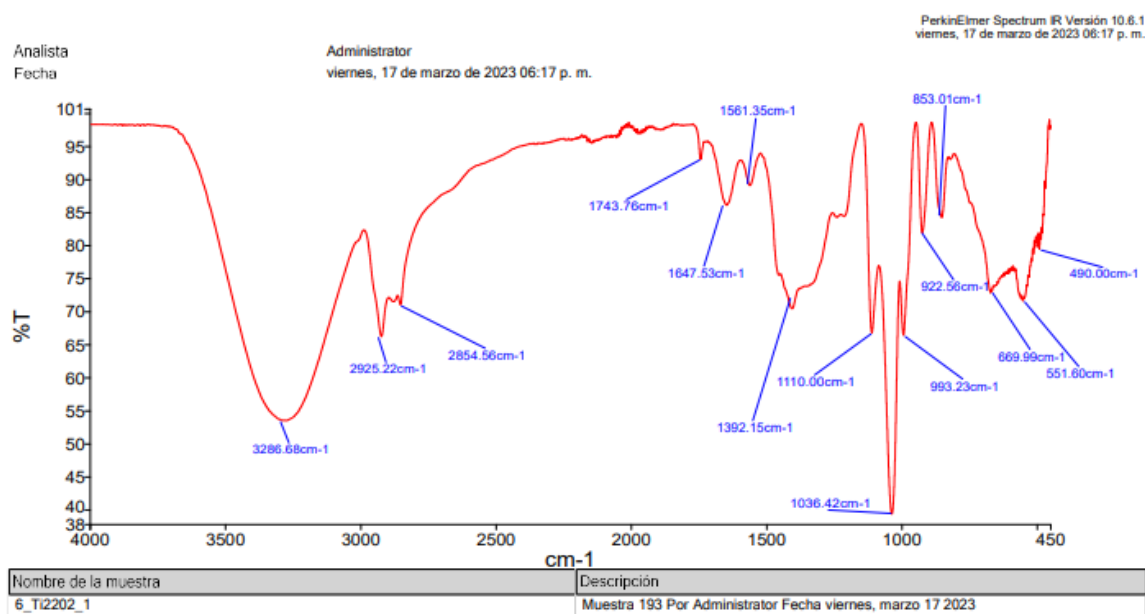


Figura 14. Espectro de infrarrojo correspondiente a la fase polar de la reacción 6.

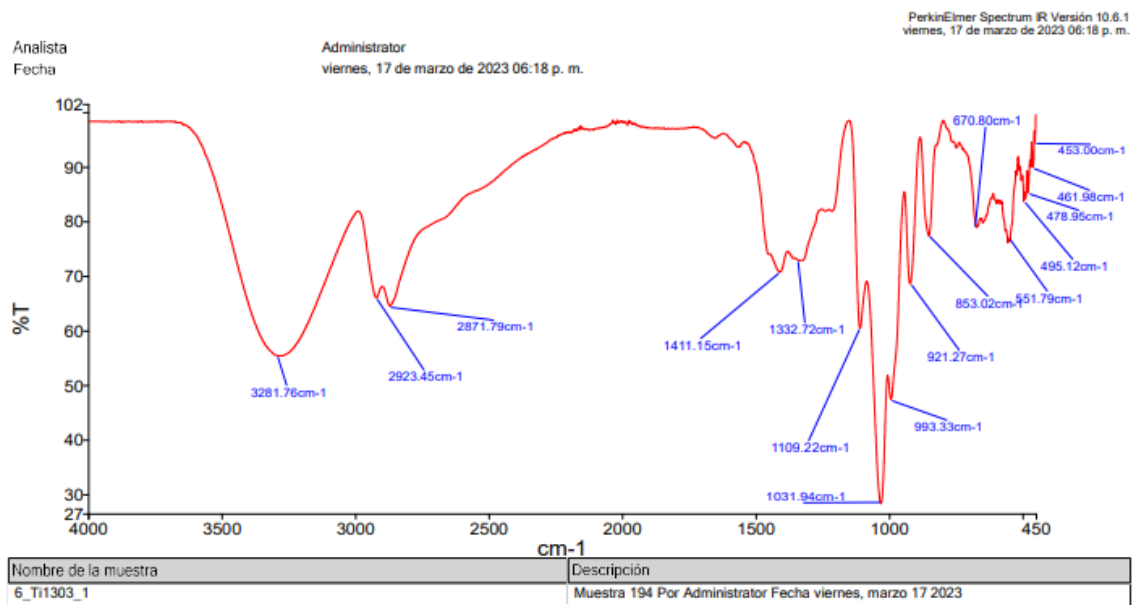


Figura 15. Espectro de infrarrojo correspondiente a la fase no polar de la reacción 8.

