

VALORIZACIÓN DE GLICERINA RESIDUAL PARA LA PRODUCCIÓN DE TRIACETATO DE GLICERILO COMO ADITIVO ENERGÉTICO EN BIODIÉSEL DE ACEITE RESIDUAL

Valorization of residual glycerin for the production of glyceryl triacetate as an energy additive in waste-oil biodiesel

Beatriz A. CARRILLO-OLIVAS, Karla A. TALAMANTES-GARCÍA, José C. ESPINOZA-HICKS,
Héctor M. HERAS-MARTÍNEZ, Raúl E. OROZCO-MENA y David CHÁVEZ-FLORES*

Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, Circuito 1, Campus Universitario, 31110 Chihuahua, Chihuahua, México.

*Autor para correspondencia: dchavezf@uach.mx

(Recibido: septiembre de 2025; aceptado: febrero de 2026)

Palabras clave: biocombustible, glicerol residual, triacetina, poder calorífico, química circular.

RESUMEN

La creciente demanda de combustibles fósiles ha incrementado las emisiones de gases de efecto invernadero durante su extracción, refinación y combustión, acentuando el impacto climático de estos procesos. Como alternativa sostenible, el biodiésel puede producirse a partir de residuos lipídicos vegetales; sin embargo, su síntesis genera entre 100 y 300 mL de glicerina residual alcalina por litro de biodiésel, lo que reduce la sostenibilidad integral del proceso. En este estudio se obtuvo biodiésel a partir de aceite residual mediante transesterificación alcalina, alcanzando conversiones de $99 \pm 1\%$ ($n = 3$). La glicerina generada se valorizó mediante su acetilación con anhídrido acético (6:1 molar) y 0.5 % de H_2SO_4 como catalizador, obteniéndose triacetato de glicerilo con un rendimiento de $75 \pm 3\%$. La estructura del producto se confirmó por resonancia magnética nuclear de protón y espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier. Las mezclas biodiésel-triacetato de glicerilo mostraron un incremento progresivo en el poder calorífico inferior, alcanzando en la formulación 94:6 un valor 48 % superior al biodiésel puro, comparable con el diésel comercial. Este resultado, junto con la valorización directa de la glicerina residual, permite disminuir los residuos, mejorar el desempeño energético y fortalecer la integración de principios de química circular en la cadena de producción de biocombustibles.

Key words: biofuel, residual glycerol, triacetin, calorific value, circular chemistry.

ABSTRACT

The increasing demand for fossil fuels has led to higher greenhouse gas emissions during their extraction, refining, and combustion, intensifying their impact on climate change. As a sustainable alternative, biodiesel can be produced from vegetable lipid residues; however, its synthesis generates between 100 and 300 mL of alkaline residual glycerin per liter of biodiesel, reducing the overall sustainability of the process. In this study, biodiesel was produced from waste oil via alkaline transesterification, achieving a conversion of $99 \pm 1\%$ ($n = 3$). The generated glycerin was valorized through acetylation with acetic anhydride (6:1 molar ratio) using 0.5 % H_2SO_4 as a catalyst, yielding glyceryl triacetate with a yield of $75 \pm 3\%$. The structure of the product was confirmed

by proton nuclear magnetic resonance and Fourier transform infrared spectroscopy. Biodiesel-glyceryl triacetate blends showed a progressive increase in lower heating value, reaching a 94:6 formulation that is 48% higher than that of pure biodiesel and comparable to commercial diesel. This result, together with the direct valorization of residual glycerin, contributes to reducing waste, improving energy performance, and strengthening the integration of circular chemistry principles within the biofuel production chain.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la explotación del petróleo sigue siendo una de las actividades más demandadas debido al gran consumo de sus derivados, entre los que destacan la gasolina, el diésel y el gas natural (Arshad et al. 2018). Sin embargo, cuando estos combustibles fósiles se queman para liberar energía, generan gases de efecto invernadero como monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y compuestos aromáticos como el benzopireno, los cuales se acumulan en la atmósfera y contribuyen al deterioro ambiental. (Fygueroa et al. 2008). Esta problemática, agravada por la dependencia energética de recursos fósiles no renovables, ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles. Ante este panorama, como solución parcial, ha surgido un fuerte interés por el biodiésel, un biocombustible que se obtiene principalmente a partir de aceites vegetales, grasas animales o cualquier materia prima rica en lípidos. Su composición está basada en ésteres metílicos de ácidos grasos, lo que lo convierte en una alternativa renovable frente a los combustibles convencionales (Demirbas 2008, Aransiola et al. 2014). El biodiésel ofrece múltiples ventajas: es renovable, no emite azufre a la atmósfera, puede producirse localmente sin depender de grandes infraestructuras industriales y, además, reduce la dependencia de los combustibles fósiles. Todo esto contribuye tanto a la protección ambiental como a la soberanía energética (Al-Zuhair 2007, Hoekman y Robbins 2012, Nisar et al. 2018). Su producción se realiza, en la mayoría de los casos, mediante la transesterificación, una reacción química entre aceites (ácidos grasos) y alcoholes como metanol o etanol, en presencia de un catalizador alcalino como hidróxido de sodio o potasio (Riesco-Ávila et al. 2017). Este método es muy utilizado porque permite altas conversiones en tiempos cortos y a bajos costos de operación (Echeverría-Vizcaya et al. 2013, Aransiola et al. 2014, Christopher et al. 2014). No obstante, para que la producción de biodiésel sea realmente sostenible, es necesario avanzar hacia sistemas de bajo impacto ambiental que contemplen

no solo el biocombustible principal, sino también el destino de sus subproductos.

