

VALORIZACIÓN DEL ACEITE RESIDUAL DE COCINA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL: EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE SÍNTESIS

Miriam Mayela Alcocer-Anaya ^a, Guillermo Manuel González-Guerra ^{b,c*},
Fernando Israel Gómez-Castro ^c, Gustavo Cruz-Jiménez ^d, Salvador Hernández ^c.

^a Departamento de Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Cerro de la Venada S/N, Guanajuato, Guanajuato, México 36040.

^b SECIHTI, Avenida Insurgentes Sur 1582, Crédito Constructor, Ciudad de México, 03940, México.
gm.gonzalezguerra@ugto.mx

^c Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Noria Alta S/N, Guanajuato, Gto., 36050, México.

^d Departamento de Farmacia, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Noria Alta S/N, Guanajuato, Gto., 36050, México.

Resumen

En el presente trabajo, se reporta la síntesis de biodiésel a partir de aceite de soya de desecho, con el objeto de darle un segundo uso y reducir el impacto ambiental asociado al aceite desechado en el uso doméstico, ya que genera una gran contaminación de agua por no darle el tratamiento requerido. Asimismo, se realiza la conversión de aceite de soya nuevo como sistema de referencia. Cabe mencionar, que a pesar de que existe un gran número de trabajos que reportan la producción de este biocombustible a partir de diferentes materiales, no hay reproducibilidad en las condiciones de reacción, lo que ocasiona problemáticas al momento de escalar y aplicar estas metodologías. Se analizaron las condiciones óptimas para la obtención los productos de transesterificación, realizando un diseño de experimentos de las variables: tipo de catalizador (ácido y básico), su relación molar y temperatura. Se obtuvieron veinte productos con rendimientos del 40 % al 94 %; realizando la caracterización fisicoquímica y estructural de

muestras seleccionadas. Estas muestras cumplen con las propiedades de la norma ASTM D2274, y dan como resultado un porcentaje de conversión de 66.88%, 92.06 %, 78.29 % y 83.46 % respectivamente. Asimismo, se obtuvo la caracterización estructural por espectroscopia infrarroja y cromatografía de gases de los productos, observando que presentan la composición reportada para el biodiésel de aceite de soya. De este modo, se obtuvieron productos bajo condiciones de síntesis, composición y porcentajes de conversión adecuados para la producción de biodiésel a partir de aceite de desecho y aceite nuevo.

Palabras clave: biodiésel; transesterificación; diseño de experimentos; porcentaje de conversión.

VALORIZATION OF WASTE COOKING OIL FOR THE PRODUCTION OF BIODIESEL: EVALUATION OF THE SYNTHESIS CONDITIONS

Abstract

In the present work, biodiesel synthesis from waste soybean oil is reported to give it a second use and reduce the environmental impact associated with waste cooking oil in domestic use, since it generates significant water contamination when it is not properly disposed. Likewise, the conversion of new soybean oil is carried out as a reference system. It is worth mentioning that although many works report the production of this biofuel from different materials, there is the need of ensuring the reproducibility in the reaction conditions; otherwise, problems may arise when scaling and applying these methodologies. The optimal conditions for obtaining the transesterification products were analyzed, carrying out a design of experiments for the variables: type of catalyst (acid and basic), its molar ratio, and temperature. Twenty products were obtained with yields from 40 % to 94 %, performing the physicochemical and structural characterization of selected samples. These samples comply with the properties of ASTM D2274 and result in a percentage conversion of 66.88 %, 92.06 %, 78.29 %, and 83.46 %, respectively. Likewise, the structural characterization of the products by infrared spectroscopy and gas chromatography was obtained, observing that it presents the composition reported for soybean oil biodiesel. This way, products are obtained under adequate synthesis conditions, composition, and conversion percentages for biodiesel production from waste and new soybean oil.

Keywords: biodiesel, transesterification, experimental design, percentage of conversion.

1. Introducción

En los últimos años, la humanidad ha buscado y hecho uso de las diversas fuentes de energía disponibles para garantizar su supervivencia y, más recientemente, mejorar el nivel de vida deteriorado por el uso excesivo de combustibles fósiles (Knothe y col., 2017). El uso de combustibles derivados del petróleo para satisfacer las necesidades energéticas del ser humano implica la emisión de altas concentraciones de gases de efecto invernadero a la atmósfera (como el monóxido y el dióxido de carbono); siendo éste el responsable de múltiples fenómenos del cambio climático, como el impacto en los ecosistemas y el deterrimiento de los casquetes polares (Al-Ghussain y col., 2018). Uno de los sectores que contamina en mayor medida es el del transporte. En el caso de los motores que funcionan con diésel convencional, los gases de efecto invernadero que se generan son más tóxicos que los de motores a base de gasolina; entre estos están CO_x, NO_x, SO_x y partículas de hollín (hidrocarburos, agua, sulfatos, azufre y óxidos metálicos) (Usepa, 2013). De acuerdo con la Agencia Internacional de la Energía (IEA, por sus siglas en inglés), el uso de combustibles fósiles en medios de transporte incrementará en 18 mb/d (millones de barriles

por día) hasta 2040 en las economías en desarrollo (IEA, 2018); para el caso específico del diésel, el consumo mundial de este combustible alcanzó los 27,955 mil barriles por día con una tasa de crecimiento del 1,3 (IEA, 2018). Para el caso particular de México, de acuerdo con información de la Secretaría de Energía, las importaciones de diésel han aumentado en un factor de 10, entre el año 2005 y el 2016 (SENER, 2019); todo lo anterior vuelve verdaderamente importante el desarrollo de fuentes de energía alternativas eficientes, especialmente en México. Hoy en día, los biocombustibles líquidos, o combustibles líquidos renovables, contribuyen en gran medida a reducir el uso de combustibles derivados del petróleo en el sector del transporte. Uno de los biocombustibles líquidos más conocidos, debido a su gran asequibilidad, es el biodiésel; que se ha demostrado puede sustituir al diésel de origen fósil como fuente de energía para los motores diésel. El biodiésel se obtiene de manera sintética, a partir de fuentes con alto contenido en triglicéridos, como aceites vegetales o grasas animales, lo cual, lo convierte en una potencial alternativa renovable a su homólogo de origen fósil (Nigam, y col., 2011). Además, cuando se quema durante la combustión, el biodiésel presenta