7. CONCLUSIONES

1. Se realizaron reacciones de transesterificación utilizando como materia prima aceite vegetal comercial y aceite reciclado. A partir de las reacciones con aceite vegetal comercial, se encontró que las condiciones óptimas para llevar a cabo este proceso fueron a 60 °C durante 10 minutos. Esto sirvió como referencia para el resto de las reacciones realizadas.
2. Una vez establecidas las condiciones más óptimas de reacción, tanto para el aceite comercial como para el reciclado, se probaron 5 materiales inorgánicos como posibles catalizadores heterogéneos. Se encontró que únicamente el material TiO_2/NaOH es el que presentó propiedades catalíticas favorables con ambos tipos de aceites. Esto se puede atribuir a las características alcalinas de este material que favorecen el proceso de transesterificación, lo cual se observa en una reducción del tiempo de reacción (6 minutos) y a una menor temperatura (40–45 °C) con respecto a las condiciones de referencia. Por tanto, se propone a este material como un catalizador heterogéneo adecuado para la reacción de transesterificación.
3. Los materiales HTZn/Al , HTZnMg/Al , $\text{SBA-HTZn}/\text{Al}$ y HTLi/Al no presentaron propiedades catalíticas favorables para la reacción de transesterificación. Por el contrario, el uso de estos materiales provoca una reacción de saponificación, proceso indeseable para los objetivos de este trabajo.
4. Independiente de las condiciones de reacción, en las reacciones en las cuales la transesterificación se llevó a cabo, se obtuvieron los productos característicos esperados, tanto para la fase no polar como para la fase polar. Lo anterior fue corroborado mediante espectroscopía de infrarrojo, con la cual fue posible la elucidación de los grupos funcionales característicos tanto para los metil ésteres y para el glicerol.

8. RECOMENDACIONES

- Probar los materiales inorgánicos utilizados en otros tipos de aceites vegetales y en grasas animales para establecer su eficiencia en los mismos.
- Determinar el poder calorífico de los metil ésteres y establecer si existe diferencia significativa cuando se modifican las condiciones de la reacción.
- Analizar los productos de reacción obtenidos con los materiales inorgánicos en los cuales no se llevó a cabo la reacción de transesterificación y establecer la viabilidad de obtener otros productos de interés práctico.
- Escalar la reacción para corroborar si se mantienen las relaciones de volumen entre el aceite usado con el volumen de metil ésteres obtenidos y establecer su viabilidad.
- Diseñar un plan de recolección de aceite usado en el centro del municipio de Izúcar de Matamoros para su posterior tratamiento y/o desecho adecuado.

REFERENCIAS

- Agudelo Santamaría, J. R., Benjumea, P., Gómez Meneses, E., & Pérez Bayer, J. F. (2003). Biodiesel. Una revisión del desempeño mecánico y ambiental. *Ingeniería y Desarrollo*, 13, 1-14.
- Alptekin, E., Canakci, M., & Sanli, H. (2014). Biodiesel production from vegetable oil and waste animal fats in a pilot plant. *Waste Management*, 34(11), 2146-2154.
- Álvarez Barrera, D. (2014). Análisis de factibilidad del proceso de producción de biodiésel por medio de mezclas de aceites vegetales (Tesis doctoral). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.
- Álvarez, J. A. (2013). Obtención de biodiesel a partir de aceites usados en casa habitación de la comunidad del Refugio (Tesis de maestría). Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C., México.
- Aransiola, E. F., Ojumu, T. V., Oyekola, O. O., Madzimbamuto, T. F., & Ikhu-Omoregbe, D. I. O. (2014). A review of current technology for biodiesel production: State of the art. *Biomass and bioenergy*, 61, 276-297.
- ASTM International. (2018). Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels. ASTM D6751-18.
- Badui Dergal, S. (2006). Química de los alimentos. 4ª ed. Pearson Educación, México.
- Basha, S. A., Gopal, K. R., & Jebaraj, S. (2009). A review on biodiesel production, combustion, emissions and performance. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13, 1628-1634.
- Benedicto, G. P. (2019). Producción de biodiesel por catálisis heterogénea: diseño y aplicación de catalizadores, orientados a su aplicación industrial en plantas modulares (Tesis doctoral). Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.
- Blumberg, K., Walsh, C., & Pera, K. (2003). Gasolina y diesel de bajo azufre: la clave para disminuir las emisiones vehiculares. *Obtenido de https://www.theicct.org/sites/default/files/Bajo_Azufre_ICCT_2003.pdf*
- Caballero Moreno, E. A., Vidal López, J. C., Morgan López, C. A., Espinosa Ovando, M., & Roblero González, I. A. (2012). Aceites reciclados de cocina como materia prima de próxima generación para la obtención de biodiésel en Chiapas. *Ide@s CONCYTEG*, 7, 895-910.
- Campos Uriarte, C. M., Delgado Saavedra, H. A. G., Esquivel Chávez, J. D., Samamé Salazar, J. L. J., & Sirlupú Zapata, J. D. (2018). Diseño de la línea de producción para la elaboración de biodiesel a partir de aceite residual recolectado de la industria chiflera piurana. Universidad de Piura, Perú.