En este estudio se empleó aceite vegetal residual de un comedor industrial como materia prima para la obtención de biodiésel mediante transesterificación. Este proceso genera glicerina cruda como subproducto, una mezcla alcalina con agua y restos de catalizador que limita sus usos directos. El aprovechamiento conjunto del biodiésel y de la glicerina procedentes del mismo residuo establece un flujo de valorización alineado con los principios de la química circular. Una limitación del proceso convencional de transesterificación es la generación de glicerina cruda, que se produce en una proporción aproximada de 100-300 mL por litro de biodiésel producido. Esta glicerina residual contiene agua, restos de catalizador y material orgánico (Knothe 2006), lo que restringe sus aplicaciones directas y ocasiona que, en muchos casos, se descarte sin un aprovechamiento adecuado. Por ello, la valorización de este subproducto se ha convertido en un punto clave para mejorar la circularidad de la cadena de producción de biocombustibles. Diversas rutas han sido exploradas, entre ellas la obtención de solketal (2-metoxi-1,2-propanodiol), carbonato de glicerol, propilenglicol y acetales, todos ellos derivados de la glicerina con aplicaciones potenciales. No obstante, estas alternativas suelen requerir catalizadores especializados, purificaciones complejas o condiciones de operación rigurosas, lo que limita su implementación a escala pequeña o semindustrial (Dasgupta et al. 2022, Amin et al. 2023). En contraste, el triacetato de glicerilo (TAG) presenta ventajas relevantes en entornos de bajo costo y en esquemas de química verde. Su síntesis puede llevarse a cabo en condiciones moderadas, sin solventes y con cantidades reducidas de catalizador, lo que favorece la selectividad hacia el producto completamente acetilado (Silva et al. 2010). Adicionalmente, el TAG es completamente miscible con el biodiésel, presenta baja toxicidad y puede actuar como aditivo al mejorar propiedades como la viscosidad, la fluidez y el poder calorífico (Casas et al. 2010, Silva et al. 2010, Raghuvanshi

y Gupta 2010, Usai et al. 2010, Huang et al. 2014, Monteiro et al. 2018). Estas características lo hacen particularmente atractivo frente a otros derivados cuya compatibilidad con las matrices lipídicas es limitada o variable.

El enfoque adoptado en este trabajo se alinea con los principios de la química circular, definida por la norma ISO 59004 como un sistema en el que los recursos, materiales y productos se mantienen en ciclos de uso y valorización mediante estrategias que reducen la generación de residuos, minimizan la demanda de recursos vírgenes y optimizan el desempeño ambiental (ISO 2024). En este marco, valorar la glicerina mediante la integración de derivados químicos de esta como aditivo de biodiésel aumenta la economía atómica, promueve la química circular debido a la eliminación de un residuo y la maximización del aprovechamiento del aceite residual utilizado como materia prima. En este estudio se empleó aceite vegetal residual proveniente de un comedor industrial para producir biodiésel mediante transesterificación alcalina. Posteriormente, se valorizó la glicerina generada mediante su conversión directa en triacetato de glicerilo. Finalmente, se evaluaron mezclas de biodiésel-TAG para determinar su impacto sobre el poder calorífico del biocombustible. Este enfoque integrado busca no solo mejorar la eficiencia energética del biodiésel, sino también demostrar que la incorporación de estrategias de química circular en la cadena de producción puede generar biocombustibles competitivos a partir de residuos urbanos de bajo costo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Síntesis de ésteres metílicos de ácidos grasos (biodiésel)

Como se muestra en la **figura 1**, el aceite vegetal residual se transformó en biodiésel mediante transesterificación alcalina. En un vaso de precipitados de 100 mL se colocaron 50 mL de aceite vegetal residual

previamente calentado a 55 °C. Posteriormente, se adicionaron nueve equivalentes de metóxido de potasio preparado in situ a partir de hidróxido de potasio (KOH) y metanol. La relación molar metanol:aceite 9:1 se seleccionó con base en estudios previos que demuestran que un exceso moderado de metanol desplaza el equilibrio hacia los ésteres metílicos, según el principio de Le Chatelier, lo que permite alcanzar conversiones cercanas al 100 % incluso con aceites residuales de mayor acidez (Riesco-Ávila et al. 2017). Relaciones inferiores (6:1) presentan menor eficiencia en sistemas con impurezas, mientras que relaciones mayores (12:1 o superiores) incrementan el consumo energético sin mejoras significativas en la conversión, por lo que la relación 9:1 representa un punto óptimo técnico y ambiental. La mezcla se mantuvo en agitación constante (350 rpm) durante 2 h. Al finalizar, se transfirió a un embudo de separación de 125 mL y se dejó reposar durante 24 h. La fase inferior correspondiente a la glicerina cruda se separó, mientras que el biodiésel se lavó con solución de ácido fosfórico al 1 % (v/v) y posteriormente con agua destilada hasta pH 6-8. Para eliminar la humedad residual, el biodiésel se calentó a 100 °C durante 20 min.

