

Evaluación del efecto del ultrasonido con catalizador químico en la producción de biodiésel a partir de aceite usado

Evaluation of the effect of ultrasound with a chemical catalyst in the production of biodiesel from used oil

Perla Margarita Meza-Inostroza¹, Laura Y. Sicairos-Medina¹, Leonel Ernesto Amabilis-Sosa², Edgar Ledezma-Zavala¹, Ricardo Roé-Sosa³, Adriana Roé-Sosa*¹

¹Universidad Tecnológica de Culiacán, Coordinación de Ingeniería en Tecnología Ambiental, Carretera a Imala s/n. 80014 Culiacán, Sinaloa, México, Correo-e (*e-mail*): adriana.roe@utculiacan.edu.mx* Tel+526674510640

²CONAHCYT-TECNM/ITCuliacán, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Av. Juan de DiosBátiz 310, 80220 Culiacán, Sinaloa, México

³Universidad Autónoma de Sinaloa. Facultad de Contaduría y Administración. Blvd. Miguel Tamayo Espinosa de los Monteros s/n, Torre de Rectoría, Col. Desarrollo Urbano Tres Ríos, 80050 Culiacán, Sinaloa, México

*Autora a quien debe dirigirse la correspondencia / *Author to whom correspondence should be addressed*

Recibido / *Received*: Septiembre / *September* 13, 2024

Aceptado / *Accepted*: Septiembre / *September* 30, 2024 (Número 1, enero-junio / *Number 1, January-June*)

Resumen

En México se generan millones de litros de aceite procesado en restaurantes. Es un residuo peligroso debido a su corrosividad, lo que implica un gasto económico por el servicio de confinamiento especial. En el caso de darse una disposición inadecuada de este residuo peligroso, puede contaminar agua, aire y suelo. Por otra parte, el aceite vegetal usado puede ser empleado como materia prima en la producción de biodiésel. En este proyecto se investigó la obtención de biodiésel a partir de aceite vegetal de soja usado, empleando 22Hz de ultrasonido a amplitudes de 10, 20, 30, 40 50 y 60% con menores tiempos de reacción a los reportados convencionalmente, usando NaOH como catalizador. Los resultados indican la viabilidad de la transesterificación del aceite vegetal de soja usado para producir biodiésel, ya que se obtuvieron rendimientos entre 82 y 89% en todos los tratamientos, observándose diferencias al emplear ultrasonido con respecto de los controles. Se observó que el ultrasonido disminuye el tiempo de calentamiento y proceso de fabricación del biodiésel en todos los casos, lo que impacta en la reducción de energía utilizada durante la producción del biodiésel. El producto final cumple con los parámetros establecidos en la normativa con respecto de viscosidad cinemática, densidad, porcentaje de cenizas, punto de inflamación y enturbiamiento en todos los tratamientos. Se requiere dar un pretratamiento de secado en todos los casos y, en amplitudes de 50 y 60%, se obtuvo un pH menor de 6. Por ello, es necesario continuar con la investigación empleando tiempos menores para evaluar la calidad del biodiésel en estas amplitudes.

Palabras clave: Aceite vegetal usado, biodiésel, ultrasonido, cavitación

Abstract

In Mexico, millions of liters of processed oil are generated in restaurants. It is a hazardous waste due to its corrosiveness, which implies an economic expense for the special containment service. In the case of an inadequate disposal of this hazardous waste, it can contaminate water, air, and soil. On the other hand, used vegetable oil can be used as raw material in the production of biodiesel. In this project, the production of biodiesel from used soybean vegetable oil was investigated, using 22 Hz ultrasound at amplitudes of 10, 20, 30, 40, 50 and 60% with shorter reaction times than those conventionally reported, using NaOH as a catalyst. The results indicate the viability of the transesterification of used soybean vegetable oil to produce biodiesel, since yields between 82 and 89% were obtained in all treatments, observing differences when using ultrasound with respect to the controls. It was observed that ultrasound reduces the heating time and the biodiesel manufacturing process in all cases, which impacts on the reduction of energy used during the biodiesel production. The final product complies with the parameters established in the regulations regarding kinematic viscosity, density, ash percentage, flash point, and cloudiness in all

treatments. A drying pretreatment is required in all cases and, at amplitudes of 50 and 60%, a pH of less than 6 was obtained. Therefore, it is necessary to continue with the research using shorter times to evaluate the quality of biodiesel in these amplitudes.

Keywords: Used vegetable oil, biodiesel, ultrasound, cavitation

Introducción

La creciente demanda de combustibles fósiles en todos los sectores de la sociedad y el impacto ambiental que estos generan han llevado a la búsqueda de opciones ambientalmente aceptables y económicamente competitivas. El biodiésel obtenido a partir de aceites vegetales constituye una opción con potencial en la reducción de las emisiones de contaminantes atmosféricos, además de que posee características como la capacidad calorífica, similares al diésel fósil (Talebian-Kiakalaieh et al., 2013; Bousba et al., 2024)

Lo anterior presenta algunos inconvenientes, por ejemplo, los aceites vegetales comestibles como girasol (*Helianthus annuus* L.), soya (*Glycine max*), maíz (*Zea mays*) y palma (Arecáceas) son de bajo costo, alto rendimiento y bajo contenido de azufre. Pero, el uso de dicha materia prima genera competencia con la disponibilidad de productos alimenticios y su producción a gran escala representa un impacto negativo sobre los ecosistemas (Aboelazayem et al., 2017).

El uso de aceites no comestibles como los de *Jatropha curcas* L., semilla de algodón (*Gossypium herbaceum*), Neem de la India (*Azadirachta indica*), entre otros, no compite con los productos alimenticios. No obstante, su disponibilidad es limitada y se solidifican a temperatura ambiente, al igual que las grasas animales, lo cual dificulta el proceso de producción de biodiésel (Pikula et al., 2020).

Los residuos de aceites vegetales de cocina son una opción potencial como materia prima para la producción de biodiésel. Estos residuos son clasificados como peligrosos y, usualmente, los restaurantes deben pagar por el servicio de recolección a empresas que les dan un confinamiento especial, para evitar problemas de salud y contaminación del aire (Sharma et al., 2018), del suelo (Zargar et al., 2012; Yaakob et al., 2013) y del agua (Kabir et al., 2014; Bhatia et al., 2020). Algunos productores mezclan los residuos de aceite vegetal con alimento para ganado con el fin de incrementar las calorías del consumo, lo cual puede generar problemas de salud para estos animales (Tres et al., 2013), así como para las personas que ingieran la carne derivada de animales alimentados con esta mezcla (Félix et al., 2017). Por otro lado, si los residuos de aceite se queman hay una alta probabilidad de formar dioxinas causando cáncer a las personas que inhalen esos gases de combustión (Ben et al., 2018).

La disposición directa de los residuos de aceite vegetal al drenaje provoca taponamientos e inundaciones en las ciudades. Además, se sabe que un litro de aceite puede contaminar 1,000 litros de agua, impactando hasta en un 30% los costos anuales de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Debido a lo anterior, es importante desarrollar tratamientos para reutilizar los residuos de aceite vegetal de cocina como materia prima de productos nuevos, como el biodiésel (Abdelkader et al., 2022; Awogbemi et al., 2021; Olu-Arotiowa et al., 2022). Si bien, su disponibilidad depende de la región y requieren infraestructura específica para su recolección, tiene beneficios adicionales como la minimización de residuos, reducción del impacto ambiental de las actividades que los generan, además de reducir los suministros de alimentos (Tchoufon et al., 2020).