Canakci, M., & Van Gerpen, J. (2001). Biodiesel production from oils and fats with high free fatty acids. *Transactions of the ASAE*, 44, 1429-1436.

Canola Council of Canada. 03 de agosto 2023. <https://www.canolacouncil.org/about-canola/oil/#culinary-qualities>

Castellar Ortega, G. C., Angulo Mercado, E. R., & Cardozo Arrieta, B. M. (2014). Transesterification vegetable oils using Heterogeneous catalysts. *Prospectiva*, 12, 90-104.

Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology advances*, 25, 294-306.

Darnoko, D., & Cheryan, M. (2000). Kinetics of palm oil transesterification in a batch reactor. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 77, 1263-1267.

Del Petróleo, I. M. (2014). El IMP desarrolla catalizador altamente activo para producir biodiesel. gob.mx. Boletín de prensa 031. Obtenido de: <https://www.gob.mx/imp/prensa/el-imp-desarrolla-catalizador-altamente-activo-para-producir-biodiesel> [Fecha de última consulta 11 de diciembre de 2023].

Demirbas, A. (2007). Importance of biodiesel as transportation fuel. *Energy policy*, 35, 4661-4670.

Demirbas, A. (2008). *A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines*. Springer, London.

Demirbas, A. (2009). Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy conversion and management*, 50, 14-34.

Dufey, A. (2006). *Producción y comercio de biocombustibles y desarrollo sustentable: los grandes temas*. International Institute for Environment and Development, London.

Encinar, J. M., González, J. F., Martínez, G., & Nogales-Delgado, S. (2021). Use of NaNO₃/SiAl as Heterogeneous Catalyst for Fatty Acid Methyl Ester Production from Rapeseed Oil. *Catalysts*, 11, 1405.

Faife-Pérez, E., Otero-Rambla, M. A., & Alvarez-Delgado, A. (2012). Producción de biodiesel a partir de microorganismos oleaginosos. Una fuente de energía renovable. Parte I. Levaduras y bacterias. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 46, 22-32.

Ferney Virgüez J., Castro Silva H. F., & Cortés Cortés W. E. Características sociodemográficas de los consumidores de comida mexicana "TEX-MEX" en Cali-Colombia. *Revista Boletín Redipe*, 8, 182-97.

Freedman, B., Butterfield, R. O., & Pryde, E. H. (1986). Transesterification kinetics of soybean oil 1. *Journal of the American oil chemists' society*, 63, 1375-1380.

Gaceta oficial de la Ciudad de México. (2018). Aviso por el que se da a conocer la norma ambiental para el Distrito Federal NADF012-AMBT-2015, que establece las condiciones y especificaciones técnicas para el manejo integral de grasas y aceites de origen animal y/o vegetal residuales en el territorio de la Ciudad de México. Obtenido de http://data.sedema.cdmx.gob.mx/nadf24/images/infografias/GACETA%20OFICIAL%20431_NORMA%20GRASAS%20Y%20ACEITES.pdf

Gómez, M. A. C., Tirado, D. A. M., & Posada, J. L. P. (2013). Desarrollo, producción y beneficio ambiental de la producción de microalgas. La experiencia en La Guajira, Colombia. *Ambiente y Desarrollo*, 17, 113-126.

González Canal, I., & González Ubierna, J. A. (2015). Aceites usados de cocina. Problemática ambiental, incidencias en redes de saneamiento y coste del tratamiento en depuradoras. *Aguasresiduales. Info*, 1-8.

Helwani, Z., Othman, M. R., Aziz, N., Fernando, W. J. N., & Kim, J. (2009). Technologies for production of biodiesel focusing on green catalytic techniques: A review. *Fuel Processing Technology*, 90, 1502-1514.

Hernández, P. N. B., Santamaría, J. R. A., & Rios, L. A. (2009). Biodiesel: Producción, calidad y caracterización. Universidad de Antioquia.