Síntesis de triacetato de glicerilo

La glicerina cruda recuperada se neutralizó con ácido acético y se sometió a acetilación con anhídrido acético (Ac_2O), de acuerdo con la **figura 2**. En un matraz de fondo redondo se mezclaron 5 g de glicerina, seis equivalentes de Ac_2O y 1 % p/p de H_2SO_4 como catalizador. La mezcla se calentó a 80 °C con agitación constante (350 rpm) durante 2 h. La relación molar 6:1 se seleccionó considerando que un exceso moderado de Ac_2O favorece la triacetilación evitando la producción de diacetatos y monoacetatos de glicerilo. Relaciones menores disminuyen la selectividad, mientras que excesos altos comprometen los principios de la química verde y aumentan la generación de subproductos. Al término de la reacción, se realizó destilación al vacío a 90 °C en un rotavapor

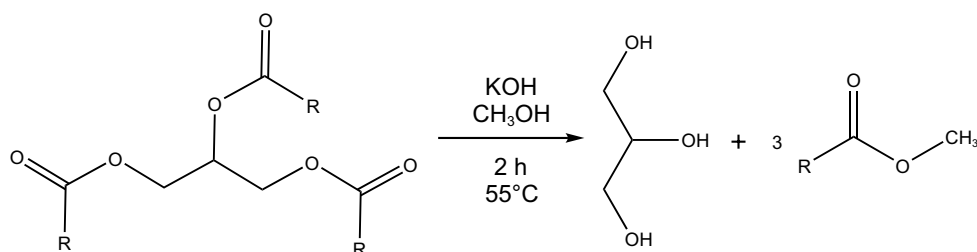


Fig. 1. Reacción de transesterificación de aceite vegetal para la obtención de biodiésel.

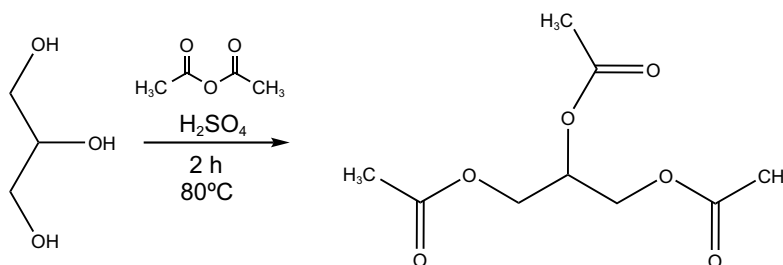


Fig. 2. Reacción de esterificación de glicerina para la obtención de triacetato de glicerilo.

Büchi R-215 durante 30 min para recuperar ácido acético libre y eliminar trazas de Ac_2O no reaccionado. La fase resultante, compuesta por triacetato y cantidades menores de diacetato, se lavó con agua destilada y posteriormente se calentó a 70 °C para eliminar humedad residual.

Prueba de solubilidad

Como evaluación preliminar, se mezclaron 10 mL de biodiésel con 1 mL de triacetato de glicerilo en viales de 20 mL. Se registró cualitativamente la miscibilidad completa o parcial entre fases.

Caracterización por resonancia magnética nuclear de protón

La conversión de triglicéridos a ésteres metílicos se determinó mediante espectros de resonancia magnética nuclear de protón (^1H -RMN) obtenidos en un espectrómetro Bruker de 400 MHz, empleando CDCl_3 como solvente. La conversión de la reacción se calculó mediante integración de señales características de metoxi (~3.67 ppm) siguiendo la ecuación 1. Las muestras de glicerina y triacetato se analizaron en las mismas condiciones, empleando triacetato comercial (99 %) como estándar.

$$\%C = \frac{2A_{Me}}{3A_{CH_2}} (100 \%) \quad (1)$$

Espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)

Los espectros FTIR de glicerina, triacetato de glicerilo estándar y triacetato sintetizado se obtuvieron en un espectrómetro Agilent Cary 600 con accesorio ATR, registrando 40 escaneos por muestra, resolución de 1 cm^{-1} y rango de $400\text{--}4000 \text{ cm}^{-1}$.

Calorimetría

El poder calorífico inferior (PCI) se determinó mediante una bomba calorimétrica PARR 1341. Se

analizaron biodiésel puro, diésel comercial y mezclas de biodiésel-triacetato en proporciones 98:2, 96:4, 94:6, 92:8 y 90:10 (% v/v). Cada ensayo se realizó por triplicado ($n = 3$) en condiciones controladas. El PCI se corrigió según la masa exacta de combustión registrada.

Gestión de residuos

El proceso se diseñó considerando la minimización y el manejo adecuado de los residuos generados. El ácido sulfúrico empleado como catalizador en la acetilación se neutralizó al finalizar la reacción mediante una solución acuosa de carbonato de sodio hasta alcanzar un pH 7. El residuo resultante se gestionó conforme a la normativa mexicana aplicable para residuos inorgánicos de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005 (SEMARNAT 2006). El anhídrido acético no reaccionado y el ácido acético obtenido como subproducto se recuperaron mediante destilación al vacío y se reutilizaron en ensayos posteriores, reduciendo así el consumo de reactivos frescos. El agua de lavado proveniente de la purificación del triacetato y del biodiésel fue recolectada, neutralizada y eliminada de acuerdo con los lineamientos de seguridad química del laboratorio. No se utilizaron solventes orgánicos adicionales en la síntesis, lo que disminuye la huella ambiental del proceso y se alinea con los principios de la química verde y la química circular.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Síntesis de biodiésel

Los rendimientos obtenidos con catalizadores básicos y ácidos se comparan en el **cuadro I**. La reacción catalizada con KOH mostró una conversión de $99 \pm 1 \%$ (IC 95 %, $n = 3$), lo cual concuerda con trabajos previos que reportan altas eficiencias en condiciones similares.

CUADRO I. CONDICIONES DE REACCIÓN PARA LA SÍNTESIS DE BIODIÉSEL.

Reactivo	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Conversión (%) ± DE
KOH / CH ₃ OH	55-60	120	99 ± 1
ADBS / CH ₃ OH	65-70	180	-

Nota: la conversión se determinó mediante integración de señales en resonancia magnética nuclear de protón (¹H-RMN). Los valores representan el promedio ± la desviación estándar (DE) con n = 3.