cuantitativamente una emisión menor que el diésel fósil para la mayoría de los gases de efecto invernadero, y no es tóxico (Van Gerpen, 2005; Bernal y col, 2012). Moreira Santos (2012) ha reportado análisis sobre las propiedades del biodiésel obtenido a partir de ocho materias primas, en el que se evidencia que el biodiésel procedente de las semillas de jatrofa/*Jatropha* y de soja son los principales candidatos para biocombustibles comerciales; ya que cumplen con las normas de la *American Society for Testing Materials*, ASTM, esto debido a la composición química con base en triglicéridos que tienen, y, al tipo de ácidos grasos que poseen; los ácidos grasos que los componen son usualmente: ácido linoleico, ácido alfa linolénico, oleico, ácido palmítico, ácido esteárico y el ácido mirístico (Giakoumis y col., 2013). Adicionalmente, las materias primas utilizadas para la producción de biodiésel normalmente dependen de los cultivos adecuados al clima de cada región. En Estados Unidos y México el aceite de soja es la materia prima más común para la producción de biodiésel, mientras que el aceite de canola y el aceite de palma son las fuentes más comúnmente utilizadas en Europa y en los países tropicales, respectivamente (Knothe, 2002). La producción de biodiésel a partir del aceite de

soja se basa en sus características estructurales y la disposición molecular de los triglicéridos de este aceite; lo anterior, debido a los tres ácidos grasos que componen las cadenas de triglicéridos, que son estructuras con potencial al proceso de conversión. Respecto a la disponibilidad del aceite de soja, México produce 97,246 toneladas, donde Campeche es uno de los principales productores de esta oleaginosa. Cabe resaltar, que, debido a la gran demanda de este producto, se deben importar la mayor cantidad del aceite de soja (cerca del 90%) de otros países como Guatemala, Honduras y/o Estados Unidos de América (Hernández-Pérez y col. 2020). Por lo anterior, queda en evidencia que las rutas de producción a biodiésel a partir de este aceite siguen siendo de gran interés en la investigación y desarrollo de biocombustibles que sustituyan por completo a los combustibles de origen mineral (Celante y col. 2018; Nasreen y col., 2018).

Cuando el biodiésel se produce a partir de materias primas compuestas predominantemente por triglicéridos, como el aceite de soja, el aceite de girasol, de ricino, etc., la reacción que tiene lugar es la reacción de transesterificación de los triglicéridos,

como se muestra en la Figura 1 (Sridharan y col., 1974).

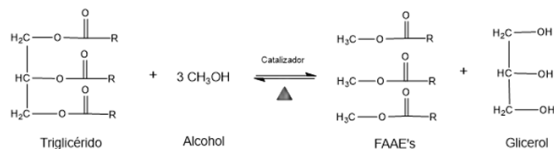


Figura 1. Reacción de transesterificación (FAAE = Esteres alquílicos de ácidos grasos).

Una vez calentado el aceite cuando se utiliza para cocinar, la composición de ácidos grasos libres puede aumentar, lo que puede llevar a la formación de jabones y otros subproductos como peróxidos y aldehídos, conllevando a la disminución del rendimiento en el proceso de conversión a biodiésel (Demirbas y col., 2009); asimismo, se llevan a cabo procesos de isomerización de los triglicéridos y ácidos grasos, lo que lleva a la esterificación simultánea cuando se trata con un alcohol, dicha reacción se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Reacción de esterificación.

Cabe resaltar que existen procesos de transesterificación y de esterificación de uno o dos pasos; en donde la diferencia se puede observar en la cantidad de ácidos grasos libres, de un paso es el estándar que suele

utilizarse, el de dos pasos suele asociarse a los aceites de desecho, ya que poseen mayor cantidad de estos ácidos grasos libres debido al proceso de calentamiento que sufren. Este último, resulta ser más costoso y con menores rendimientos (Chai y col., 2014)

En la Figura 3, se muestra un diagrama de bloques con las etapas requeridas para la producción de biodiésel en un paso.

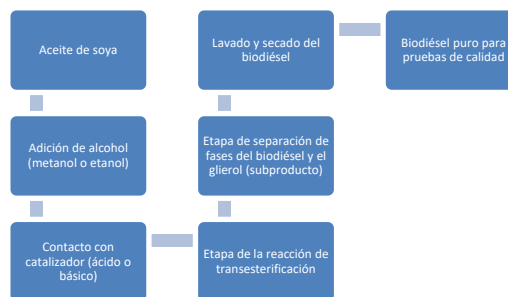


Figura 3. Diagrama de la producción de biodiésel.

El alcohol más común para llevar a cabo las reacciones de transesterificación es el metanol, debido a su bajo costo, así como su baja masa molecular, lo cual permite reaccionar con mayor facilidad con los triglicéridos. Sin embargo, en los últimos años también se ha propuesto el uso del etanol, ya que se puede producir a través de la fermentación de la biomasa y los alcoholes de cadena corta favorecen el equilibrio de la reacción hacia los productos, al minimizar el impedimento estérico (Varma y Deshpande,

2007; Aldana-González y col., 2022). Sin embargo, en años recientes se ha reportado la viabilidad de la producción de metanol a partir de materiales como residuos agrícolas, dióxido de carbono, entre otras fuentes (Hernández-Camacho y col., 2024). Por otra parte, se han descrito varios catalizadores de tipo homogéneo y heterogéneo, para mejorar los rendimientos de la producción de biodiésel, cada uno con múltiples ventajas y desventajas. Los catalizadores homogéneos se encuentran en la misma fase que la reacción, mientras que los heterogéneos regularmente son materiales sólidos en cuyos poros se lleva a cabo la reacción. Entre los catalizadores homogéneos más utilizados se encuentran los ácidos y básicos; respecto a los básicos uno de los catalizadores más utilizados es el hidróxido de sodio (NaOH), aunque otros catalizadores básicos también pueden realizar la reacción (Rashid y Anwar, 2008). El catalizador básico es una de las mejores alternativas cuando la materia prima tiene un bajo contenido en ácidos grasos libres, aunque pueden producirse reacciones no deseadas, tal como la saponificación, cuando se tratan aceites de baja calidad. El uso de catalizadores ácidos, como el ácido sulfúrico (H_2SO_4), también puede promover la reacción de transesterificación. Sin embargo, las velocidades de reacción son

mucho más bajas que las obtenidas con los catalizadores básicos, y se requiere una temperatura más alta (Loterio y col., 2005). Por ello, se prefiere la catálisis ácida como paso previo al tratamiento de materiales con alto contenido en ácidos grasos libres. Se ha reportado, además, el uso de catalizadores heterogéneos como alternativa a los catalizadores homogéneos, con la ventaja de obtener una alta conversión y evitar la necesidad de recuperar el catalizador. Dentro de los catalizadores heterogéneos es posible mencionar las resinas de intercambio aniónico, resinas de intercambio catiónico, zeolitas, así como catalizadores derivados de residuos como cascarón de huevo, vainas, entre otros (Gómez-Castro y col., 2022).