Hodson de Jaramillo, E., Henry, G., Trigo, E. (2019). La bioeconomía. Nuevo marco para el crecimiento sostenible en América Latina: Bioeconomy. New framework for sustainable growth in Latin America. Editorial Pontificia Universidad Javeriana, Colombia.

IEA (2018), Renewables 2018, Analysis and Forecasts to 2023. IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/renewables-2018>, License: CC BY 4.0

IEA, Renewable energy in transport by fuel in 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/renewable-energy-in-transport-by-fuel-in-2023>, IEA. Licence: CC BY 4.0

Knothe, G. (2005). Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. *Fuel Processing Technology*, 86, 1059-1070.

Knothe, G. (2010). Biodiesel and renewable diesel: a comparison. *Progress in energy and combustion science*, 36, 364-373.

Kusdiana, D., & Saka, S. (2001). Kinetics of transesterification in rapeseed oil to biodiesel fuel as treated in supercritical methanol. *Fuel*, 80, 693-698.

Langle, A., González-Coronel, M. A., Carmona-Gutiérrez, G., Moreno-Rodríguez, J. A., Venegas, B., Muñoz, G., Treviño, S., & Díaz, A. (2015). Stevia rebaudiana loaded

titanium oxide nanomaterials as an antidiabetic agent in rats. *Revista Brasileira De Farmacognosia*, 25, 145-151.

Leung, D. Y. C., Wu, X., & Leung, M. K. H. (2010). A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied Energy*, 87, 1083-1095.

Llanes Cedeño, E. A., Rocha-Hoyos, J., Salazar Alvear, P., & Medrano Barboza, J. (2017). Producción e impacto del biodiesel: una revisión. *INNOVA Research Journal*, 2, 59-76.

López, L., Bocanegra, J., & Malagón-Romero, D. (2015). Obtención de biodiesel por transesterificación de aceite de cocina usado. *Ingeniería y Universidad*, 19, 155-172.

Ma, F., & Hanna, M. A. (1999). Biodiesel production: a review. *Bioresource technology*, 70, 1-15.

Machado, C. M. M. (2010). Situación de los Biocombustibles de 2da y 3era Generación en América Latina y Caribe. Organización Latinoamericana de Energía-IICA.

Martín, E. P., Martínez, M. S., Rodríguez, M. S., Rodríguez, M. M., & Mira, J. A. (2015). Procesos químicos: transesterificación y producción de biodiésel. In *Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética*, Ediciones Mundi.Prensa, 285.

McMurry, J. (2018). Química orgánica, 9ª Ed. Cengage Learning.

Medina Ramírez, I. E., Chávez Vela, N. A., & Jáuregui Rincón, J. (2012). Biodiesel, un combustible renovable. *Investigación y Ciencia*, 20, 62-70.

Meher, L. C., Sagar, D. V., & Naik, S. N. (2006). Technical aspects of biodiesel production by transesterification—a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 10, 248-268.

Méndez Mesa, E. (2019). Estudio de viabilidad de la instalación de una planta de producción de biodiesel a partir de aceites de fritura usados domésticos (Tesis de grado). Universidad de La Laguna, España.

Meng, X., Yang, J., Xu, X., Zhang, L., Nie, Q., & Xian, M. (2009). Biodiesel production from oleaginous microorganisms. *Renewable Energy*, 34, 1-5.

Mora Montañez, B. P. (2008). Estudio de expectativas de consumo de glicerina en los sectores farmacéutico, petroquímico, línea de hogar y aseo, químicos y derivados y tinturas y pinturas en Colombia (Tesis de grado). Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.

Norma Mexicana NMX-F-101-SCFI-2012. Alimentos – Aceites y grasas vegetales o animales – Determinación de ácidos grasos libres – Método de prueba.

Norma Mexicana NMX-F-152-SCFI-2011. Alimentos – Aceites y grasas vegetales o animales – Determinación del índice de yodo por el método ciclohexano – Método de prueba.

Norma Mexicana NMX-F-154-SCFI-2010. Alimentos – Aceites y grasas vegetales o animales – Determinación del valor de peróxido – Método de prueba.

Norma Mexicana NMX-F-174-SCFI-2014. Alimentos – Aceites y grasas vegetales o animales – Determinación del índice de saponificación – Método de prueba.

Nudelman, N. (Ed.). (2004). Química sustentable. Universidad Nac. del Litoral.

Pandey, V. C., Singh, K., Singh, J. S., Kumar, A., Singh, B., & Singh, R. P. (2012). *Jatropha curcas*: A potential biofuel plant for sustainable environmental development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 2870-2883.

