

RESEARCH ARTICLE

# Biodiésel a partir de Aceite de Cocina Usado mediante Catalizadores de Carbón de Cáscara de Cacao e Hidróxido de Sodio.

Rosario Cecibel Cedillo Saraguro <sup>1</sup>  Jenniffer Tatiana Gualacio Benavidez <sup>1</sup>  Jaime Arturo García Ochoa <sup>2</sup>   
Hugo Italo Romero Bonilla <sup>3</sup>  Jaime Enrique Maza - Maza <sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Carrera de Ingeniería Ambiental, Universidad Técnica de Machala (UTMACH), Machala, 070205, Ecuador.

<sup>2</sup> Grupo de Investigación para la Conservación, Carrera de Ingeniería Ambiental, Universidad Técnica de Machala (UTMACH), Machala, 070205, Ecuador.

<sup>3</sup> Grupo de Investigación en Aplicaciones Electroanalíticas, Carrera de Ciencias Químicas y de la Salud, Universidad Técnica de Machala (UTMACH), Machala, 070205, Ecuador.

✉ Correspondencia: [rcedillo2@utmachala.edu.ec](mailto:rcedillo2@utmachala.edu.ec)  + 593 992044836

DOI/URL: <https://doi.org/10.53313/gwj81204>

**Resumen:** El biodiésel a partir de aceite de cocina usado mediante catalizadores de carbón de cáscaras de cacao e hidróxido de sodio ofrece una alternativa sostenible y eficiente a los combustibles fósiles mediante la reutilización de residuos orgánicos. El proceso experimental incluyó la producción y activación del carbón con ácido clorhídrico y su posterior uso como un catalizador en la transesterificación del aceite. Se empleó una muestra testigo sin carbón y nueve tratamientos experimentales combinando temperaturas de 20 °C, 30 °C y 40 °C, con concentraciones de carbón de 2 g, 6 g y 10 g. La muestra testigo fue procesada únicamente con hidróxido de sodio como catalizador, lo que permitió analizar el efecto del carbón activado. El rendimiento promedio de biodiésel fue de 81.00%, alcanzando un máximo de 84.62% en el tratamiento testigo. La densidad del biodiésel se mantuvo dentro de los estándares normativos, en el tratamiento M6 (899.00 kg/m<sup>3</sup>) y para M9 (861.67 kg/m<sup>3</sup>), mientras que la viscosidad más alta fue en M3 (1.75 mm<sup>2</sup>/s). Este enfoque contribuye a la valorización de residuos orgánicos y a la producción de combustibles con menor impacto ambiental.

**Palabras claves:** Biodiésel; aceite de cocina usado; catalizador; carbón activado; transesterificación.

Biodiésel from Used Cooking Oil using Cocoa Husk Charcoal and Sodium Hydroxide Catalysts



Check for updates

**Cita:** Rosario Cecibel, C. S., Jenniffer Tatiana, G. B., Jaime Arturo, G. O., Hugo Italo, R. B., & Jaime Enrique, M.-M. (2025). Biodiésel a partir de Aceite de Cocina Usado mediante Catalizadores de Carbón de Cáscara de Cacao e Hidróxido de Sodio. Green World Journal, 08(01), 204. <https://doi.org/10.53313/gwj81204>

**Received:** 01/April/2025

**Accepted:** 17/April/2025

**Published:** 18/April/2025

Prof. Carlos Mestanza-Ramón, PhD.  
Editor-in-Chief / CaMeRa Editorial  
[editor@greenworldjournal.com](mailto:editor@greenworldjournal.com)

**Editor's note:** CaMeRa remains neutral with respect to legal claims resulting from published content. The responsibility for published information rests entirely with the authors.



© 2025 CaMeRa license, Green World Journal. This article is an open access document distributed under the terms and conditions of the license.

Creative Commons Attribution (CC BY)

**Abstract:** Biodiésel from used cooking oil using cocoa husk charcoal and sodium hydroxide catalysts offers a sustainable and efficient alternative to fossil fuels by reusing organic waste. The experimental process involved the production and activation of charcoal with hydrochloric acid and its subsequent use as a catalyst in the transesterification of the oil. A control sample without charcoal and nine experimental treatments combining temperatures of 20 °C, 30 °C and 40 °C, with char concentrations of 2 g, 6 g and 10 g were used. The control sample was processed only with sodium hydroxide as catalyst, which allowed analyzing the effect of activated carbon. The average biodiésel yield was 81.00%, reaching a maximum of 84.62% in the control treatment. The density of the biodiésel remained within regulatory standards in the M6 treatment (899.00 kg/m<sup>3</sup>) and for M9 (861.67 kg/m<sup>3</sup>), while the highest viscosity was in M3 (1.75 mm<sup>2</sup>/s). This approach contributes to the valorization of organic waste and the production of fuels with less environmental impact.