La producción de biodiésel a partir del aceite usado se puede realizar por tres métodos: Transesterificación (ácida, básica, enzimática y con fluidos supercríticos), pirólisis y micro-emulsificación (Gebremariam et al., 2017; Nisar et al., 2017). La transesterificación de grasas animales y aceites vegetales es el método más utilizado para la producción de biodiésel. En dicho método, los

triglicéridos presentes en la materia prima reaccionan con un alcohol de cadena corta como metanol o etanol, para producir biodiésel. Aquí, es necesario emplear un agente catalizador para incrementar la velocidad de reacción, cuya selección depende de la cantidad de ácidos grasos libres en la materia prima (Ayas et al., 2014). Durante la transesterificación, el radical del alcohol es desplazado por otro alcohol proveniente de un éster que, a su vez, es suministrado por los triglicéridos de las grasas animales o vegetales. El producto principal de la reacción son los ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga, que son los componentes de interés del biodiésel (Meher et al., 2006).

La transesterificación ácida es un proceso que consiste en la reacción entre los triglicéridos de la muestra y alcohol acidificado. Los ácidos empleados a nivel experimental son el H_2SO_4 y el HCl. Es de utilidad cuando la materia prima contiene una gran cantidad de ácidos grasos libres. Sin embargo, requiere un tiempo de reacción mayor y temperaturas más altas que la transesterificación básica (alcohol basificado) (Gebremariam et al., 2017; Hassan et al., 2020). Por su parte, el uso de catalizadores básicos (NaOH, KOH) permite realizar la reacción en condiciones de baja presión y temperatura. El proceso de conversión es más rápido y, por lo tanto, ocurre en periodos más cortos (Malabadi et al., 2023). Se ha observado que una concentración de 1% de catalizador básico durante dos horas de reacción, proporciona rendimientos superiores al 90% (Tchuifon et al., 2020).

En cuanto a la transesterificación enzimática, se emplea la enzima lipasa como catalizador de la reacción. El aceite interactúa con la enzima durante la reacción para formar un complejo enzima-sustrato. En etapas posteriores, se produce una forma acilada de la enzima, que forma un complejo con metanol o etanol. El rearreglo de este complejo produce biodiésel y permite regenerar la enzima de interés (Kalita et al., 2022). Una de sus principales ventajas es el corto tiempo de reacción y nulo riesgo de saponificación, además de no utilizar reactivos o productos químicos (Malabadi et al., 2023).

A diferencia de los anteriores métodos catalíticos convencionales, la transesterificación mediante fluidos supercríticos no se ve afectada por la cantidad de ácidos grasos libres y el contenido de humedad presentes en la materia prima. Los rendimientos óptimos de esta transesterificación son alrededor del 98% (Aboelazayem et al., 2017). Sin embargo, la baja eficiencia energética del proceso y la necesidad de condiciones de alta temperatura y presión son desventajas operacionales (Pikula et al., 2020). De manera similar, la pirólisis de aceite vegetal o grasa animal, genera una fracción líquida con características similares a las del diésel. Sin embargo, requiere procesamiento posterior para la separación de las diferentes fracciones (Gebremariam et al., 2017).

La transesterificación asistida con energía sonoquímica ha tomado relevancia en los últimos años. Dicha energía se define como la aplicación de energía ultrasónica (superior a la audible por el ser humano equivalente a 20 kHz (Sáez-Bastante et al., 2024). Las ondas ultrasónicas crean la formación, el crecimiento y el colapso implosivo de burbujas en el líquido, lo que se denomina cavitación. Este fenómeno genera energía exclusiva para las reacciones por explosión de las burbujas con alta presión y temperatura que permite una transferencia de masa más rápida en un sistema (Sankaranarayanan et al., 2013).

Se sabe que el efecto de las ondas ultrasónicas se encuentra en función de su intensidad (W/cm^2) y de su frecuencia (kHz). Aplicando estos conceptos a la transesterificación, una frecuencia más alta hace que la sonda de ultrasonido vibre más rápido, lo que genera una mayor superficie para mezclar el alcohol, los triglicéridos y las burbujas de cavitación más pequeñas (Topare et al., 2015). Además, esa sonicación contribuye a la distribución uniforme de la temperatura dentro de la mezcla de reacción, minimizando los gradientes de temperatura y evitando puntos calientes localizados, que pueden ser problemáticos en los métodos de calentamiento convencionales (Milano et al., 2024).

El efecto de cavitación mejora la transferencia de masa y aumenta la velocidad de la reacción de transesterificación, reduciendo los tiempos de reacción y mejorando el rendimiento del biodiésel. Se

realizó una revisión bibliográfica sobre investigaciones relacionadas con la producción de biodiésel empleando ultrasonido. La Tabla 1 presenta los resultados encontrados.

Tabla 1. Comparación de algunos estudios donde se empleó ultrasonido en la producción de biodiésel

	(Refaat et al., 2008)	(Hingu et al., 2010)	(Sankaranarayanan et al., 2013)	(Ashok et al., 2024)	(Thanh et al., 2010)	(Salamatina et al., 2010)	(Milano et al., 2024)	
Catalizador	NaOH y KOH	KOH	Mezcla de óxidos derivados de CaAl_2 -Hidróxidos dobles estratificados	Residuos de cáscara de banana calcinada	KOH	BaO SrO	KOH	
Tipo de aceite	Aceite de girasol	Aceite de cocina	Aceite de girasol usado dos veces	Aceite usado	Aceite de canola	Aceite de palma	Aceite de palma	Aceite de <i>Ceiba pentandra</i>
Concentración del catalizador, % masa	0.5 y 1.0	1	5	1.8±0.09 mg KOH/g	0.7	2.8	2.8	1
Relación molar alcohol-aceite	3:1, 6:1 y 9:1	6:01	4:01	2:01	5:01	9:01	9:01	60%
Temperatura, °C	25 y 65	45	40	65	-	65	65	60
Frecuencia, kHz	20	20	34 ± 3	-	20	20	20	20
Amplitud, %	100	-	-	-	-	70	80	35
Tiempo, min	5	40	90	25	50	<50	<50	50
Rendimiento o eficiencia de conversión, %	98.94	90	85	72.25	99	>95	>95	98.76

Como se observa, los rendimientos obtenidos han sido variables, según el tiempo de reacción, la frecuencia y el tipo de catalizador. Por tanto, no se sabe cuáles son las condiciones óptimas en donde se obtiene la mayor eficiencia en el proceso de transesterificación asistida por ultrasonido.

De acuerdo con estas investigaciones, el objetivo del presente trabajo fue el de estudiar la reacción de transesterificación catalizada por NaOH, a una temperatura de 60°C y el efecto del ultrasonido a una frecuencia de 22Hz, modificando la amplitud del equipo de ultrasonido utilizado, con el objetivo de tener la máxima conversión de biodiésel a partir de residuos de aceite vegetal en el mínimo tiempo. El diseño experimental se explica en el apartado de metodología.