En cambio, la ruta catalizada con ácido dodecil-bencenosulfónico (ADBS) no produjo conversión detectable bajo las condiciones evaluadas. La cinética más favorable de los catalizadores básicos facilita la ruptura de los enlaces éster, incluso en matrices residuales con ácidos grasos libres. Desde la perspectiva de sostenibilidad, el uso de aceite residual reduce la demanda de aceites vírgenes y evita su disposición inadecuada. Aunque el uso de KOH genera glicerina alcalina, su posterior valorización dentro del mismo proceso permite integrar este subproducto en un esquema coherente de química circular.

Síntesis de triacetato de glicerilo

Los ensayos de optimización se presentan en el **cuadro II**. La reacción con cloruro de acetilo produjo materiales insolubles tanto en agua como en biodiésel, indicando formación de subproductos. La sustitución por anhídrido acético mejoró la selectividad, pero el uso de solventes orgánicos no favoreció la formación de triacetato. La reacción realizada sin solvente, a 80 °C y catalizada por 1 % de H₂SO₄, produjo un material insoluble en agua y completamente soluble en biodiésel, consistente con triacetato de glicerilo. El rendimiento obtenido fue de 75 ± 3 % (IC 95 %, n = 3). La selectividad hacia el triacetato se atribuye a que la ausencia de solvente promueve el contacto directo entre reactivos

y disminuye la competencia por acetilación parcial. Estos resultados se encuentran dentro del rango reportado para sistemas homogéneos simples y sin catalizadores heterogéneos (Konwar et al. 2015). La reducción del uso de solventes y el bajo contenido de catalizador se alinean con los principios de química verde y contribuyen a un proceso de valorización de glicerina ambientalmente responsable.

Prueba de solubilidad

La miscibilidad completa del biodiésel con el triacetato sintetizado confirma la compatibilidad estructural entre ambas moléculas. Al carecer de grupos hidroxilo, el triacetato presenta hidrofobicidad superior y afinidad por el medio lipídico, mientras que la ausencia de solubilidad en agua descarta la presencia significativa de glicerina, monoacetato o diacetato de glicerilo. Los resultados de solubilidad en agua y en biodiésel se muestran en el **cuadro II**. Desde un punto de vista estructural, al poseer los tres grupos hidroxilo acetilados, el triacetato de glicerilo presenta una mayor hidrofobicidad que el diacetato y el monoacetato de glicerilo. En consecuencia, se espera que sea insoluble en agua, lo que permite diferenciarlo de sus derivados parcialmente acetilados, que aún contienen grupos hidroxilo (-OH) con afinidad por el medio acuoso. Estos resultados confirman que el triacetato de glicerilo sintetizado fue insoluble en agua y mostró una solubilidad completa en biodiésel. Este comportamiento valida su correcta síntesis y, además, asegura su idoneidad como aditivo, ya que puede incorporarse al biodiésel para mejorar sus propiedades sin presentar problemas de miscibilidad.

Caracterización por resonancia magnética nuclear

El biodiésel fue identificado mediante ¹H-RMN en presencia de CDCl₃ como solvente. En la **figura 3** se muestra el espectro de resonancia; se observan las señales características del biodiésel: un singlete alrededor de 3.67 ppm, correspondiente a los

CUADRO II. CONDICIONES DE REACCIÓN PARA LA SÍNTESIS DE TRIACETATO DE GLICERILO.

Reactivo	Solvente	Catalizador	T (°C)	Tiempo (min)	Solubilidad en agua	Solubilidad en biodiésel
Cloruro de acetilo	Tolueno/ciclohexano	—	20	60	No	No
Cloruro de acetilo	Tolueno/ciclohexano	—	Reflujo	60	No	No
Anhídrido acético	Tolueno/ciclohexano	—	20	60	Sí	No
Anhídrido acético	Tolueno	5 % ácido acético	20	120	No	No
Anhídrido acético	Tolueno	5 % ácido acético	70	120	No	No
Anhídrido acético	—	—	80	120	No	No
Anhídrido acético	—	1 % H ₂ SO ₄	80	120	No	Sí

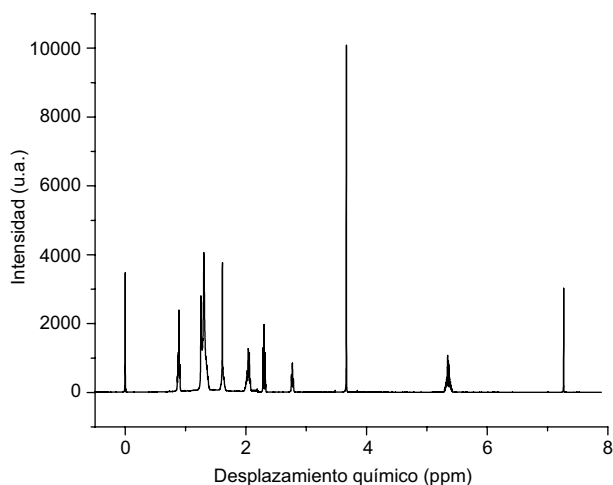


Fig. 3. Espectro de resonancia magnética nuclear de protón (^1H -NMR) del biodiésel.

protones del grupo metoxi, y un triplete ~ 2.17 ppm, correspondiente a los protones alfa del carbonilo. Los desplazamientos de protón en el espectro son los siguientes: ^1H NMR (400 MHz, cloroformo- d) δ 0.89 (td, $J = 7.0, 4.2$ Hz, 2H); 1.23-1.41 (m, 8H); 1.62 (d, $J = 13.2$ Hz, 1H); 2.04 (p, $J = 8.4, 7.6$ Hz, 3H); 2.30 (t, $J = 7.5$ Hz, 1H); 2.73-2.81 (m, 1H); 3.67 (s, 2H); 5.27-5.37 (m, 1H); 5.33-5.43 (m, 1H). La integración de estas señales, según la ecuación 1, permitió calcular la conversión de triglicéridos a biodiésel, obteniéndose un valor del 99 ± 1 %.