En las últimas décadas, se han hecho esfuerzos por proponer una síntesis de biodiésel química y económicamente factible (Sharma y col., 2008). Sin embargo, esto resulta en un problema complejo, debido a la gran variedad de rutas propuestas por diversos autores. Como muestra, Felipe y col. (2009) presentan una revisión del año 1983 al 2009, referente a los diferentes métodos de síntesis para la obtención de biodiésel, en donde hace una comparativa de las variables más importantes, tal es el caso del rendimiento obtenido, tipo de catalizador,

tipo de aceite, si dicho aceite es nuevo o usado, el tiempo y la temperatura de reacción. Lo anterior, es de especial relevancia debido a que se pueden observar la gran cantidad de rutas de síntesis propuestas hasta hace 10 años por medio de catalizadores homogéneos y heterogéneos; asimismo, se muestra una gran variabilidad de resultados aun usando el mismo tipo de materia prima. Por ejemplo, Liu y col., (2008), Meneghetti y col., (2007), Di Serio y col., (2006) y Kim y col., (2004), reportan la obtención de biodiésel a partir del aceite de soya nuevo, con una disparidad de condiciones en el tiempo de reacción, tipo de catalizador y proporciones, con rendimientos del 38 %, 81 %, 71 %, y 69 % respectivamente; esto permite observar una clara falta de reproducibilidad en las condiciones de las diferentes síntesis presentadas. Adicionalmente, tampoco se observa una diferencia significativa respecto al uso de aceite nuevo y usado, lo anterior, debido a que se presentan los resultados específicos para cada tipo de materia prima, pero para los aceites usados no existe una mención concreta del tipo de materia prima utilizada.

En este sentido, Fonseca y col. (2019) realizaron un análisis de las diferentes metodologías propuestas para la obtención de

biodiésel a partir de aceite usado. En esta revisión se muestra una gran variedad de condiciones para la obtención de biodiésel utilizando catalizadores homogéneos; en donde se muestran altos rendimientos, costos bajos y tiempos de reacción cortos. Asimismo, Fonseca y col. (2019) mencionan nuevas alternativas al método de síntesis usual, es decir, la síntesis con catalizadores homogéneos y heterogéneos. Entre estas alternativas se encuentra la síntesis enzimática, el uso de líquidos iónicos como catalizadores, y la aplicación de métodos no catalíticos, los cuales han sido mayormente estudiados en la última década.

Actualmente, el desarrollo de metodologías para la obtención de biodiésel a partir de aceite nuevo y usado ha ido en aumento; entre estas es posible mencionar la utilización de líquidos iónicos con características de acidez (Panchal y col., 2019), el uso de catalizadores heterogéneos y aprovechamiento de subproductos como el glicerol y la urea (Jaffar y col. 2015), el uso de condiciones supercríticas para la obtención de biodiésel (Yin y col. 2008), la obtención del producto a partir de catalizadores a base de óxidos de molibdeno (Lima y col., 2022), entre otros. Por otra parte, es de importancia considerar el impacto ambiental asociado a las potenciales

materias primas, como se realizó por Pérez y col., (2022) para un ecotipo mexicano de *Jatropha curcas*.

En el presente trabajo se reporta la síntesis de biodiésel a partir de aceite de soya comercial y aceite de desecho, empleando dos catalizadores homogéneos NaOH y H_3PO_4 . Cabe mencionar, que se utiliza aceite de soya comercial con la intención de brindar una comparativa respecto a los productos obtenidos a partir del aceite de soya usado, esto debido a que en el aceite de soya usado se presentan grasas y otros posibles contaminantes en su uso común en la cocina. Lo anterior, permitirá demostrar la importancia de obtener biodiésel a partir del aceite de desecho, brindando de esta manera alternativas sustentables para la obtención de combustibles de menor impacto ambiental. Adicionalmente, se analiza y se compara el efecto de diferentes variables en la síntesis, con el fin de conocer la influencia de estas en la calidad de los materiales, así como en la búsqueda de la reproducibilidad de los productos obtenidos. Dichos productos se analizaron en función de sus propiedades fisicoquímicas y estructurales, tomando como referencia los estándares de calidad internacionales propuestos por la ASTM para los biocombustibles.

2. Materiales y métodos

2.1 Reactivos

Las síntesis se llevaron a cabo empleando aceite de soya comercial nuevo, así como aceite de soya de desecho, siguiendo el mismo método de síntesis en todos los casos; lo anterior con la finalidad de mostrar una comparativa de los productos obtenidos, como lo es en lo reportado de la bibliografía. La mezcla de triglicéridos que se obtuvo del aceite de soya comercial fue de la marca Nutrioli® (contenido declarado por porción de 15.4 mL/14 g: ácidos grasos saturados 2,1 g; ácidos grasos monoinsaturados 3,4 g; ácidos grasos poliinsaturados 8,5 g). Otros reactivos utilizados fueron alcohol metílico (Karal 99,8 %), hidróxido de sodio, NaOH (Karal 97 %), alcohol metílico absoluto, MeOH (Karal 99,95 %), ácido fosfórico, H_3PO_4 (Karal 85 %) y calcio granulado (Sigma Aldrich, 99 %).

2.2 Procedimiento experimental

2.2.1 Reacción de transesterificación

La reacción de transesterificación se produjo al hacer reaccionar el aceite (mezcla de triglicéridos) con una mezcla homogénea de la reacción entre el catalizador y el metanol, puestos en agitación constante durante 10

minutos y a temperatura ambiente. Para todas las muestras se utilizaron 30 ml del crudo de reacción, el cual se adicionó en un sistema de reflujo en atmósfera inerte de Nitrógeno con agitación y temperatura constantes durante un tiempo de 30 minutos. El sistema de reflujo se configuró como se muestra en la Figura 4. Una vez terminado el tiempo de reacción, el producto se transfirió a un embudo de separación y permanece allí durante 12 horas.



Figura 4. Esquema experimental para la producción de biodiésel.

Transcurridas las 12 horas, se separaron dos fases, el producto principal, la mezcla de FAAEs, y el subproducto glicerol. El biodiésel se lavó con agua desionizada hasta que presentó un pH neutro. Finalmente, el producto se calentó hasta 100 °C durante, al menos, una hora para su purificación.

2.2.2 Aceites nuevos

De acuerdo con el diseño de experimentos, se llevaron a cabo síntesis bajo diferentes

condiciones de reacción, cada una de ellas por triplicado. La temperatura se varió de 25 °C (temperatura ambiente) a 60 °C, mostrando buenos rendimientos (Yaakob y col., 2013). Otra variable que se analizó fue la relación molar entre el catalizador y el metanol; donde la relación molar del metanol influye tanto e incluso más que la temperatura, en el rendimiento y las propiedades fisicoquímicas de los productos (Tomasevic y col., 2003). Debido a las ventajas de utilizar un catalizador básico, el hidróxido de sodio fue el seleccionado para analizar, utilizándose relaciones molares NaOH:MeOH de 1:28, 1:56, 1:112, 1:168 y 1:280. Con fines comparativos, también se incluyó el análisis del catalizador ácido con una proporción H₃PO₄: MeOH de 1:56. Se utilizó este catalizador ya que fue el que mostró un mejor desempeño en comparación con otros ácidos en pruebas preliminares.