Materiales y métodos

Obtención y caracterización del aceite utilizado como materia prima

Se utilizó aceite vegetal usado proveniente de un restaurante de comida japonesa (sushi), caracterizado por emplear siempre aceite de soya. Este aceite tuvo un pretratamiento para la eliminación de residuos gruesos y finos. Posteriormente, fue caracterizado mediante pH, humedad, cenizas e índice de acidez (Figura 1). La determinación de sólidos gruesos se realizó mediante la metodología ASTM D1796: Se colocaron 150 mL de aceite en envases de plástico de 200 mL y fueron centrifugados a 800 rpm durante 12 minutos. Posteriormente, el aceite se filtró a través de una malla

metálica de 0.425 mm y para los residuos finos se utilizó papel filtro Whatman 1005-042, con poros de 2.5 micras, caudal de 0.15 s/mL cm², grado 5 (125 mm)⁷. Se procedió a medir el volumen del aceite filtrado y la masa de los residuos finos (ASTM-D1796, 2022). El aceite ya filtrado y centrifugado fue el empleado como materia prima para la producción de biodiésel.

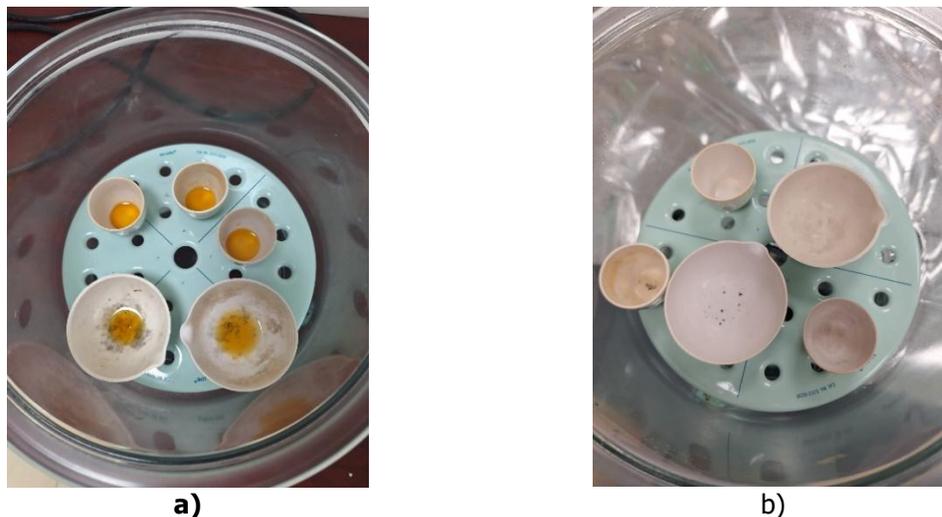


Figura 1. a) Determinación de humedad b) Determinación de cenizas

El pH se midió empleando un potenciómetro marca Bante Instruments previamente calibrado, manteniendo la temperatura a 22°C y agitación constante (ASTM-D6304, 2020). La humedad se determinó mediante los procedimientos gravimétricos de ASTM-D6304 (2020), que se basan en utilizar la Ec. 1. Por su parte, las cenizas se determinaron calentando 2 mL de aceite o biodiésel a 550°C durante una hora, calculando el porcentaje de cenizas mediante la Ec. 2 (ASTM-D482, 2019) (Figuras 1a,b). Para la determinación del índice de acidez se realizó la titulación del aceite mediante NaOH al 1% con fenolftaleína como indicador para poder aplicar la Ec. 3 (ASTM-D664-06, 2007) (Figura 2).

$$Hum(\%) = \left(\frac{M_h - M_s}{M_h} \right) (100\%) \quad \text{Ecuación 1}$$

M_h = Masa⁸ inicial de la muestra, incluyendo el agua presente en ella, g

M_s = Masa seca de la muestra, después de haber sido deshidratada en el horno, g

$$Cenizas(\%) = \frac{(M_1 - M_2)}{M - M_2} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

donde:

M_1 = Masa del crisol más las cenizas, g

M_2 = Masa del crisol seco, g

M = Masa inicial de la porción de muestra, g

$$IA = \frac{(N)(V)(39.997)}{P} \quad \text{Ecuación 3}$$

⁷ Whatman Círculos de papel de filtro cualitativo 1005-125, 2.5 micras, 94 s/100 mL/pulgada cuadrada, grado 5, diámetro de 125 mm (paquete de 100, <https://www.amazon.com.mx/Whatman-Filter-Paper-Grade-Pack/dp/B007FXLDOW>)

⁸ Masa y peso no son sinónimos. La masa es una propiedad de los cuerpos y se mide en kg y el peso es una fuerza que se aplica a los cuerpos y se mide en N. La confusión provino del uso de una báscula que aprovecha la fuerza de la gravedad terrestre para medir la masa de un cuerpo pesándolo [Nota de los(as) editores(as)]

donde:

N = Normalidad de la solución de NaOH utilizada en la titulación de la muestra, N

V = Volumen de NaOH gastados en la titulación de la muestra, mL

39.997 = Equivalente de NaOH

M = Masa de la muestra, g



Figura 2. Determinación del índice de acidez del aceite

Obtención de biodiésel y diseño experimental

Para realizar el proceso completo de esterificación, se requiere agregar metanol en exceso. Se ha reportado una relación molar mínima de 3:1 de metanol/aceite (Refaat et al., 2008), así como relaciones molares de hasta 12:1 (Soon et al., 2013). Por lo anterior, fue necesario calcular la masa de ácidos grasos en el aceite utilizado, por lo que se consideró lo reportado por Lafont et al. (2014) quien investigó la composición de ácidos grasos en siete diferentes aceites de soja, sin encontrar diferencia significativa entre ellos, por lo cual se tomaron los valores promedio reportados en la Tabla 2. Con esos valores se calculó la masa molar del aceite (Tabla 3).

Tabla 2. Descripción de ácidos grasos contenidos en el aceite de soja

Ácido graso	Fórmula química	Masa molecular	Fracción molar	Mmi.xi
Ácido palmítico	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	256.43 g/mol	11.29 ±0.2	2895.09 g/mol
Ácido esteárico	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	284.48 g/mol	4.11 ±0.1	1169.21 g/mol
Ácido oleico	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	282.46 g/mol	23.35 ±0.5	6595.44 g/mol
Ácido linoleico	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	288.45 g/mol	53.01 ±0.3	15290.73 g/mol
Ácido linolénico	C ₁₈ H ₃₀ O ₂	278 g/mol	5.91 ±0.04	1642.98 g/mol
Σ (MMi.Xi) +38				27631.46 g/mol

Tabla 3. Relación metanol/aceite utilizada en esta investigación

	Masa molar (kg/mol)	Densidad (kg/m ³)	Volumen (m ³)	Mol por volumen usado	Relación metanol/aceite
Aceite de soja usado	27.63	869	0.001	0.869	5.49
Metanol	0.03204	792	0.0002	0.1584	

El uso de catalizadores básicos, como NaOH e KOH, permite llevar a cabo las reacciones de interés bajo condiciones de presión estándar y temperaturas entre 50 y 65°C y el proceso de conversión es más rápido, con tiempos que oscilan entre 60 y 90 minutos (Ferella et al., 2010; Malabadi et al., 2023; Ramezani et al., 2010; Refaat y El Sheltawy, 2008). Por lo anterior, el índice de acidez mide la cantidad de ácidos grasos libres que tiene el aceite. En esta investigación esta información indicó agregar 3.5g de NaOH por litro de aceite usado, lo que sería equivalente al 3% de NaOH para que se lleve a cabo la reacción completa de transesterificación. La relación molar metanol/aceite fue de 5.49, lo que equivalía a que en un litro de aceite usado se agregaran 200 mL de metanol y 3.5 g de NaOH.