**Keywords:** Biodiésel; used cooking oil; catalyst; activated carbon; transesterification.

## 1. Introducción

La dependencia de los combustibles fósiles ha impulsado el crecimiento económico y la industrialización en muchos países en desarrollo [1]. Se han generado desafíos críticos como el agotamiento acelerado de las reservas de petróleo, la emisión de gases de efecto invernadero y la degradación ambiental, agravando la crisis climática y los conflictos socioeconómicos asociados a su explotación [2]. La adopción de alternativas sostenibles, como la producción de biodiésel a partir de aceites de frituras usado y materiales vegetales catalizados, se presenta como una solución viable y estratégica [3]. Este proceso no solo aprovecha residuos orgánicos, reduciendo la contaminación, sino que también genera un combustible renovable y menos contaminante que el diésel fósil [4]. El uso de catalizadores naturales, como cáscaras de cacao o bagazo de caña, optimiza la producción y se alinea con los principios de la economía circular, promoviendo la reutilización y valorización de residuos [5]. La transición hacia estas tecnologías representa una oportunidad clave para reducir el impacto ambiental, avanzar hacia un modelo energético limpio y garantizar un desarrollo más equilibrado y sostenible.

A nivel mundial, la disposición inadecuada del aceite vegetal residual representa un problema ambiental significativo. Su vertido en cuerpos de agua y suelos provoca una grave contaminación que afecta tanto a los ecosistemas acuáticos como terrestres [6]. Este residuo, generado por la alta demanda de productos fritos, carece de una gestión adecuada en numerosos países, especialmente en aquellos con economías en desarrollo, donde las políticas de recolección y reciclaje son insuficientes [7]. Un solo litro de aceite usado puede contaminar hasta 1.000 litros de agua, evidenciando su alto potencial contaminante y las graves consecuencias para los recursos hídricos [8]. Su impacto radica en la formación de una capa superficial que dificulta el intercambio gaseoso, afectando la oxigenación necesaria para la vida de los organismos acuáticos [9]. En Ecuador, esta problemática es especialmente preocupante debido a la ausencia de prácticas eficientes de gestión. Según estadísticas, el 69.18 % de la población desecha el aceite con la basura, el 16.34% lo

vierte directamente en desagües o cuerpos de agua, y apenas el 1.61% lo entrega a centros de acopio [10]. Esta situación es particularmente crítica en las grandes ciudades y en aquellas en desarrollo, donde la falta de programas estructurados para la gestión de aceites usados contribuye a la contaminación de los sistemas de drenaje y alcantarillado, así como a la degradación de los suelos [11].

Las fuentes de energía renovable no solo ofrecen una alternativa más limpia, sino que son esenciales para cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) [12]. Entre estas opciones, los biocombustibles, como el biodiésel, destacan por su capacidad para proporcionar soluciones energéticas sostenibles frente a los combustibles fósiles [13]. En este contexto, el aceite de cocina usado ha cobrado interés debido a sus propiedades físicas, químicas y biológicas, que lo posicionan como una materia prima ideal para la producción de biocombustibles [14]. Este residuo constituye una fuente renovable de energía que, además de disminuir la contaminación, reduce la dependencia de fuentes fósiles [15]. Su reutilización, gracias a su disponibilidad, biodegradabilidad y capacidad de renovación, tiene un enorme potencial para mitigar impactos ambientales, transformar residuos en recursos útiles y promover la economía circular [16].

Por la gran de importancia y utilidad que tienen los combustibles en la sociedad y a nivel mundial, y conociendo los graves problemas que generan en el ambiente, hoy en día surge la necesidad de crear alternativas sostenibles que sustituyan a los combustibles convencionales. Bajo este contexto, la presente investigación tiene como objetivo producir biodiésel a partir de aceite de cocina usado, transformando estos residuos en una fuente de energía sostenible mediante el proceso de transesterificación. Para ello, se utilizaron catalizadores de tipo homogéneo (hidróxido de sodio) y heterogéneo (carbón activado de cáscara de cacao), con el propósito de evaluar su efecto en la eficiencia de la reacción química y en las propiedades del biodiésel. Este enfoque busca no solo obtener un biocombustible de alta calidad, sino también abordar problemáticas ambientales y energéticas al aprovechar residuos y valorizar subproductos agrícolas, promoviendo el desarrollo de energías alternativas y contribuyendo a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 Área de estudio

El proceso experimental se realizó en el Laboratorio de Investigaciones de la Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud (FCQS) de la Universidad Técnica de Machala, situada en el kilómetro 5 1/2 vía a Pasaje-Machala (ver Figura 1). La región se caracteriza por un clima cálido, con temperaturas que oscilan entre los 26 °C y los 31 °C, y una precipitación

promedio anual de 257.7 mm.