2.2.3 Aceites de cocina usados

Los aceites se recolectaron luego de haber sido empleados en cocinas no industriales, asegurando fueran la marca y semilla indicados en el protocolo. Cada una de las síntesis se realizó por triplicado. Los aceites se calentaron a 30 °C y posteriormente fueron

filtrados en caliente por gravedad para retirar residuos que alteraran el producto final. El resto del procedimiento fue el mismo que para los aceites nuevos. Las condiciones de reacción en los aceites usados variaron tal como las síntesis de los aceites nuevos. Los valores de temperatura fueron 26, 50 y 55 °C. Las relaciones molares de NaOH:MeOH fueron 1:28, 1:56 y 1:112. En el caso del ácido fosfórico, se utilizó una relación molar H_3PO_4 : MeOH de 1:56.

Finalmente, para las síntesis de productos a partir de aceite nuevo y de desecho, se desarrolló un diseño de experimentos preliminar con el objetivo de identificar las variables que afectan a las características de los productos finales, el cual se mostrará en la sección de resultados. En función de los resultados obtenidos para estas síntesis preliminares, y siguiendo las normas internacionales mencionadas, se seleccionó un grupo menor de condiciones de síntesis que se repitieron para el análisis detallado de los productos.

2.3 *Análisis de las propiedades fisicoquímicas*

2.3.1 *Densidad*

La densidad del producto de transesterificación se analizó empleando un picnómetro de 10 mL, según lo indica la norma internacional ASTM D1298 (ASTM International, 2020). La densidad del biodiésel de calidad a 15 °C debe encontrarse en un rango de entre 0.86 g/cm³ a 0.90 g/cm³.

2.3.2 *Viscosidad*

La viscosidad se determinó empleando un viscosímetro de Ostwald con un rango de 3 a 15 cSt (centiStocks) y un factor de calibración de 0.015; siguiendo el procedimiento de calibración y determinación indicada en la norma internacional ASTM D445 (ASTM International, 2020). De acuerdo con la norma, la viscosidad de un biodiésel de calidad debe encontrarse en un rango de entre 4.0 mm²/s y 6.0 mm²/s.

2.3.3 *Índice de acidez*

El índice de acidez del biodiésel se obtuvo mediante la titulación volumétrica, de una mezcla de 1 ml biodiésel y etanol, con una solución de hidróxido de sodio 0.01 N. De acuerdo con la norma internacional ASTM

D2274 (ASTM International, 2019); la cual indica que el índice de acidez para un biodiésel de calidad debe ser inferior a 0.5 mg de NaOH/g.

2.3.4 Estabilidad oxidativa

La estabilidad oxidativa se determinó mediante el método de degradación oxidativa mediada por sonicación. Los espectros de absorción se obtuvieron utilizando un espectrofotómetro Varian PROBE UV-VISIBLE, con doble haz de luz en un rango de 220 nm - 800 nm. La norma ASTM D2274 establece un mínimo de 65.49 minutos para el método de degradación oxidativa, mientras que la norma EN 14214 establece un mínimo de seis horas por termo-degradación a 110°C (método oficial Rancimat®) de tiempo de inducción para el biodiésel de calidad.

2.4 Caracterización estructural

El análisis estructural de los productos de transesterificación se determinó mediante espectrofotometría infrarroja (Lafont y col., 2011), IR, en un equipo Perkin Elmer Spectrum 100, con accesorio ATR en una región de 4000 cm⁻¹ a 650 cm⁻¹.

Asimismo, se realizó el análisis estructural mediante Espectroscopia de Resonancia Magnética Nuclear de protones ¹H RMN. Los espectros de ¹H se obtuvieron a temperatura ambiente en un equipo Perkin Elmer de 500 MHz, empleando Cloroformo deuterado (CDCl₃), como disolvente.

2.4.1 Porcentaje de conversión

El porcentaje de conversión de la reacción de transesterificación se determinó mediante espectroscopia de RMN ¹H. Sharma, y col., (2009), informaron que las señales esenciales de resonancia para los productos de transesterificación se pueden emplear para calcular, mediante la integración de la curva, la tasa de conversión de los ácidos grasos en ésteres metílicos.

El porcentaje de conversión se calculó con la Ecuación 1 (Sharma, y col., 2009) y la integral bajo la curva que se muestra para las señales características de los grupos metoxi presentes en los FAME's (3,6 ppm, singlete) y la de los protones presentes en los grupos R-metileno de los derivados de los triglicéridos (2,3 ppm, triplete) presentes en el aceite de soya y los ácidos grasos libres.

$$\%C = 100 \times (2A_{ME}/3A_{\alpha-CH_2}) \quad (1)$$

Adicionalmente, se utilizó un Cromatógrafo de Gases acoplado a Espectrometría de Masas para el análisis elemental de los productos. El equipo utilizado fue un cromatógrafo Clarus SQ 8 GC / MS. Se utilizaron alícuotas del biodiésel disueltas en n-heptano, con una columna de polaridad media de 30 m de largo, empleando dimetil siloxano (DMS) como fase estacionaria y helio como gas acarreador, con un flujo de aire de 1 ml/min, un índice de fragmentación de 50:1 y una rampa de programación de 200 °C a 300 °C, a 15 °C/min.

El producto de biodiésel con mayor porcentaje de conversión fue analizado elementalmente mediante Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas, GS/MS, con el fin de evaluar el método para la cuantificación de FAME's.

3. Resultados

3.1 Reacción de transesterificación

En la Tabla 1, se muestran los productos obtenidos de la síntesis de biodiésel a partir de aceite de soya nuevo y de desecho. Las síntesis de aceites nuevos se enlistan de la letra A-L, en donde el producto L

corresponde a la síntesis con H_3PO_4 y los productos A-K corresponden a las síntesis con NaOH. Respecto a la síntesis de aceites de desecho, se enlistan de la letra M-T, en donde el producto M corresponde a la síntesis con H_3PO_4 y los productos N-T corresponden a las síntesis con NaOH. Asimismo, se presenta el diseño de experimentos realizado en los productos descritos de la presente sección. Las condiciones del diseño de experimentos se delimitaron a partir de la revisión bibliográfica de los diferentes autores que en este documento se han citado.

Para la elección del catalizador, Felipe y col. (2009) y Fonseca y col., (2019), detallan que los catalizadores homogéneos más utilizados son el NaOH, el KOH y los ácidos fuertes; en el presente trabajo se utilizó NaOH en todas las síntesis, debido a que respecto a los rendimientos y propiedades reportadas no hay una diferencia significativa. Además, con la finalidad de realizar una comparativa de los catalizadores ácidos y básicos, se tomó al H_3PO_4 como punto de referencia, el ácido que los autores reportan con mejor rendimiento.

Tabla 1. Diseño de experimentos de las propiedades fisicoquímicas de los productos en la transesterificación. Síntesis llevadas a cabo bajo diferentes condiciones de reacción (aceite de soya, catalizador y temperatura de reacción).