La reacción se llevó a cabo a 60°C con y sin ultrasonido, se trabajaron seis diferentes amplitudes y dos controles sin ultrasonido (Tabla 4).

Tabla 4. Tratamientos establecidos para evaluar el efecto del ultrasonido sobre el tiempo de producción de biodiésel y su rendimiento, n=3. Todos los tratamientos utilizaron NaOH como catalizador

Tratamiento	Amplitud (%)	Tiempo de calentamiento (min)
Control 1	Sin ultrasonido	60
Control 2	Sin ultrasonido	30
1	10	30
2	20	30
3	30	30
4	40	30
5	50	30
6	60	30

Se utilizó un homogeneizador marca *OPTIC IVYMEN SYSTEM* el cual trabaja a 22Hz a un rango de amplitud de 0 a 100% y cuenta con un sensor de temperatura. Se han reportado trabajos a partir de 20Hz con rendimientos arriba del 85% (Hingu et al., 2010; Milano et al., 2024; Refaat et al., 2008; Salamatinia et al., 2010; Thanh et al., 2010), por lo que se consideró viable el estudio a 22Hz. Por este motivo, los parámetros que permanecieron constantes fueron la frecuencia de 22Hz, temperatura de 60°C, concentración de NaOH de 3% y un tiempo de 30 min, a fin de evaluar el efecto del ultrasonido a menor tiempo del reportado con rendimientos mayores al 90%. Se hizo un diseño factorial con seis niveles, el factor es la amplitud y los niveles son 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60%. Se implementaron dos tratamientos a 0% de amplitud como controles, para poder comparar el efecto del ultrasonido. Se ha reportado el tiempo óptimo de reacción de transesterificación entre 60 y 90 min con rendimientos mayores al 90% y, en este trabajo, se usó 60 min como tiempo máximo. Las variables de respuesta fueron rendimiento de biodiésel, masa de glicerina, pH y los parámetros de caracterización del biodiésel estandarizado a nivel internacional (Tabla 4) (Figura 3).



Figura 3. Producción de biodiésel a partir de aceite usado con y sin ultrasonido

Caracterización del biodiésel

Para la caracterización del biodiésel se siguieron los métodos de prueba normalizados para el diésel como combustible. Los parámetros establecidos fueron: La viscosidad dinámica y cinemática a 40°C, punto de inflamación y punto de niebla, densidad a 15°C, volumen de biodiésel y rendimiento (Tabla 5). Para la evaluación de la viscosidad cinemática, Ec. 4, fue necesario medir la densidad y la viscosidad dinámica a 40°C. La viscosidad dinámica se midió en un viscosímetro rotacional (Figura 4a) a 600 rpm, en unidades de mPa.s. Se utilizaron 400 mL de biodiésel, se calentaron a 40°C y se

colocaron en un vaso de precipitado de 500 mL, angosto y alto, con un diámetro de 12 cm (ASTM-D445-21, 2021). También se midió la densidad de la muestra a 40 y 15°C, midiendo un volumen determinado y pesando su masa mediante la Ec. 5 (ASTM-D127-19, 2019).

Tabla 5. Parámetros de caracterización de biodiésel

Propiedad	Unidades	Método estándar	Precisión	Norma ASTM 6751 [23]
Viscosidad cinemática a 40°C	mm ² /s	ASTM D 445	± 0.01	1.9-6.0
Densidad a 15°C	mg/m ³	ASTM D 127	± 0.1	870-890
Índice de acidez	mg KOH/g	ASTM D 664 y EN 14111	± 0.001	Máx 0.8
Punto de inflamación	°C	ASTM D 93	± 0.100	Mín 130
Punto de enturbiamiento	°C	ASTM D 2500	± 0.100	(-3) -(12)
Glicerina libre	% masa	ASTM D 6584	N.E.	Máx 0.02
Humedad	%	EN 14214	±0.001	0.05% (500ppm)
Cenizas	%	NOM-L-63-CT-1981)	±0.002	0.15%

N.E. = no especificado

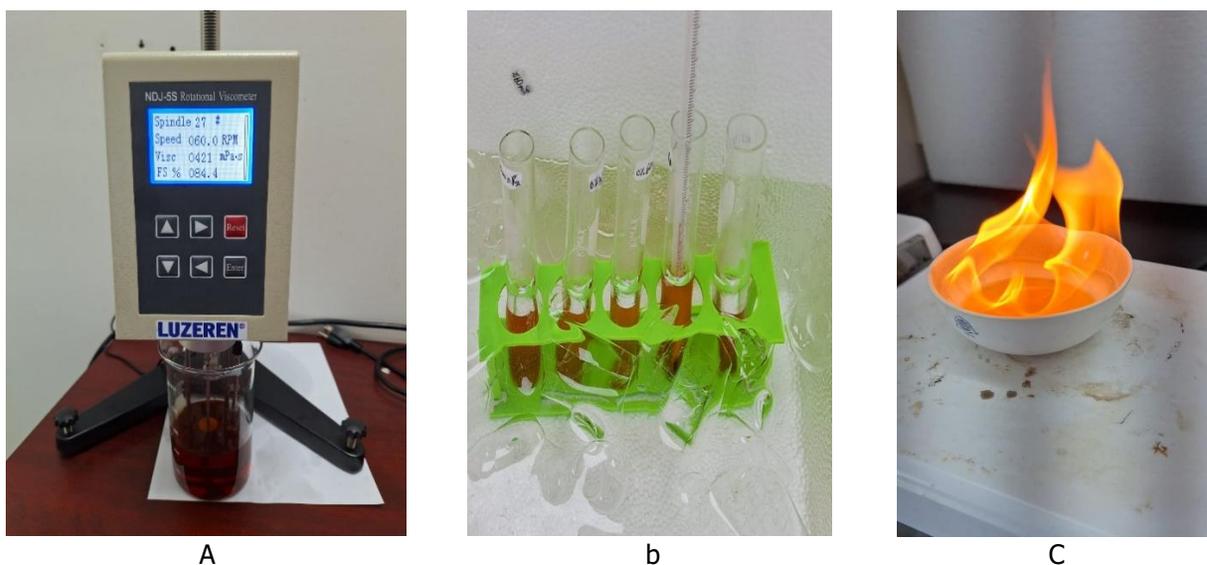


Figura 4. a) Viscosímetro rotacional marca Luzeren para determinar viscosidad dinámica, b) Prueba de punto de niebla, c) Prueba de punto de inflamación

$$\gamma = \frac{\mu}{\rho}$$

Ecuación 4

donde:

γ =Viscosidad cinemática, kg/m.s

μ =Viscosidad dinámica, Mpa.s

ρ : Densidad, kg/m³

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Ecuación 5

ρ : Densidad, kg/m³

m= Masa, kg

V= Volumen, m³

Se registró la temperatura a la que se observó el enturbiamiento del biodiésel o punto de niebla, sometiendo las muestras a -1°C , en un baño de agua congelada (ASTM-D2500-02, 2002) (Figura 3b). Para la determinación del punto de inflamación, se colocaron 20 mL de biodiésel en un crisol, el cual fue calentado a temperaturas mayores de 150°C . Una vez que se alcanzó la temperatura fijada, se le colocó una flama y se registró la temperatura a la que se encendió el biodiésel, siendo esta equivalente al punto de inflamación (ASTM-D93, 2020) (Figura 3c). Los volúmenes de biodiésel y glicerina se midieron empleando una probeta de 250 mL y el rendimiento se calculó empleando el volumen inicial de aceite y el volumen de biodiésel obtenido, mediante la Ec. 6.