Este alto rendimiento es consistente con lo reportado por Riesco-Ávila et al. (2017), quienes alcanzaron un 99 % de conversión utilizando 1.0 % de KOH como catalizador y una relación molar metanol:aceite de 6:1. En el presente trabajo se empleó un exceso de metanol con respecto al aceite (9:1), siguiendo la recomendación de ese mismo estudio, ya que un exceso de metanol desplaza el equilibrio de la reacción hacia la formación de los productos según el principio de Le Chatelier. Esto aseguró la conversión completa de los triglicéridos, evitando residuos de aceite vegetal. El producto de interés, triacetato de glicerilo, se analizó mediante ^1H -NMR en CDCl_3 , obteniéndose el espectro de resonancia mostrado en la **figura 4**. Los desplazamientos de protón en el espectro son los siguientes: ^1H NMR (400 MHz, cloroformo- d) δ 2.06-2.20 (m, 9H); 4.09-4.40 (m, 4H); 5.16-5.30 (m, 1H), lo que confirma la presencia de la molécula triacetilada.

Análisis por espectroscopia de infrarrojo

Se analizaron muestras de glicerina, triacetato de glicerilo al 99 % y triacetato de glicerilo sinteti-

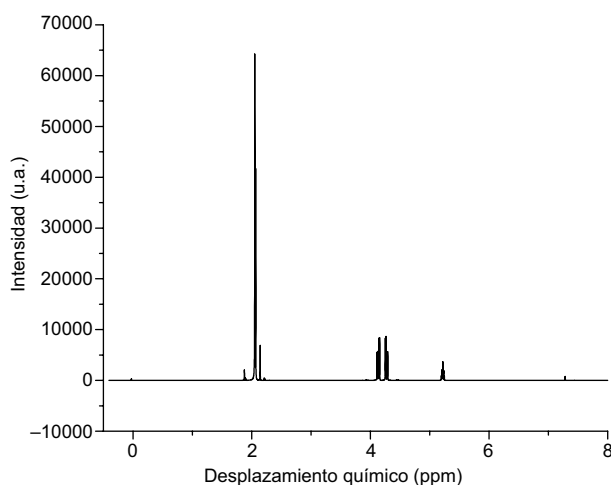


Fig. 4. Espectro de resonancia magnética nuclear de protón (^1H -NMR) del triacetato de glicerilo.

zando mediante espectroscopia de infrarrojo (FTIR) utilizando el equipo Agilent Technologies Cary 600 series. En la **figura 5** se observa el espectro de FTIR de la glicerina, del triacetato de glicerilo estándar y del triacetato de glicerilo sintetizado en este trabajo. En esta figura se muestra una banda ancha alrededor de 3250 cm^{-1} , correspondiente a los grupos OH presentes en la molécula. También se presenta el espectro del triacetato de glicerilo al 99 %, utilizado como estándar para confirmar la identidad del producto y descartar la presencia de monoacetato o diacetato de glicerilo. El espectro del triacetato de glicerilo sintetizado se superpone al del triacetato de glicerilo estándar; se evidencia la ausencia de la banda ancha en $\sim 3250\text{ cm}^{-1}$, lo que indica la eliminación de los grupos OH de la glicerina. Asimismo, ambos espectros presentan una banda delgada en $\sim 1735\text{ cm}^{-1}$, correspondiente a la tensión del enlace $\text{C}=\text{O}$, y dos bandas adicionales en ~ 1200 y 1050 cm^{-1} , asignadas a la tensión del enlace $\text{C}-\text{O}$. Estos resultados confirman la formación correcta del triacetato de glicerilo sintetizado.

Calorimetría

En la **figura 6** se presentan los perfiles calorimétricos que ilustran las condiciones de inicio e ignición en cada prueba. En la **figura 7** y el **cuadro III** se indica el poder calorífico inferior (PCI) del biodiésel puro, el diésel comercial y las mezclas biodiésel-triacetato. Todos los valores se muestran con su respectiva desviación estándar e intervalos de confianza (IC 95 %).

En términos energéticos, el biodiésel puro presentó un poder calorífico inferior (PCI) equivalente al 52 % del registrado para el diésel comercial, lo

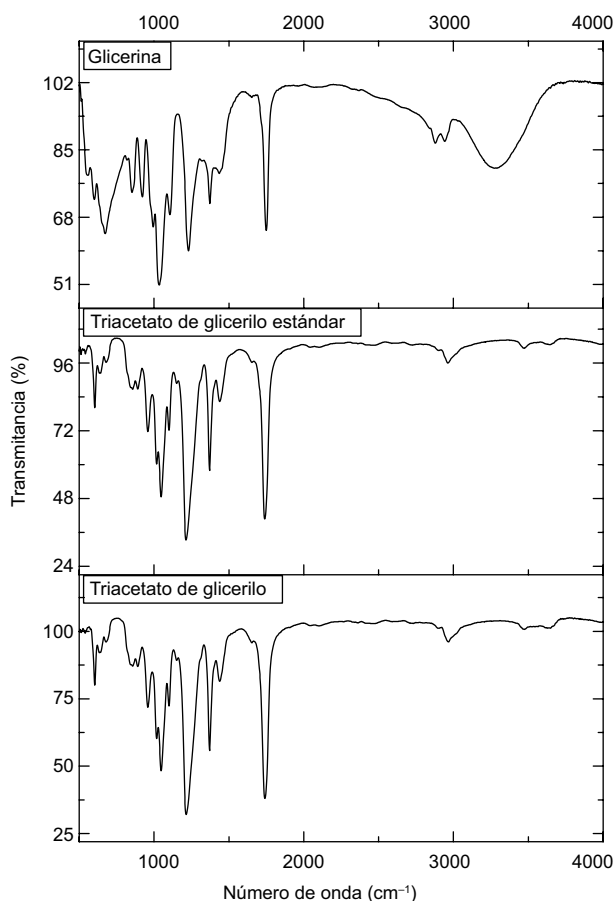


Fig. 5. Espectro infrarrojo con transformada de Fourier: glicerina (superior), triacetato de glicerilo estándar (medio) y triacetato de glicerilo (inferior).