Síntesis	Aceite de soya	Catalizador	Rel. Molar Cat.: Metanol	Temperatura de reacción (°C)	Rendi mient o (%)	Densidad (g/cm ³) ASTM D1298	Viscosidad(mm ² /s) ASTM D445
A	Nuevo	NaOH	1:56	50-55	84	0.8683	5.25
B	Nuevo	NaOH	1:168	50-55	90	0.8668	5.4
C	Nuevo	NaOH	1:280	50-55	80	0.8673	5.34
D	Nuevo	NaOH	1:56	25-30	96	0.9353	23.14
E	Nuevo	NaOH	1:168	25-30	96	0.8712	5.88
F	Nuevo	NaOH	1:280	25-30	94	0.8874	9.99
G	Nuevo	NaOH	1:56	25-30	65	0.8825	5.57
H	Nuevo	NaOH	1:112	25-30	70	0.8786	4.09
I	Nuevo	NaOH	1:28	25-30	75	0.9001	12.69
J	Nuevo	NaOH	1:112	50-55	70	0.8789	5.82
K	Nuevo	NaOH	1:28	50-55	65	0.9009	9.63
L	Nuevo	H ₃ PO ₄	1:56	50-55	65	0.9402	23.88
M	Usado	H ₃ PO ₄	1:56	50-55	-	0.9374	28.89
N	Usado	NaOH	1:56	50-55	-	0.8517	16.73
O	Usado	NaOH	1:56	25-30	70	0.8867	4.84
P	Usado	NaOH	1:112	25-30	75	0.8733	5.85
Q	Usado	NaOH	1:28	25-30	40	0.8889	6.27
R	Usado	NaOH	1:56	50-55	68	0.8799	5.55
S	Usado	NaOH	1:112	50-55	76	0.8806	3.58
T	Usado	NaOH	1:28	50-55	60	0.9010	10.28

Los aceites en **negrita fueron seleccionados como candidatos, ya que cumplen con los rangos establecidos por las normas internacionales para densidad y viscosidad.*

Para la temperatura Yaakob y col. (2013) muestra una variación de 25 a 60 °C, la cual se utilizó en el diseño de experimentos del presente trabajo. Finalmente, para la elección de la relación molar, Liu y col., (2008), Meneghetti y col., (2007), Di Serio y col., (2006) y Kim y col., (2004) muestran una gran variabilidad de la relación molar del

catalizador y del metanol, haciendo énfasis que entre más alcohol se añada en la reacción los rendimientos serán mejores, por lo que las relaciones Cat: MetOH fueron 1:28, 1:56, 1:112, 1:168 y 1:280.

A partir de lo anterior, de la Tabla 1, se seleccionaron cuatro productos A y G, obtenidos de la síntesis a partir de aceites

nuevos; también O y R, obtenidos de la síntesis con aceites usados, para la realización de los análisis estructurales, índice de acidez, estabilidad oxidativa y análisis elemental. Ya que estos productos mostraron ser los mejores candidatos al cumplir con las principales normas ASTM (densidad y viscosidad); además las condiciones mostraron tener rendimientos altos a temperatura ambiente y con el menor gasto de metanol: 84 %, 65 %, 70 % y 68 % respectivamente; adicionalmente, las relaciones molares de estos productos son de 1:56, por lo que representa menor uso de materia prima en las síntesis. Finalmente, los productos O y G fueron obtenidos a temperatura ambiente, por lo que requieren menos gasto energético en la síntesis. Si bien, todas las síntesis en el diseño de experimentos muestran rendimientos entre el 40 % y el 94 % como se puede apreciar en la Figura 5, estas representan un gasto de materia prima mayor en la relación molar con el metanol. Tal es el caso de la síntesis F, que presenta el rendimiento más grande del 94 %, pero un gasto de materia prima con 280 partes de metanol.

De igual manera, la viscosidad se duplica a 9.99 mm²/s respecto a las seleccionadas anteriormente. Para las síntesis L y N que utilizaron el catalizador ácido, los

rendimientos no se pudieron calcular debido a la poca cantidad obtenida de producto, la viscosidad para estas muestras fue de 23.88 mm²/s y 28.89 mm²/s, respectivamente, casi cinco veces mayor que las muestras seleccionadas. Así pues, el análisis anterior convierte a los productos A, G, O y R en candidatos para la reproducibilidad de la reacción.

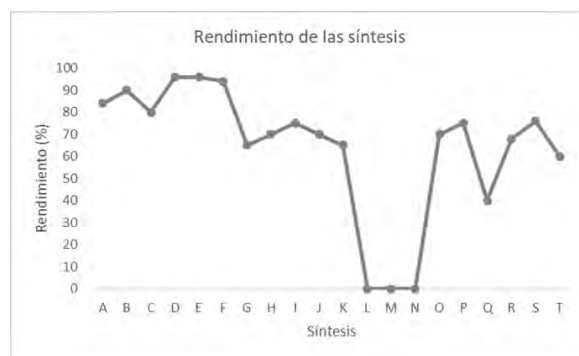


Figura 5. Rendimiento de las reacciones de producción de biodiésel. Síntesis A-L a partir de aceite Nuevo, síntesis M-T a partir de aceite de desecho.

3.2 Índice de acidez

En la Tabla 2, se pueden observar los índices de acidez obtenidos para las síntesis A, G, O y R, estos fueron de 0.149, 0.200, 0.172 y 0.185 mg NaOH/g respectivamente.

Tabla 2. Índice de acidez obtenido para los productos de transesterificación, expresado en mg de NaOH por gramo de biodiésel.

Ensayo/Eventos	Aceite nuevo		Aceite usado	
	A	G	O	R
Índice de acidez ASTM D2274 (0.5 mg NaOH/g máx.)	0.149	0.200	0.172	0.185

Los valores de los cuatro productos entran en la norma ASTM D2274, que marca como límite máximo de esta propiedad 0.5 mg NaOH/g. La importancia del cumplimiento de las propiedades fisicoquímicas radica en el hecho que las muestras deben tener un determinado comportamiento en los motores de combustión interna; por esa razón, lo valioso de realizar un diseño de experimentos para determinar las condiciones de reacción óptimas.

Índice de estabilidad oxidativa (tiempo de inducción)

La estabilidad oxidativa es una propiedad del biodiésel que está relacionada con la vida útil del producto en almacenamiento y se define en función del tiempo de inducción (TI), que presenta el biodiésel cuando éste es sometido a sonodegradación o termodegradación. En la Tabla 3, se pueden observar los índices de

estabilidad oxidativa obtenidos para las síntesis A, G, O y R, estos fueron de 4.7, 6.18 y 7.98 minutos respectivamente. La norma ASTM D2274 indica que se deben alcanzar valores de 65.49 minutos; sin embargo, las muestras seleccionadas en el presente artículo no presentan dicho índice de estabilidad oxidativa. No obstante, para ello es importante recordar que durante el proceso de refinamiento del biodiésel comercial se añaden antioxidantes naturales y sintéticos para prolongar la vida útil del producto. Por lo que, cabe resaltar los bajos valores obtenidos en el análisis de la estabilidad oxidativa, los cuales evidencian que las muestras de biodiésel han perdido total o parcialmente su contenido de antioxidantes naturales, debido a la reacción de transesterificación, afectando así su estabilidad (Schober, S., y col., 2004).