$$RB = \frac{V_{\text{biodiesel}}}{V_{\text{aceite}}} (100) \quad \text{Ecuación 6}$$

donde:

RB = Rendimiento biodiésel, %

$V_{\text{biodiésel}}$ = Volumen obtenido del biodiésel, mL

V_{aceite} = Volumen utilizado del aceite, mL

Análisis estadístico

Se midieron la media y la desviación estándar de cada uno de los tratamientos. Se realizó un análisis de varianza, ANDEVA, de una vía ($\alpha = 0.05$) y la prueba de Tukey *post hoc* para la comparación de medias. Lo anterior para cada una de las variables de respuesta analizadas (densidad, punto de inflamación y punto de niebla, volumen de biodiésel, volumen de glicerina, y rendimiento). Considerando el bajo número de réplicas, los residuos de los ANDEVA fueron evaluados en cuanto a aleatoriedad y normalidad para garantizar que las pruebas estadísticas fueran paramétricas. Para todo lo anterior se utilizó el software Minitab 17 para Windows.

Resultados y discusión

Caracterización fisicoquímica de la materia prima

Se analizó aceite de soya usado en un restaurante de comida japonesa de la localidad. Los resultados de estos parámetros y de otras determinaciones pueden observarse en la Tabla 6.

Tabla 6. Caracterización del aceite usado de soya, proveniente de un restaurante

Parámetro	Resultado
Tipo de aceite	Soya
Humedad (%)	0.15 ± 0.03
Cenizas (%)	0.25 ± 0.02
pH	5 ± 0.20
Índice de acidez (mg NaOH/kg de aceite)	3.50 ± 0.10
Sólidos finos (mg/kg)	3 ± 0.01
Sólidos gruesos (mg/kg)	500 ± 10.00
Viscosidad dinámica a 40°C (mPa.s)	45 ± 1.00
Densidad (kg/m^3)	0.869
Viscosidad cinemática (mm^2/s)	51

La caracterización del aceite indicó que no se requiere un pretratamiento para la fabricación del biodiésel, ya que el índice de acidez fue de 3.5 mg de NaOH/kg de aceite. La relación utilizada para la fabricación del biodiésel fue de 1000 mL de aceite usado por 200 mL de metanol a una temperatura de 60°C . Además, el contenido de cenizas indica que los constituyentes inorgánicos y de sólidos finos son menores al 1%, por lo que la fabricación del biodiésel será con un contenido de impurezas no relevante.

Fabricación y caracterización del biodiésel

La teoría establece que a mayor frecuencia de ultrasonido se obtiene mayor cavitación en la reacción de transesterificación, lo que permite disminuir el tiempo de reacción y obtener altos rendimientos de biodiésel. Sin embargo, los resultados obtenidos indican que el aumento en la amplitud no precisamente conlleva a una mejora en el rendimiento, ya que se utilizaron amplitudes que van en un rango de 10-60% y el mayor rendimiento obtenido fue de 90.25% utilizando 30% de amplitud durante 30 minutos de reacción de transesterificación (Tabla 7).

Tabla 7. Caracterización de viscosidad, pH y porcentaje de rendimiento del biodiésel obtenido con y sin ultrasonido

Tratamiento	Amplitud (%)	Tiempo (min)	Rendimiento (%)	Viscosidad dinámica a 40°C (mPa.s)	Viscosidad cinemática a 40°C (mm ² /s)	pH
CONTROL 1	0%	60	88.40 ± 0.14	293 ± 2.85	3.29 ± 0.010	6.35 ± 0.21
CONTROL 2	0%	30	86.00 ± 0.35	275 ± 1.79	4.89 ± 0.005	7.85 ± 0.21
Tratamiento 1	10%	30	85.30 ± 0.14	430 ± 7.10	5.00 ± 0.003	9.80 ± 0.28
Tratamiento 2	20%	30	89.95 ± 0.50	418 ± 6.23	4.82 ± 0.006	8.80 ± 0.23
Tratamiento 3	30%	30	90.25 ± 0.02	423 ± 5.34	4.90 ± 0.004	7.85 ± 0.21
Tratamiento 4	40%	30	88.10 ± 0.27	422 ± 4.90	4.91 ± 0.003	6.80 ± 0.27
Tratamiento 5	50%	30	89.85 ± 0.35	424 ± 1.10	4.93 ± 0.002	5.85 ± 0.21
Tratamiento 6	60%	30	86.45 ± 0.64	422 ± 5.08	4.92 ± 0.005	4.90 ± 0.14
Tratamiento 7	60%	10	87.05 ± 0.35	420 ± 1.35	4.95 ± 0.008	5.45 ± 0.12

Es probable que esto se deba a que a amplitudes bajas no se genera la energía de activación necesaria para llevar a cabo la reacción de transesterificación, mientras que a amplitudes elevadas pueden hacer que la punta del sonotrodo se llene de burbujas, lo que produce coalescencia de burbujas y desacoplamiento acústico. Estos criterios actúan para reducir el número de burbujas de cavitación activas. Esto indicaría que se debe encontrar un punto intermedio (optimización) en donde se logre mejorar el efecto de dispersión y transferencia de masa de los ultrasonidos, al tiempo que permita que las dos capas de reacción inmiscibles se emulsionen por completo (Golmakani et al., 2022).

La amplitud máxima utilizada fue de 60% y se obtuvo un rendimiento de 86.45% en un tiempo de 30 minutos y de 87.05% cuando la reacción ocurrió en 10 minutos. Por tanto, se podría establecer que es posible disminuir el tiempo de reacción e incrementar los rendimientos de biodiésel. En efecto, Sáez-Bastante et al. (2024) demostraron que un aumento en la frecuencia aplicada a la mezcla de reacción da lugar a resultados ligeramente mejores, para los mismos tiempos de reacción evaluados en la presente investigación. Los autores obtuvieron un rendimiento de biodiésel de 99.28% bajo las siguientes condiciones: 100% de amplitud durante 15 minutos de reacción, utilizando 1.25% de catalizador KOH. Después de 15 min de reacción, los resultados tanto para biodiésel como para glicéridos se encontraban dentro de la norma europea EN 14214 para todas las frecuencias utilizadas.

Por otro lado, los rendimientos de biodiésel empleando el método convencional (sin ultrasonido) fueron de 88.5% y 86% en tiempos de reacción de 60 y 30 minutos, respectivamente. Esto permitiría inferir que, para incrementar los rendimientos, es necesario aumentar la temperatura de reacción. Cuando a la reacción de transesterificación se le aplicó ultrasonido se alcanzaron rendimientos superiores al método convencional: 89.95, 90.25 y 89.85% a 20, 30 y 50% de amplitud. El efecto del tratamiento por ultrasonido en el porcentaje del rendimiento del biodiésel presentó diferencia significativa entre todos los experimentos en el rendimiento de todos los tratamientos aplicados ($P < 0.05$) (Tabla 7).