que confirma la necesidad de incorporar aditivos que compensen su menor densidad energética. La adición de triacetato de glicerilo produjo un incremento progresivo del PCI, alcanzándose en la mezcla 94:6 % un aumento del 48 % respecto al biodiésel puro. Este valor resultó estadísticamente indistinguible del diésel comercial ($p > 0.05$), lo que indica que, dentro de esta proporción, el triacetato logra equiparar el rendimiento energético del combustible fósil.

No obstante, mezclas con proporciones superiores al 6 % mostraron una disminución del PCI, tendencia que podría atribuirse a alteraciones en la relación estequiométrica de combustión y posibles cambios en la eficiencia de ignición asociados a un exceso del aditivo. Desde una perspectiva mecanística, el comportamiento observado se explica por la mayor densidad energética del triacetato, cuya estructura completamente esterificada contrasta con la de la glicerina cruda o parcialmente acetilada, que conserva grupos hidroxilo de menor contenido

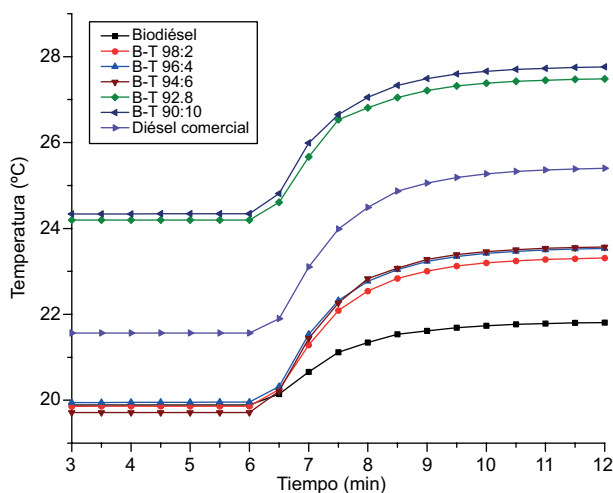


Fig. 6. Isotermas de calorimetría de biodiésel, diésel comercial y mezclas de biodiésel con triacetato de glicerilo. B-T X:Y indica la proporción en volumen de biodiésel (B) y triacetato de glicerilo (T) en cada formulación.

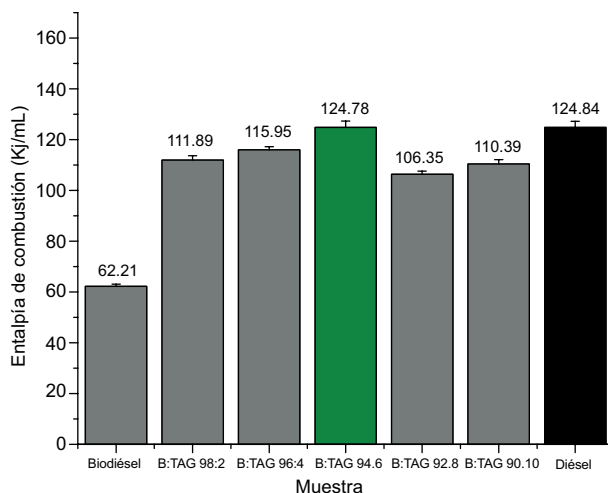


Fig. 7. Poder calorífico inferior (PCI) del biodiésel puro, diésel comercial y mezclas biodiésel-triacetato (B:TAG). Los valores sobre las barras corresponden al promedio de las mediciones por muestra y las barras de error representan la desviación estándar.

energético. El punto óptimo en 6 % de triacetato de glicerilo parece reflejar un equilibrio adecuado entre mejora energética, mantenimiento de la eficiencia de combustión y preservación de propiedades físicas y químicas como viscosidad y volatilidad. Por encima de este umbral, el exceso de triacetato podría alterar la relación aire/combustible y disminuir la eficiencia global del proceso de combustión.

En conjunto, estos resultados evidencian que es posible transformar aceite residual en biodiésel con

CUADRO III. PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI) DEL BIODIÉSEL Y LAS MEZCLAS BIODIÉSEL-TRIACETATO (B:TAG) CON DESVIACIÓN ESTÁNDAR (DE) E INTERVALO DE CONFIANZA (IC) AL 95 %.

Muestra	PCI (kJ/mL)	DE	IC 95 % ($\pm 1.96 \times DE$)
Biodiésel	62.2139	0.0809	± 0.1585
B:TAG 98:2	111.8994	0.1790	± 0.3508
B:TAG 96:4	115.9562	0.1276	± 0.2512
B:TAG 94:6	124.7837	0.2496	± 0.4892
B:TAG 92:8	106.3540	0.1378	± 0.2654
B:TAG 90:10	110.3953	0.1766	± 0.3462
Diésel comercial	124.8477	0.2372	± 0.4649

alta conversión, valorizar la glicerina sin necesidad de purificación previa y mejorar de manera significativa el desempeño energético mediante la adición controlada de triacetato. Este proceso integrado refleja claramente los principios de la química circular, al reincorporar un coproducto de bajo valor en un material funcional que mejora el rendimiento del propio biocombustible. Además, la compatibilidad estructural, la miscibilidad y el efecto energético observado posicionan al triacetato como un aditivo viable frente a otros derivados de glicerina cuya compatibilidad con biodiésel suele ser más limitada.