Ramírez Nieves T. (2018). Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de aceites y grasas residuales potenciales para la producción de biocombustibles (Tesis de maestría). Centro de investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S.C., México.

Ramos, F. D., Díaz, M. S., & Villar, M. A. (2016). Biocombustibles. *Ciencia Hoy*, 25, 69-73.

Ranganathan, S. V., Narasimhan, S. L., & Muthukumar, K. (2008). An overview of enzymatic production of biodiesel. *Bioresource Technology*, 99, 3975-3981.

Reategui Romero, W., & Salas Barrera, F. J. (2013). Estudio del proceso de transesterificación para la obtención de biodiesel a partir del aceite de palma en un reactor por lotes. *Producción+ Limpia*, 8, 119-134.

Rivera-Pérez, C., & García-Carreño, F. (2007). Enzimas Lipolíticas y su Aplicación en la Industria del Aceite. *BioTecnología*, 11(2), 37-45.

Rodríguez Lizama, F. V. (2017). Síntesis de un catalizador bifuncional para (Hidro) desoxigenación de aceites (Tesis de Maestría). Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C., México.

Rodríguez, A., & Ramos, L. B. (2011). Catálisis heterogénea: Preparación de catalizadores sólidos (Parte I). *Tecnología Química*, 32, 226-323.

Rodríguez-Álvarez, A., Rodríguez-Flores, M. J., Ortiz-Medina, R. A., Maldonado-Ruelas, V. A., & Aguirre-Sámano, J. F. (2019). Characterization of Biodiesel Obtained from Vegetable Oil; Conventional and Residual. *ECS Transactions*, 94, 311-327.

Romero, M. J. A., Pizzi, A., Toscano, G., Busca, G., Bosio, B., & Arato, E. (2016). Deoxygenation of waste cooking oil and non-edible oil for the production of liquid hydrocarbon biofuels. *Waste Management*, 47, 62-68.

Rothenberg, G. (2017). *Catalysis: concepts and green applications*. 2^a ed. John Wiley & Sons.

Salinas Callejas, E., & Gasca Quezada, V. (2009). Los biocombustibles. *El Cotidiano*, 157, 75-82.

Sanford, S. D., White, J. M., Shah, P. S., Wee, C., Valverde, M. A., & Meier, G. R. (2009). Feedstock and biodiesel characteristics report. Renewable Energy Group, 416, 1-136.

Srivastava, A., & Prasad, R. (2000). Triglycerides-based diesel fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4, 111-133.

Suarez, P. A. Z., & Meneghetti, S. M. P. (2007). 70^o aniversário do biodiesel em 2007: evolução histórica e situação atual no brasil. *Química Nova*, 30, 2068-2071.

Thomas, J. M., & Thomas, W. J. (2014). *Principles and practice of heterogeneous catalysis*. 2^a ed. John Wiley & Sons.

Torroba, A. (2021). Biocombustibles líquidos: Institucionalidad y formulación de políticas públicas. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica: IICA. Obtenido de: <https://repositorio.iica.int/handle/11324/18566> [Fecha de última consulta 6 de junio de 2023].

U.S. Soybean Export Council (2007). *Glycerin Market Analysis*. Indianapolis, ABG.

Valencia, M. J., Cerón, I. X., & Cardonac, C. A. (2011). Estimación de procesos de aprovechamiento usando residuos no agrícolas como materias primas. *Vector*, 6, 71-78.

Vargas Corredor, Y. A., & Pérez Pérez, L. I. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 1, 59-72.

Vázquez Castillo, D. N. (2020). Síntesis y caracterización de catalizadores heterogéneos para su uso en la producción de biodiesel (Tesis de Maestría). Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, México.

Vicente, G., Bautista, L. F., Gutiérrez, F. J., Rodríguez, R., Martínez, V., Rodríguez-Frómata, R. A., Ruiz-Vázquez, R. M., Torres-Martínez, S. & Garre, V. (2010). Direct Transformation of Fungal Biomass from Submerged Cultures into Biodiesel. *Energy Fuels*, 24, 3173-3178.

Zanella, R. (2012). Metodologías para la síntesis de nanopartículas: controlando forma y tamaño. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 5, 69-81.

Zanella, R., Rodríguez-González, V., Arzola, Y., & Moreno-Rodriguez, A. (2011). Au/Y-TiO₂ Catalyst: High Activity and Long-Term Stability in CO Oxidation. *ACS Catalysis*, 2, 1-11.

Zanella, R. (2012). Metodologías para la síntesis de nanopartículas: controlando forma y tamaño. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 5, 69-81.