Los rendimientos obtenidos en este trabajo son superiores a los que reporta Vital-López et al. (2023) quienes utilizaron aceite de girasol y obtuvieron un rendimiento de 65.32% empleando un tiempo de reacción de 30 minutos, KOH como catalizador y una temperatura de reacción de 22°C. Los valores de viscosidad del biodiésel fueron de $4.64 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ y la densidad fue de 0.88 g cm^{-3} . Sin embargo, cuando incrementaron la temperatura de reacción a 50°C los rendimientos incrementaron a 84.14% y los valores de viscosidad y densidad cambiaron: $4.04 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ y 0.87 g cm^{-3} . No obstante, los mejores rendimientos (93.40%) los lograron alcanzar cuando duplicaron el tiempo de reacción (60 minutos), utilizando una relación molar metanol/aceite de 6:1 y una frecuencia de 24 kHz. En esta investigación se alcanzaron rendimientos similares a los optimizados por Vital-López et al. (2023), con una diferencia de 3.15%, incrementando 10°C la temperatura y disminuyendo a la mitad de tiempo (30 minutos) la reacción de transesterificación.

Otro trabajo que obtuvo resultados similares a los de la presente investigación fue el de Golmakani et al. (2022) quienes emplearon aceite de oliva no comestible y el mismo tiempo de reacción (30 minutos). Reportaron un rendimiento de 92.69%, lo que implica una diferencia de 2.44% de rendimiento de biodiésel, comparado con los resultados de esta investigación. Estos autores, además, consideraron tres niveles de potencia de ultrasonido (30, 90, 150 W), relaciones molares metanol/aceite (3, 9, 15), concentraciones de catalizador (0.5, 1.0, 1.5%), tiempos de ultrasonido (15, 30, 45 min) y temperaturas de reacción (45, 55, 65°C); encontrando que cuando se utilizó un nivel de potencia de ultrasonido de 90 W, una relación molar metanol/aceite de 9, una concentración de catalizador de 1.0%, un tiempo de ultrasonido de 30 min y una temperatura de reacción de 55°C se generaron los mayores rendimientos. La viscosidad obtenida fue de $4.201 \text{ mm}^2/\text{s}$ y la densidad de 892.996 kg/m^3 . Por tanto, concluyeron que la optimización de las condiciones de reacción de la operación de ultrasonido puede aumentar eficazmente el rendimiento del biodiésel, al mismo tiempo que reduce el consumo de energía (4,775 kWh/kg) y reduce el tiempo de reacción (30 min).

Con respecto de la viscosidad cinemática a 40°C no se presentó diferencia significativa entre los tratamientos con ultrasonido ($P > 0.05$), ya que estuvieron dentro del rango de 1.9 y $6 \text{ mm}^2/\text{s}$ en todos ellos; sin embargo, sí aumentó con respecto a los controles. Todas las viscosidades obtenidas con los tratamientos de ultrasonido cumplieron con el rango establecido en la norma. La viscosidad dinámica a 40°C no presentó diferencia significativa entre los tratamientos por ultrasonido ($P > 0.05$), pero sí se observó un incremento de aproximadamente 200 mPa.s con respecto de los controles (Tabla 7).

El pH aceptado del biodiésel se reporta entre 6 y 8.4 (EN-14214, 2008; Medina, 2005; Pandey et al., 2012) y, en este proyecto, se observó que el pH disminuyó conforme la amplitud del ultrasonido aumentaba, mostrando diferencia significativa entre los tratamientos ($P < 0.05$). Se vio que a amplitudes de 50 y 60% el pH estuvo por debajo de 6, límite mínimo permitido (Tabla 7).

En la Tabla 8 se observó una diferencia estadísticamente significativa ($P < 0.05$) en el porcentaje de humedad del biodiésel obtenido ($P < 0.05$), los cuales fueron valores menores del 6% en todos los tratamientos con y sin ultrasonido. La EN 14214 normaliza un contenido máximo de agua de 500 ppm o 0.05% de humedad, por lo que fue necesario reducir la humedad calentando las muestras de biodiésel a 100°C durante dos horas para, posteriormente, hacer las pruebas de punto de inflamación y punto de niebla.

El contenido de cenizas en los controles fue de 0.06 y 0.07%, los tratamientos con ultrasonido de amplitud de 10%, 30, 40% y 60% no presentaron diferencia significativa ($P > 0.05$). Sin embargo, en amplitudes del 20% y 50% presentaron valores de 0.17 y 0.12% respectivamente, siendo el del 20% de amplitud, el único que no cumple con la norma (NOM-L-63-CT, 1981) que indica un rango de 0.002 a 0.15% (Tabla 8).

El punto de niebla osciló entre 0.5 y 2°C, observándose el valor máximo de 2°C a una amplitud de 30%, el cual disminuyó conforme se fue incrementando la amplitud hasta llegar a 0°C con 60%. Con las amplitudes de 10 y 20% se obtuvieron valores menores a los controles. En todos los tratamientos se obtuvieron valores dentro del rango permitido de -3°C a 12°C (Tabla 8).

Los tratamientos sin ultrasonido presentaron un punto de inflamación de 190°C, observándose que el tratamiento por ultrasonido presenta una diferencia estadísticamente significativa ($P < 0.05$), ya que conforme aumentó la amplitud se redujo el punto de inflamación entre 180 y 170°C en amplitudes del 10 al 50%, observándose un incremento a 190°C en amplitudes de 60%. En todos los tratamientos se cumple con la restricción de mínimo 130°C (Tabla 8).

Tabla 8. Caracterización de humedad, cenizas, densidad, punto de niebla e inflamación del biodiésel obtenido con y sin ultrasonido

Tratamiento *	Amplitud (%)	Tiempo (min)	Humedad (%)	Cenizas (%)	Punto(°C)		Densidad	
					Niebla	Inflamación	40°C (kg/m ³)	15°C (kg/m ³)
CONTROL 1	0%	60	2.96 ±0.04	0.06 ±0.001	1.50	190.00	857.76 ±0.10	866.24 ±0.10
CONTROL 2	0%	30	4.29 ±0.07	0.07 ±0.002	0.75	190.00	864.22 ±0.05	872.38 ±0.09
Tratamiento 1	10%	30	4.08 ±0.16	0.03 ±0.001	1.00	190.00	859.37 ±0.10	872.66 ±0.10
Tratamiento 2	20%	30	2.71 ±0.11	0.17 ±0.001	0.50	180.00	866.62 ±0.03	872.66 ±0.05
Tratamiento 3	30%	30	2.29 ±0.08	0.04 ±0.002	2.00	180.00	862.1 ±0.04	869.03 ±0.05
Tratamiento 4	40%	30	2.77 ±0.06	0.05 ±0.002	1.00	166.00	858.67 ±0.06	874.97 ±0.09
Tratamiento 5	50%	30	5.95 ±0.12	0.12 ±0.001	1.00	170.00	860.08 ±0.07	871.77 ±0.05
Tratamiento 6	60%	30	5.34 ±0.21	0.07 ±0.001	0.00	190.00	858.37 ±0.10	878.6 ±0.10
Tratamiento 7	60%	10	5.31 ±0.16	0.06 ±0.002	0.00	190.00	848.1 ±0.10	869.89 ±0.10

*Ver Nomenclatura al final del artículo

Los valores de densidad a 15°C indican cumplimiento con la norma en todos los tratamientos con ultrasonido, excepto en el control 2, que se dio tratamiento sin ultrasonido durante 30 min, el cual presentó 866kg/m³, indicando 4kg/m³ menos del límite inferior permitido que era de 870 kg/m³ (Tabla 8).