IMPLICACIONES

La conversión de glicerina cruda en triacetato de glicerilo (TAG) y su adición a biodiésel como aditivo mejorador de combustión constituyen una estrategia que aumenta el rendimiento en volumen de la producción de biodiésel, evita la eliminación de la glicerina alcalina y aumenta la capacidad calorífica. La incorporación de TAG incrementó el poder calorífico del biodiésel hasta valores comparables con los del diésel comercial, lo que demuestra que un coproducto de bajo valor puede reintegrarse de manera funcional al propio biocombustible. Este enfoque resulta especialmente relevante ante la creciente acumulación de glicerina residual en la industria del biodiésel, identificada como un obstáculo ambiental y económico para su sostenibilidad.

En términos ambientales, el uso de aceite residual como materia prima evita impactos asociados a la producción de aceites vírgenes y reduce la carga de residuos urbanos. Aunque este estudio no evaluó directamente las emisiones, la literatura sugiere que la presencia de TAG puede favorecer una combustión

más eficiente y disminuir la concentración de contaminantes como CO_x , partículas y NO_x . De esta forma, el proceso propuesto contribuye potencialmente a los objetivos de sostenibilidad energética y de reducción de emisiones. El sistema desarrollado se alinea con los principios de la economía circular, de acuerdo con la ISO 59004 (ISO 2024), al reintegrar un residuo en un producto de mayor valor y minimizar la generación de desechos. También contribuye al ODS 7 (energía asequible y no contaminante) y al ODS 12 (producción y consumo responsables) mediante la valorización de subproductos y el aprovechamiento de recursos locales.

En cuanto a su escalabilidad, la síntesis de TAG sin solventes, con bajo contenido de catalizador y condiciones moderadas, favorece su implementación industrial. No obstante, será necesario evaluar formalmente su compatibilidad con las normas ASTM D6751 (ASTM 2023) y EN 14214 (CEN 2020), particularmente en parámetros como viscosidad, estabilidad oxidativa y comportamiento en motores. Este estudio tiene limitaciones relacionadas con la ausencia de una caracterización física y química completa, pruebas de combustión en motor y análisis de ciclo de vida. Futuros trabajos deberán abordar estos aspectos para consolidar la viabilidad técnica y ambiental de la mezcla biodiésel-TAG. Estos resultados indican que la valorización de glicerina cruda como TAG ofrece una ruta prometedora para mejorar tanto la eficiencia energética como la sustentabilidad del biodiésel derivado de residuos urbanos.

CONCLUSIONES

En este estudio se demostró que es posible integrar la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal residual con la valorización directa de la glicerina generada como coproducto mediante su conversión en triacetato de glicerilo (TAG). La transesterificación alcalina permitió obtener biodiésel con una conversión de 99 ± 1 %, confirmada por ^1H -RMN, lo que evidencia que el uso de aceite residual puede producir un biocombustible de alta pureza en condiciones simples y reproducibles. La acetilación de la glicerina cruda permitió obtener TAG con un rendimiento de 75 ± 3 % sin necesidad de purificación previa de la glicerina, lo que refuerza la viabilidad de su valorización en el mismo proceso productivo. El TAG sintetizado mostró miscibilidad completa con el biodiésel y coincidencia espectroscópica con el estándar comercial, lo que confirma su identidad y su potencial como aditivo energético. Las mezclas

biodiésel-TAG mostraron un incremento del poder calorífico inferior, alcanzando un valor estadísticamente comparable al del diésel comercial en la formulación 94:6 %. Este comportamiento indica que la adición controlada de TAG puede mejorar el desempeño energético del biodiésel sin comprometer la miscibilidad ni la estabilidad de la mezcla.

El enfoque integrado empleado en este trabajo, que abarca el aprovechamiento de aceite residual, la producción de biodiésel y la valorización de glicerina, se encuentra alineado con los principios de la química circular, al reincorporar un coproducto de bajo valor en un material funcional que mejora el rendimiento del propio biocombustible. Sin embargo, el estudio presenta limitaciones que deben considerarse para su consolidación. No se evaluaron propiedades adicionales relevantes para la certificación del combustible, como viscosidad, densidad, estabilidad oxidativa o punto de inflamación, ni se realizó un análisis de emisiones o de ciclo de vida. La confirmación de la compatibilidad del TAG con los estándares ASTM D6751 (ASTM 2023) y EN 14214 (CEN 2020) requiere la evaluación completa de estos parámetros. Futuros trabajos deberán centrarse en caracterizar el conjunto completo de propiedades físicas y químicas, estudiar el comportamiento del TAG en motores de combustión interna y explorar estrategias catalíticas más selectivas para la acetilación de glicerina, con el fin de mejorar la eficiencia y reducir aún más el impacto ambiental del proceso. En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que la valorización de la glicerina cruda mediante su conversión a TAG constituye una vía técnica y ambientalmente prometedora para fortalecer la sostenibilidad del biodiésel y avanzar hacia sistemas energéticos más circulares y eficientes.