Tabla 3. Resultados de la determinación índice de estabilidad oxidativa, en productos de transesterificación del aceite de soya.

Ensayo/Eventos	Aceite nuevo		Aceite usado	
	A	G	O	R
Tiempos de inducción ASTM D2274 (65.49* minutos min.)	4.7	6.18	6.04	7.98

3.3 Espectroscopia infrarroja

En la Figura 6 se presenta una comparación entre los análisis IR de los productos A, G, O y R. Todos los espectros muestran señales características de absorción de los grupos funcionales presentes en el biodiésel. Principalmente, se observan dos señales entre $1300-1100\text{ cm}^{-1}$, pertenecientes al grupo de los ésteres metílicos; mientras que la señal situada entre $1460-1377\text{ cm}^{-1}$ indica la presencia de grupos alquilo. Por otro lado, en la región entre $1750-1730\text{ cm}^{-1}$ corresponde al grupo funcional carbonilo. Por último, todos los espectros presentan una señal de absorción entre $3000-2900\text{ cm}^{-1}$, lo cual pertenece al movimiento de estiramiento de los enlaces C-H, que es una característica que indica la presencia de carbonos alifáticos.

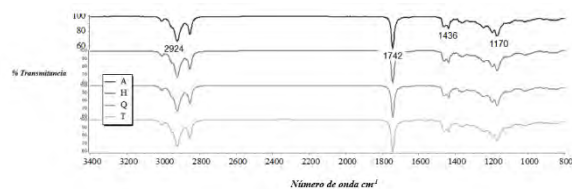


Figura 6. Espectros IR de los productos de transesterificación. Productos A, G, O y R (Síntesis de la Tabla 1).

3.4 Porcentaje de conversión

Los espectros RMN ^1H de los cuatro productos (A, G, O y R) se presentan en la Figura 7.

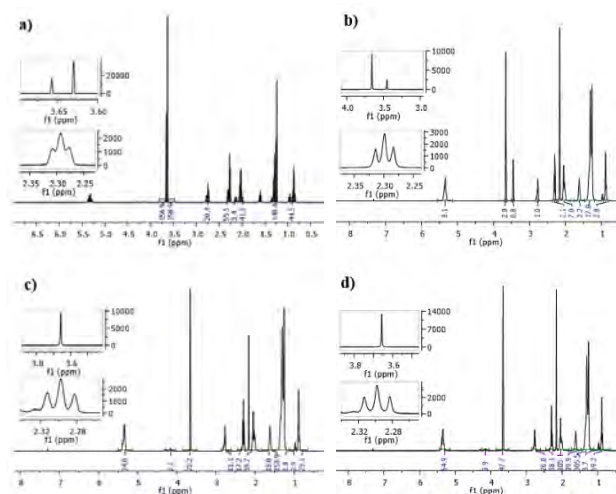


Figura 7. Espectros RMN ^1H de los productos de transesterificación: A, a); G, b); O, c); y R, d). (Síntesis de la Tabla 1).

Para el cálculo del porcentaje de conversión de los espectros, %C: es la tasa de conversión de los triglicéridos del aceite de soja en sus ésteres metílicos. AME, corresponde al valor del área bajo la curva de la señal en 3.6 ppm correspondientes al singlete de los grupos metoxi en los ésteres metílicos, y $A_{\alpha}\text{-CH}_2$ corresponde al valor del área bajo la curva de la señal en 2.3 ppm correspondiente al triplete característico de los protones en los grupos R-metileno. Por lo anterior, se calculó un porcentaje de conversión promedio del 80,17 %. Los porcentajes de conversión para los productos A, G, O, R son de 66.88 %, 92.06 %, 78.29 % y 83.46 % respectivamente, los cuales se pueden observar claramente en la

Figura 8. Por otro lado, el rendimiento máximo del 92.06 % se obtuvo para el producto G; con aceite de soya nuevo, catalizador homogéneo básico (NaOH), relación molar 1:56 y un rango de temperatura de 25-30 °C.

Asimismo, el porcentaje máximo de conversión para la reacción se ha atribuido a la disociación eficiente del NaOH como catalizador con el MeOH para formar el intermediario metóxido de sodio, NaOCH_3 , debido a la relación molar inicial; y es una prueba de la eficiencia de la reacción de transesterificación para tener lugar a bajas temperaturas. Mientras que un %C bajo está relacionado con la formación o presencia de agua, que provoca la saponificación en la reacción principal, disminuyendo el rendimiento cuando se emplean catalizadores heterogéneos y ácidos, y una mayor proporción molar de MeOH.

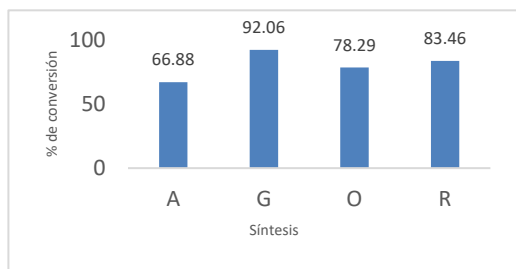


Figura 8. Porcentajes de conversión, %C, de los productos de biodiésel: A, G, O y R (Síntesis de la Tabla 1).

3.5 Análisis por cromatografía de gases acoplado espectrometría de masas

El cromatograma para el producto G se presenta en la Figura 9. Se presentan los espectros de masas para tres señales principales en el cromatograma que corresponden a los ésteres metílicos de ácidos grasos del a) ácido palmítico, b) ácido oleico y c) ácido esteárico; tres ácidos grasos contenidos en el aceite de soya (Nasreen, y col., 2018). La relevancia de este estudio permite identificar de manera concreta la composición estructural obtenida de la síntesis, que corresponde a las cadenas de ácidos grasos reportadas con mayor proporción en el aceite de soya (Valencia y col., 2004).

Con lo anterior, se puede proponer como perspectiva del presente trabajo, estudiar la cinética de reacción de los productos reportados, con la finalidad de analizar y diseñar un modelo cinético para la síntesis de biodiésel a partir del aceite de soya.

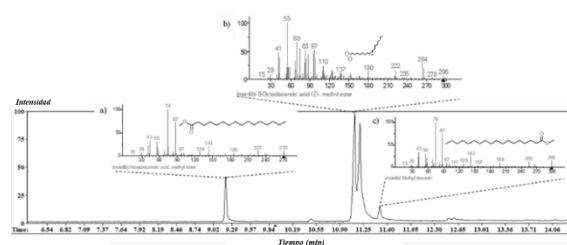


Figura 9. Cromatograma GC/MS y espectros de masas para el producto G (Síntesis de la Tabla 1).