Conclusiones y recomendaciones

Se observó que la reacción de transesterificación asistida por ultrasonido tiene un efecto significativo en la producción de biodiésel, ya que el reducir 30 minutos la reacción de transesterificación y utilizar diferentes amplitudes de ultrasonido, tuvo resultados similares al proceso de calentar durante 60 minutos a 60°C sin ultrasonido. Esto impacta en un proceso más rápido y de menor consumo energético debido a la reducción del calentamiento. Se concluye que es viable producir biodiésel a partir del aceite usado de soya con un menor tiempo de reacción de esterificación comparado con el método convencional, lo cual impacta en la reducción de costos del proceso.

Por otro lado, se recomienda continuar con la investigación, reduciendo el tiempo de exposición al ultrasonido, a fin de evaluar el efecto del tiempo en los rendimientos de biodiésel. Con respecto de la humedad, es necesario aplicar un tratamiento térmico para alcanzar los porcentajes aceptados por la norma. Como desafío local se tiene que las regulaciones pueden no tener en cuenta las variaciones regionales, como el clima y la logística, que pueden afectar la calidad del biodiésel. Por ejemplo, el alto contenido de agua en el biodiésel ha sido un problema sistémico en ciertas regiones de Brasil, impactando el cumplimiento de las normas nacionales (Oliveira et al., 2021). Si bien estas regulaciones tienen como objetivo mejorar la calidad y sostenibilidad del biodiésel, los desafíos actuales en la implementación y las disparidades regionales ponen de relieve la necesidad de marcos regulatorios adaptativos que tengan en cuenta las condiciones locales.

Nomenclatura

CONTROL 1.	Tratamiento a 60°C, con un tiempo de 60 min, con 3.5% de NaOH, y una relación metanol/aceite de 5.5:1. A este tratamiento no se aplicó ultrasonido
CONTROL 2.	Tratamiento a 60°C, con un tiempo de 30 min, con 3.5% de NaOH, y una relación metanol/aceite de 5.5:1. A este tratamiento no se aplicó ultrasonido
Tratamiento 1.	Tratamiento a 60°C, con un tiempo de 30 min, con 3.5% de NaOH, y una relación metanol/aceite de 5.5:1. A este tratamiento se aplicaron 22Hz de frecuencia y 10% de amplitud
Tratamiento 2.	Tratamiento a 60°C, con un tiempo de 30 min, con 3.5% de NaOH, y una relación metanol/aceite de 5.5:1. A este tratamiento se aplicaron 22Hz de frecuencia y 20% de amplitud
Tratamiento 3.	Tratamiento a 60°C, con un tiempo de 30 min, con 3.5% de NaOH, y una relación metanol/aceite de 5.5:1. A este tratamiento se aplicaron 22Hz de frecuencia y 30% de amplitud
Tratamiento 4.	Tratamiento a 60°C, con un tiempo de 30 min, con 3.5% de NaOH, y una relación metanol/aceite de 5.5:1. A este tratamiento se aplicaron 22Hz de frecuencia y 40% de amplitud
Tratamiento 5.	Tratamiento a 60°C, con un tiempo de 30 min, con 3.5% de NaOH, y una relación metanol/aceite de 5.5:1. A este tratamiento se aplicaron 22Hz de frecuencia y 50% de amplitud
Tratamiento 6	Tratamiento a 60°C, con un tiempo de 30 min, con 3.5% de NaOH, y una relación metanol/aceite de 5.5:1. A este tratamiento se aplicaron 22Hz de frecuencia y 60% de amplitud

Reconocimientos

Este trabajo surgió del proyecto "Evaluación del efecto de ultrasonido con catalizador químico en la producción de biodiésel a partir de aceite usado", el cual fue financiado por la Universidad Tecnológica de Culiacán, en la convocatoria de proyectos internos de investigación 2024.

Referencias bibliográficas

- Aboelazayem, O., Gadalla, M., Saha, B. 2017. Optimising biodiesel production from high acid value waste cooking oil using supercritical methanol. In: SEEP 2017 – Proceedings of the 10th International Conference on Sustainable Energy & Environmental Protection. Pp: 57-66. University of Maribor Press, Maribor. ISBN 9789612860646. URI: <https://eprints.lancs.ac.uk/id/eprint/163032>
- Ashok, C., Sankarajan, E., Kumar, P., Janani, G., Raj, A., Muthuvelu, K. S., Rangasamy, G. 2024. Ultrasound-assisted transesterification of waste cooking oil to biodiesel utilizing banana peel derived heterogeneous catalyst. *Biotechnology for Sustainable Materials*. 1(5):1-14. 10.1186/s44316-024-00004-z
- ASTM-D93. 2020. Standard test methods for flash point by Pensky-Martens closed cup tester.
- ASTM-D127-19. 2019. Standard test method for drop melting point of petroleum wax, including petrolatum.
- ASTM-D445-21. 2021. Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and calculation of dynamic viscosity).
- ASTM-D482. 2019. Standard test method for ash from petroleum products, <https://doi.org/10.1520/D0482-19>
- ASTM-D664-06. 2007. Standard test method for acid number of petroleum products by potentiometric titration.
- ASTM-D1796. 2022. Standard test method for water and sediment in fuel oils by the centrifuge method (laboratory procedure).
- ASTM-D2500-02. 2002. Standard test method for cloud point of petroleum products.
- ASTM-D6304. 2020. Standard test method for determination of water in petroleum products, lubricating oils, and additives by coulometric Karl Fischer titration.
- Ayas, N., Yilmaz, O. 2014. Catalytic esterification and transesterification reaction of high acidic value waste oil by microwave heating. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 34(2):575-581. <https://doi.org/10.1002/ep.11985>
- Awogbemi, O., Von-Kallon, D.V., Aigbodion, V.S. 2021. Trends in the development and utilization of agricultural wastes as heterogeneous catalyst for biodiesel production. *Journal of the Energy Institute*. 98:244-258. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2021.06.017>