REFERENCIAS

- Al-Zuhair S. (2007). Production of biodiesel: Possibilities and challenges. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 1 (1), 57-66. <https://doi.org/10.1002/bbb.2>
- Amin M., Hassan M., Rahman M.M. y Nabi M.N. (2023). Glycerol utilization pathways in biodiesel industries: Current trends and future prospects. *Fuel* 342, 127777. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127777>
- Aransiola E.F., Ojumu T.V., Oyekola O.O., Madzimbamuto T.F. y Ikhu-Omoregbe D.I.O. (2014). A review of current technology for biodiesel production: State of the art. *Biomass and Bioenergy* 61, 276-297. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.11.014>
- Arshad M., Bano I., Khan N., Shahzad M.I., Younus M., Abbas M. e Iqbal M. (2018). Electricity generation from biogas of poultry waste: An assessment of potential and feasibility in Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81, 1241-1246. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.007>
- ASTM (2023). ASTM D6751-23. Standard specification for biodiesel fuel blend stock (B100) for middle distillate fuels. American Society for Testing and Materials-International, West Conshohocken, Pensilvania, EUA, 10 pp.
- Casas A., Ruiz J.R., Ramos M.J. y Pérez Á. (2010). Effects of triacetin on biodiesel quality. *Energy and Fuels* 24 (8), 4481-4489. <https://doi.org/10.1021/ef100406b>
- CEN (2020). EN 14214:2020. Liquid petroleum products—Fatty acid methyl esters (FAME) for use in diesel engines and heating applications—Requirements and test methods. European Committee for Standardization, Bruselas, Bélgica, 30 pp.
- Christopher L.P., Kumar H. y Zambare V.P. (2014). Enzymatic biodiesel: Challenges and opportunities. *Applied Energy* 119, 497-520. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.017>
- Dasgupta D., Mondal S. y Sen R. (2022). Valorization of crude glycerol generated from biodiesel industry: A critical review. *Bioresource Technology* 363, 127881. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127881>
- Demirbas A. (2008). Vegetable oils and animal fats. En: *Biodiesel: A realistic fuel alternative for diesel engines*. Springer, Londres, Reino Unido, 65-110. https://doi.org/10.1007/978-1-84628-995-8_3
- Echeverría-Vizcaya J.A., Martínez-González J.H., Martínez-Álvarez O., Medina-Flores J.M., Rodríguez-Santoyo H.H. y Ruiz-Camacho B. (2013). Obtención de biodiésel a partir de aceites vegetales usados y catalizadores básicos. *Memorias. XXXIV Encuentro Nacional y III Congreso Internacional de la AMIDIQ*. Mazatlán, Sinaloa, México, 7 al 10 de mayo, 449-454.
- Figueroa Salgado S.J., Villamar Linares C.G. y Martín Valera M.J. (2008). Estudio de la combustión en un motor de gasolina. *Ciencia e Ingeniería* 29 (1), 55-63.
- Hoekman S.K. y Robbins C. (2012). Review of the effects of biodiesel on NO_x emissions. *Fuel Processing Technology* 96, 237-249. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.12.036>
- Huang M.Y., Han X.X., Hung C.T., Lin J.C., Wu P.H., Wu J.C. y Liu S.B. (2014). Heteropolyacid-based ionic liquids as efficient homogeneous catalysts for acetylation of glycerol. *Journal of Catalysis* 320, 42-51. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2014.09.022>
- ISO (2024). ISO 59004:2024. Circular economy—Vocabulary, principles and guidance for implementation. International Organization for Standardization, Ginebra, Suiza, 51 pp.

- Knothe G. (2006). Analyzing biodiesel: Standards and other methods. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 83 (10), 823-833. <https://doi.org/10.1007/s11746-006-5033-y>
- Konwar L.J., Mäki-Arvela P., Begum P., Kumar N., Thakur A.J., Mikkola J.P., Deka R.C. y Deka D. (2015). Shape selectivity and acidity effects in glycerol acetylation with acetic anhydride: Selective synthesis of triacetin over Y-zeolite and sulfonated mesoporous carbons. *Journal of Catalysis* 329, 237-247. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2015.05.021>
- Monteiro M.R., Kugelmeier C.L., Pinheiro R.S., Batalha M.O. y Da Silva César A. (2018). Glycerol from biodiesel production: Technological paths for sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 88, 109-122. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.019>
- Nisar N., Mehmood S., Nisar H., Jamil S., Ahmad Z., Ghani N., Oladipo A.A., Qadri R.W., Latif A.A., Ahmad S.R., Iqbal M. y Abbas M. (2018). Brassicaceae family oil methyl esters blended with ultra-low sulphur diesel fuel (ULSD): Comparison of fuel properties with fuel standards. *Renewable Energy* 117, 393-403. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.087>
- Raghuvanshi S. y Gupta R. (2010). Advantages of the immobilization of lipase on porous supports over free enzyme. *Protein and Peptide Letters* 17 (11), 1412-1416. <https://doi.org/10.2174/0929866511009011412>
- Riesco-Ávila J.M., Flores-Patiño E.E., Elizalde-Blancas F., Martínez-Martínez S. y Malagón-Romero D.H. (2017). Evaluación del proceso de obtención de biodiésel a partir de aceites vegetales usados. *Memorias. XXIII Congreso Internacional Anual de la SOMIM*. Cuernavaca, Morelos, México, 20 al 22 de septiembre, 144-151.
- SEMARNAT (2006). Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005. Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación, México. 23 de junio.
- Silva L.N., Gonçalves V.L.C. y Mota C.J.A. (2010). Catalytic acetylation of glycerol with acetic anhydride. *Catalysis Communications* 11 (12), 1036-1039. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2010.05.007>
- Usai E.M., Gualdi E., Solinas V. y Battistel E. (2010). Simultaneous enzymatic synthesis of FAME and triacetyl glycerol from triglycerides and methyl acetate. *Bioresource Technology* 101 (20), 7707-7712. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.05.044>