4. Conclusiones

Se presenta el análisis de la síntesis de biodiésel a partir de aceite de soya nuevo y usado, en la que se realizó un diseño de experimentos basado en los trabajos previos reportados en la bibliografía. Este análisis se basó en las condiciones de reacción del tipo de catalizador, la relación molar de los precursores y la temperatura de reacción. Los resultados obtenidos permiten observar que las muestras de las síntesis etiquetadas como A, G, O y R son los candidatos para un análisis estructural. Los productos seleccionados cumplen con las propiedades fisicoquímicas de índice de estabilidad oxidativa y de índice de acidez; además, presentan rendimientos de 84 %, 65 %, 70 % y 68 %, rendimientos que, si bien no fueron los rendimientos más altos que se obtuvieron, respecto al gasto de materia prima y gasto

energético son los productos con mejor rendimiento. Adicionalmente, los porcentajes de conversión de la síntesis G, de 92.06 % permite proyectar al producto para continuar con el proyecto y realizar el desarrollo de un modelo cinético para esta síntesis a partir del aceite de soya; cabe resaltar, que el método aquí descrito ha sido validado únicamente con los aceites descritos en la metodología. Para su generalización, es necesario hacer una caracterización estructural de los componentes en los aceites, tanto nuevos como de desecho. El método de síntesis que se reporta ha demostrado ser eficiente partiendo tanto de los aceites nuevos como a los de usados, lo que representa una ventaja en el desarrollo no sólo en los precios de los combustibles energéticos sino también en el impacto ambiental.

Agradecimientos

El presente trabajo se llevó a cabo gracias al financiamiento de la Universidad de Guanajuato, México [Proyecto 117/2019].

Dedicatoria

El presente trabajo se dedica a la memoria del Dr. Alejandro Alatorre Ordaz (QEPD),

profesor, investigador y amigo, quien fuese responsable del laboratorio de Conversión y Almacenamiento de Energía, en el cual se desarrolló el presente proyecto.

Referencias bibliográficas

Aldana-González, M.G., Gómez-Castro, F.I., Romero-Izquierdo, A.G., Conde-Mejía, C., Gutiérrez-Antonio, C., y Morales-Rodríguez, R. (2022). Supercritical biodiesel production: Feasibility of energy integration with a bioethanol production process. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 21, Proc2534.

Al-Ghussain, L. (2018). Global warming: review on driving forces and mitigation. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 38(1), 13-21. <https://doi.org/10.1002/ep.13041>

ASTM International (2020). *ASTM D1298-20: Standard test method for density and relative density of liquids by digital density meter*. ASTM International. <https://www.astm.org/standards/d1298>

ASTM International (2019). *ASTM D2274-19: Standard test method for oxidation stability of fuels (accelerated method)*. ASTM International. <https://www.astm.org/>

ASTM International (2020). *ASTM D445-20: Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and calculation of dynamic viscosity)*. ASTM International. <https://www.astm.org/>

Bernal, J., Lozano, P., García, E., Burguete, M., Sánchez, G., López, G., Pucheault, M., Vaultier, M., Luis, S. (2012). Supercritical synthesis of biodiesel. *Molecules*, 17, 8696-8719. <https://doi.org/10.3390/molecules17078696>

Celante, D., Schenkel, J., y de Castilhos, F. (2018). Biodiesel production from soybean oil and dimethyl carbonate catalyzed by potassium methoxide. *Fuel*, 212, 101-107. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.040>

Chai, M., Tu, Q., Lu, M., y Yang, Y. J. (2014). Esterification pretreatment of free fatty acid in biodiesel production, from laboratory to industry. *Fuel Processing Technology*, 125, 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.03.025>

Deboni, T., Medeiros, G., Giraldi, G., Tubino, M., y de-Almeida, A. (2018). Deacidification and ethyl biodiesel production from acid soybean oil using a strong anion exchange resin. *Chemical*

Engineering Journal, 333, 686-696.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.09.107>

Demirbas, A. (2008). Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Conversion and Management*, 50(1), 14-34.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.09.001>

Di Serio, M., Ledda, M., Cozzolino, M., Minutillo, G., Tesser, R., y Santacesaria, E. (2006). Transesterification of soybean oil to biodiesel by using heterogeneous basic catalysts. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45(9), 3009-3014.
<https://doi.org/10.1021/ie051402o>

Felipe, A., González, R., Gallego, E. G., Gerardo, H., y Castañeda, T. (2009). Variables de operación en el proceso de transesterificación de aceites vegetales: Una revisión - catálisis química. *Revista Ingeniería e Investigación*, 29(3), 17-23.

Fonseca, J., Teleken, J., de Cinque, V., y da Silva, C. (2019). Biodiesel from waste frying oils: Methods of production and purification. *Energy Conversion and Management*, 184, 205-218.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.061>

Gebremariam, S., y Marchetti, J. (2018). Economics of biodiesel production: Review. *Energy Conversion and Management*, 168, 74-84.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.002>

Gerhard, K., y Luis, F. (2017). Biodiesel fuels, *Progress in Energy and Combustion Science*, 58, 36-59,
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.08.001>

Giakoumis, E. G. (2012). A statistical investigation of biodiesel physical and chemical properties, and their correlation with the degree of unsaturation. *Renewable Energy*, 50, 858-878.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.07.040>

Gómez-Castro, F.I., Martínez-Sánchez, O., Ramírez-Corona, N. (2022). Production of biodiesel: from the oil to the engine. En F.I. Gómez-Castro, C. Gutiérrez-Antonio (Eds.), *Biofuels and Biorefining Volume 1: Current Technologies for Biomass Conversion* (pp. 109-156). Elsevier.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824116-5.00006-4>

Hernández-Camacho, N.V., Gómez-Castro, F.I., Ponce-Ortega, J.M., y Martín, M. (2024). Production of methanol from renewable

sources in Mexico: Supply chain optimization. *Computers & Chemical Engineering*, 188, 108780. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2024.108780>

Hernández-Pérez, M., Soto-Rocha, J. M., Avila-Perches, M. A., Gámez-Vázquez, F. P., Gámez-Vázquez, A. J., y de la O-Olán, M. (2020). Rendimiento de variedades de soya evaluadas en diferente fecha de siembra en Campeche, México. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 43(4-A), 549. <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.4-a.549>

International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook (2018). *The Gold Standard of Energy Analysis*. <https://www.iea.org/weo2018/fuels/>.