- Ben-Hassen Trabelsi, A., Zaafour, K., Baghdadi, W., Naoui, S., Ouerghi, A. 2018. Second generation biofuels production from waste cooking oil via pyrolysis process. *Renewable Energy*. 126:888-896. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.002>
- Bhatia, S.K., Gurav, R., Choi, T.-R., Kim, H.J., Yang, S.-Y., Song, H.-S., Park, J.Y., Park, Y.-L., Han, Y.-H., Choi, Y.-K., Kim, S.-H., Yoon, J.-J., Yang, Y.-H. 2020. Conversion of waste cooking oil into biodiesel using heterogenous catalyst derived from cork biochar. *Bioresource Technology*. 302:122872. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122872>
- Bousba, D., Sobhi, C., Zouaoui, E., Rouibah, K., Boublia, A., Ferkous, H., Haddad, A., Gouasmia, A., Avramova, I., Mohammed, Z., Parvulescu, V.I., Yadav, K.K., Hasan, M., Cabral-Pinto, M.M.S., Elboughdiri, N., Benguerba, Y. 2024. Efficient biodiesel production from recycled cooking oil using a NaOH/CoFe₂O₄ magnetic nano-catalyst: Synthesis, characterization, and process enhancement for sustainability. *Energy Conversion and Management*. 300:118021. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.118021>
- EN-14214. 2008. Improvements needed for the biodiesel standard en 14214.
- Félix, S., Araújo, J., Pires, A.M., Sousa, A.C. 2017. Soap production: A green prospective. *Waste Management*. 66:190-195. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.04.036>
- Gebremariam, S.N., Marchetti, J.M. 2017. Biodiesel production technologies: Review. *AIMS Energy*. 5(3):425-457. <https://doi.org/10.3934/energy.2017.3.425>
- Golmakani, M.T., Dehghan, L., Rahimizad, N. 2022. Biodiesel production enhanced by ultrasound-assisted esterification and transesterification of inedible olive oil. *Grasas y Aceites*. 73(1):12. [10.3989/gya.1233202](https://doi.org/10.3989/gya.1233202)
- Hassan, A.A., Smith, J.D. 2020. Investigation of microwave-assisted transesterification reactor of waste cooking oil. *Renewable Energy*. (162):1735-1746. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.123>
- Hingu, S.M., Gogate, P.R., Rathod, V.K. 2010. Synthesis of biodiesel from waste cooking oil using sonochemical reactors. *Ultrasonics Sonochemistry*. 17(5):827-832. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.02.010>
- Kabir, I., Yacob, M., Radam, A. 2014. Households' awareness, attitudes and practices regarding waste cooking oil recycling in Petaling, Malaysia. *Journal of Environmental Science, Toxicology, and Food Technology*. 8(10):45-51. [10.9790/2402-081034551](https://doi.org/10.9790/2402-081034551)
- Kalita, P., Basumatary, B., Saikia, P., Das, B., Basumatary, S. 2022. Biodiesel as renewable biofuel produced via enzyme-based catalyzed transesterification. *Energy Nexus*. 6(2):100087. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100087>
- Lafont, J.J., Durango, L.C., Aramendiz, H. 2014. Estudio químico del aceite obtenido a partir de siete variedades de soya (*Glycine max* L.). *Información Tecnológica*. 25(2):79-86. [doi: 10.4067/S0718-07642014000200009](https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000200009)
- Malabadi, R.S., Kolkar, K., Chalannavar, R., Castaño-Coronado, K. 2023. Biodiesel production via transesterification reaction. *Open Access Research Journal of Science and Technology*. 09(02):010-021. [10.53022/oarjst.2023.9.2.0064](https://doi.org/10.53022/oarjst.2023.9.2.0064)
- Meher, L.C., Vidya-Sagar, D., Naik, S.N. 2006. Technical aspects of biodiesel production by transesterification—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 10(3):248-268. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.09.002>
- Milano, J., Tiong, S.K., Silitonga, A.S., Chia, S.R., Ong, M.Y., Kusumo, F., Sebayang, A.H., Yusof, T., Kalam, M.A. 2024. Synthesis of *Ceiba pentandra* biodiesel using ultrasound and infrared radiation: Comparison and fuel characterisation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1372(1):012046. [10.1088/1755-1315/1372/1/012046](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1372/1/012046)
- Nisar, S., Ishaq, A., Sultana, A., Faiza, S.M. 2017. Reactions other than transesterification for biodiesel production. *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences*. 12:141-146.
- NOM-L-63-CT. 1981. Norma Oficial Mexicana NOM-L-63-CT-1981, productos derivados del petróleo-combustible diésel-determinación del contenido de cenizas, así como el aviso de la declaratoria de vigencia.
- Oliveira, P.A., Baesso, R.M., Morais, G.C., Alvarenga, A.V., Costa-Félix, R.P.B. 2021. Ultrasound-assisted transesterification of soybean oil using low power and high frequency and no external heating source. *Ultrasonics Sonochemistry*. (78):105709. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105709>
- Olu-Arotiowa, O.A., Odesanmi, A.A., Adedotun, B.K., Ajibade, O.A., Olasesan, I.P., Odofoin, O.I., Abass, A.O. 2022. Review on environmental impact and valorization of waste cooking oil. *LAUTECH Journal of Engineering and Technology*. 16(1): 144-163. <https://www.laujet.com/index.php/laujet/article/view/474/377>
- 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(5):2870-2883. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.004>
- Pikula, K., Zakharenko, A., Stratidakis, A., Razgonova, M., Nosyrev, A., Mezhuev, Y., Tsatsakis, A., Golokhvast, K. 2020. The advances and limitations in biodiesel production: Feedstocks, oil extraction methods, production, and environmental life cycle assessment. *Green Chemistry Letters and Reviews*. 13(4):275-294. [10.1080/17518253.2020.1829099](https://doi.org/10.1080/17518253.2020.1829099)
- Refaat, A.A., El Sheltawy, S.T. 2008. Comparison of three options for biodiesel production from waste vegetable oil. (109):133-140.
- Sáez-Bastante, J., Pinzi, S., Priego-Capote, F., Dorado, M.P. 2024. Multifrequency ultrasound-based predictive method for biodiesel production. *Johnson Matthey Technology Review*. 68(3):427-438. <https://doi.org/10.1595/205651324X17004922618615>
- Sankaranarayanan, S., Kannan, S. 2013. Sonochemistry: A simple and efficient route for biodiesel production from neat and blended vegetable oils using Idh-derived base catalysts. *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*. 5(4):210-218. <https://doi.org/10.1007/s12572-013-0098-y>
- Sharma, S., Saxena, V., Baranwal, A., Chandra, P., Pandey, L.M. 2018. Engineered nanoporous materials mediated heterogeneous catalysts and their implications in biodiesel production. *Materials Science for Energy Technologies*. 1(1):11-21. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2018.05.002>
- Talebian-Kiakalaieh, A., Amin, N.A.S., Mazaheri, H. 2013. A review on novel processes of biodiesel production from waste cooking oil. *Applied Energy*. (104):683-710. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.061>

-
- Tchuifon, T.D.R., Lemoupi, N.S.B., Ndifor-Angwafor, G.N., Nanssou, K.P.A., Nsah-Ko, T., Tagaboue, N.R.D., Tiotsop, K.I.-H., Bopda, A., Gabche A.S. 2020. Production of biodiesel by transesterification reaction of waste cooking oil. *Chemical Science International Journal*. 29(5):1-12. <https://doi.org/10.9734/csji/2020/v29i530176>
- Topare, N., Patil, K., Naik, P., Sonawane, M., Joshi, P. 2015. Application of ultrasound for synthesis of biodiesel. *Emerging Trends in Chemical Engineering*. 2(1):1-8.
- Tres, A., Bou, R., Guardiola, F., Nuchi, C.D., Magrinyà, N., Codony, R. 2013. Use of recovered frying oils in chicken and rabbit feeds: Effect on the fatty acid and tocol composition and on the oxidation levels of meat, liver and plasma. *Animal*. 7(3):505-517. <https://doi.org/10.1017/S1751731112001607>
- Vital-López, L., Mercader-Trejo, F., Rodríguez-Reséndiz, J., Zamora-Antuñano, M.A., Rodríguez-López, A., Esquerre-Verastegui, J.E., Vázquez, N.F., García-García, R. 2023. Electrochemical characterization of biodiesel from sunflower oil produced by homogeneous catalysis and ultrasound. *Processes*. 11(1):12. [10.3390/pr11010094](https://doi.org/10.3390/pr11010094)
- Yaakob, Z., Mohammad, M., Alherbawi, M., Alam, Z., Sopian, K. 2013. 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>
- Zargar, M., Ahmadiania, E., Asli, H., Karim, M.R. 2012. Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen. *Journal of Hazardous Materials*. 233-234:254-258. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.06.021>