Kim, H. J., Kang, B. S., Kim, M. J., Park, Y. M., Kim, D. K., Lee, J. S., y Lee, K. Y. (2004). Transesterification of vegetable oil to biodiesel using heterogeneous base catalyst. *Catalysis Today*, 93-95, 315-320. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2004.06.007>

Kiss, A., Omota, F., Dimian, A., y Rothenberg, G. (2006). The heterogeneous advantage: biodiesel by catalytic reactive

distillation. *Topics in Catalysis*, 40, 141-150. <https://doi.org/10.1007/s11244-006-0116-4>

Knothe, G. (2003). Current perspectives on biodiesel. *Revista Palmas*, 24, 97-94. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/955>

Lafont, J. J., Páez, M. S., y Torres, Y. C. (2011). Análisis químico de mezclas biodiesel de aceite de cocina usado y diesel por espectroscopia infrarroja. *Información Tecnológica*, 22(4), 35-42. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642011000400005>

Liu, X., Piao, X., Wang, Y., Zhu, S., y He, H. (2007). Calcium methoxide as a solid base catalyst for the transesterification of soybean oil to biodiesel with methanol. *Fuel*, 87(7), 1076-1082. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.05.059>

Lotero, E., Liu, Y., Lopez, D. E., Suwannakarn, K., Bruce, D. A., y Goodwin, J. G. (2005). Synthesis of biodiesel via acid catalysis. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44(14), 5353-5363. <https://doi.org/10.1021/ie049157g>

Marwaha, A., Rosha, P., Mohapatra, S., Mahla, K., y Dhir, A. (2018). Waste materials

as potential catalysts for biodiesel production: Current state and future scope. *Fuel Processing Technology*, 181, 175-186. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.09.011>

Meneghetti, S. M. P., Meneghetti, M. R., Wolf, C. R., Silva, E. C., Lima, G. E. S., De Lira Silva, L., Serra, T. M., Cauduro, F., y de Oliveira, L. G. (2006). Biodiesel from castor oil: A comparison of ethanolysis versus methanolysis. *Energy & Fuels*, 20(5), 2262-2265. <https://doi.org/10.1021/ef060118m>

Moreira Santos, E. (2012). Principales características de las materias primas utilizadas en la producción de biodiesel: La influencia del contenido y la concentración de los ácidos grasos. *Ingenium*, 13, 53–61.

Nasreen, S., Nafees, M., Zeeshan, M., Saleem, M. U., y Ullah, A. (2018). Synthesis of heterogeneous catalyst for the production of biodiesel from soybean oil. *Journal Of Fundamental and Applied Sciences*, 10, 609-618. <https://doi.org/10.4314/jfas.v10i1s.43>

Nigam, P. S., y Singh, A. (2010). Production of liquid biofuels from renewable resources. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37(1), 52-68. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2010.01.003>

3

Rashid, U., y Anwar, F. (2008). Production of biodiesel through base-catalyzed transesterification of safflower oil using an optimized protocol. *Energy & Fuels*, 22(2), 1306-1312. <https://doi.org/10.1021/ef700548s>

Schober, S., y Mittelbach, M. (2004). The impact of antioxidants on biodiesel oxidation stability. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 106(6), 382-389. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200400954>

SENER. *Balance Nacional de Energía: principales indicadores energéticos y de hidrocarburos*. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/balance-nacional-de-energia-principales-indicadores-energeticos-y-de-hidrocarburos>.

Shan, R., Lu, L., Shi, Y., Yuan, H., y Shi, J. (2018). Catalysts from renewable resources for biodiesel production, *Energy Conversion and Management*, 178, 277-289. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.032>

Sharma, Y., Singh, B., y Upadhyay, S. (2008). Advancements in development and characterization of biodiesel: A review. *Fuel*, 87(12), 2355-2373. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.01.014>

Sharma, Y. C., Singh, B., y Korstad, J. (2009). High yield and conversion of biodiesel from a nonedible feedstock (*Pongamia pinnata*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(1), 242-247. <https://doi.org/10.1021/jf903227>

Shibasaki-Kitakawa, N., Honda, H., Kuribayashi, H., Toda, T., Fukumura, T., y Yonemoto, T. (2006). Biodiesel production using anionic ion-exchange resin as heterogeneous catalyst. *Bioresource Technology*, 98(2), 416-421. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.12.010>

Silva, A. L., Farias, A. F. F., Meneghetti, S. M. P., Filho, E. A. D. S., y de Melo Costa, A. C. F. (2022). Optimization of biodiesel production via transesterification of soybean oil using α -MoO₃ catalyst obtained by the combustion method. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(8), 104012. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104012>

Singh, D., Ganesh, A., y Mahajani, S. (2014). Heterogeneous catalysis for biodiesel synthesis and valorization of glycerol. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17(4), 1103-

1110. <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0858-9>

Sridharan, R., y Mathai, I. (1974). Transesterification reactions. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 33, 178-187.

Panchal, B., Chang, T., Qin, S., Sun, Y., Wang, J., y Bian, K. (2019). Optimization of soybean oil transesterification using an ionic liquid and methanol for biodiesel synthesis. *Energy Reports*, 6, 20-27. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.11.028>

Pérez, G., Islas-Samperio, J. M., Manzini, F., Suárez, R., Barahona-Pérez, L. F., y Aguillón, J. E. (2022). Huella ambiental de la producción de biodiésel utilizando *Jatropha curcas* mexicana cultivada en suelos marginales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 38, 22-33. <https://doi.org/10.20937/rica.54225>

Tacias, VG., Torrestiana, B., Dal, L., Virgen, J., Suárez, F., Rodrigues, R., y Fernandez, R. (2019). Comparison of acid, basic and enzymatic catalysis on the production of biodiesel after RSM optimization. *Renewable Energy*, 135, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.107>

Tomasevic, A., y Siler-Marinkovic, S. (2003). Methanolysis of used frying oil. *Fuel Processing Technology*, 81(1), 1-6. [https://doi.org/10.1016/s0378-3820\(02\)00096-6](https://doi.org/10.1016/s0378-3820(02)00096-6)

U.S. Environmental Protection Agency. (2013). *Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990–2011*. National Service Center for Environmental Publications. <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks>

Valencia, R., y Garzón, V. (2004). Potencialidades de la soya y usos en la alimentación humana y animal. *Boletín divulgativo*, 13, 24. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/32760>

Van Gerpen, J. (2005). Biodiesel processing and production. *Fuel Processing Technology*, 86(10), 1097-1107. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.11.005>

Varma, N., Deshpande, P., y Madras, G. (2007). Synthesis of biodiesel in supercritical alcohols and supercritical carbon dioxide. *Fuel*, 89, 1641-1646. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.08.012>

Yaakob, Z., Mohammad, M., Alherbawi, M., Alam, Z., y Sopian, K. (2012). Overview of the production of biodiesel from waste cooking oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 184-193. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.016>

Yin, J., Xiao, M., y Song, J. (2008). Biodiesel from soybean oil in supercritical methanol with co-solvent. *Energy Conversion and Management*, 49(5), 908-912. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.10.018>