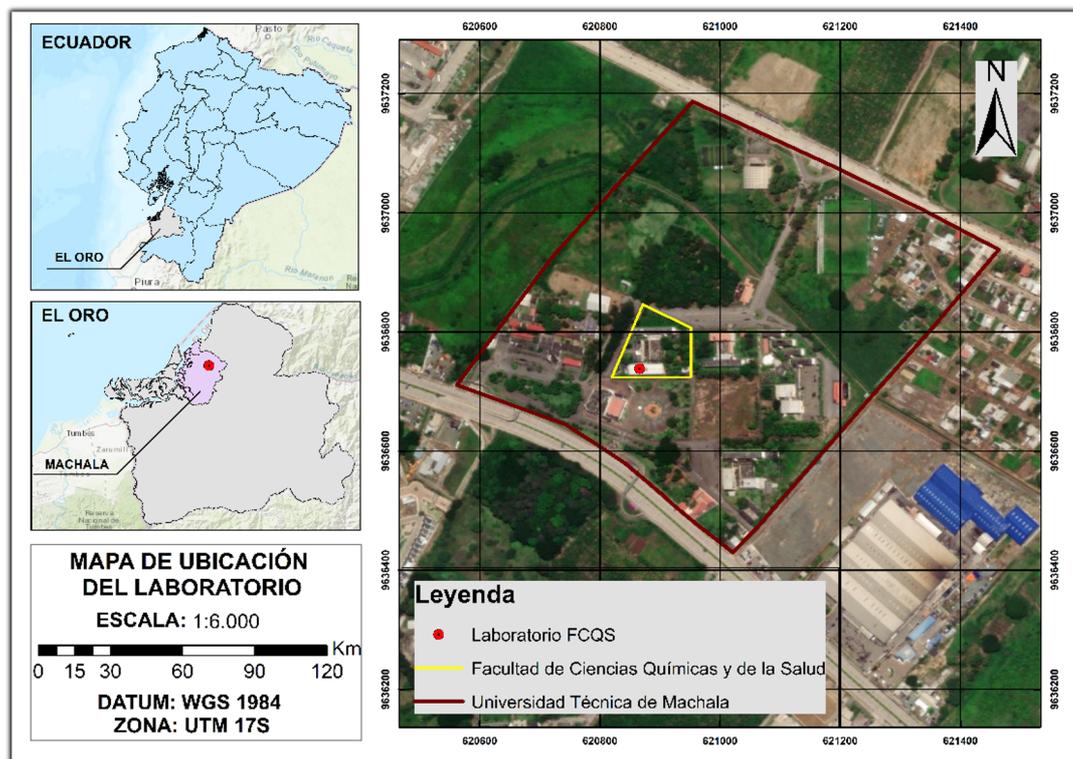


Figura 1. Mapa de ubicación del laboratorio de FCQS

## 2.2 Materiales

Entre los equipos y materiales empleados se incluyen: plancha de calentamiento con agitación magnética, cocineta eléctrica, mufla, reactor de vidrio de doble camisa, balanza analítica, esterilizador, tamizador, mortero, cápsula de porcelana, embudo de separación, soporte de retorta, vasos de precipitación, pipeta, probeta, varilla de agitación, balón volumétrico, frascos para muestra, bandeja de aluminio y papel aluminio.

### 2.2.1 Reactivos

Alcohol etílico, ácido clorhídrico (HCl), metanol, hidróxido de sodio (NaOH) y agua destilada.

## 2.3 Metodología

La investigación se desarrolló con un enfoque experimental y cuantitativo para la producción de biodiésel a partir de aceite de cocina usado, empleando carbón derivado de cáscara de cacao como catalizador. El enfoque experimental evaluó el impacto de variables como temperatura, tiempo y proporciones de reactivos en el rendimiento y calidad del biodiésel, mientras que el enfoque cuantitativo permitió medir parámetros clave como densidad y viscosidad. Además, se empleó microscopía electrónica de barrido (SEM) para

analizar la morfología y estructura superficial del catalizador heterogéneo, determinando características como tamaño de poros y textura, esenciales para optimizar la actividad catalítica y garantizar la eficiencia del proceso.

El proceso estructural para la investigación fue la siguiente: 1) Recolección y selección de la materia prima 2) Producción de carbón, 3) Activación del carbón, 4) Adsorción, 5) Transesterificación 6) Separación. A continuación, se presenta un diagrama que ilustra los procesos involucrados en la obtención del biodiésel (ver Figura 2).

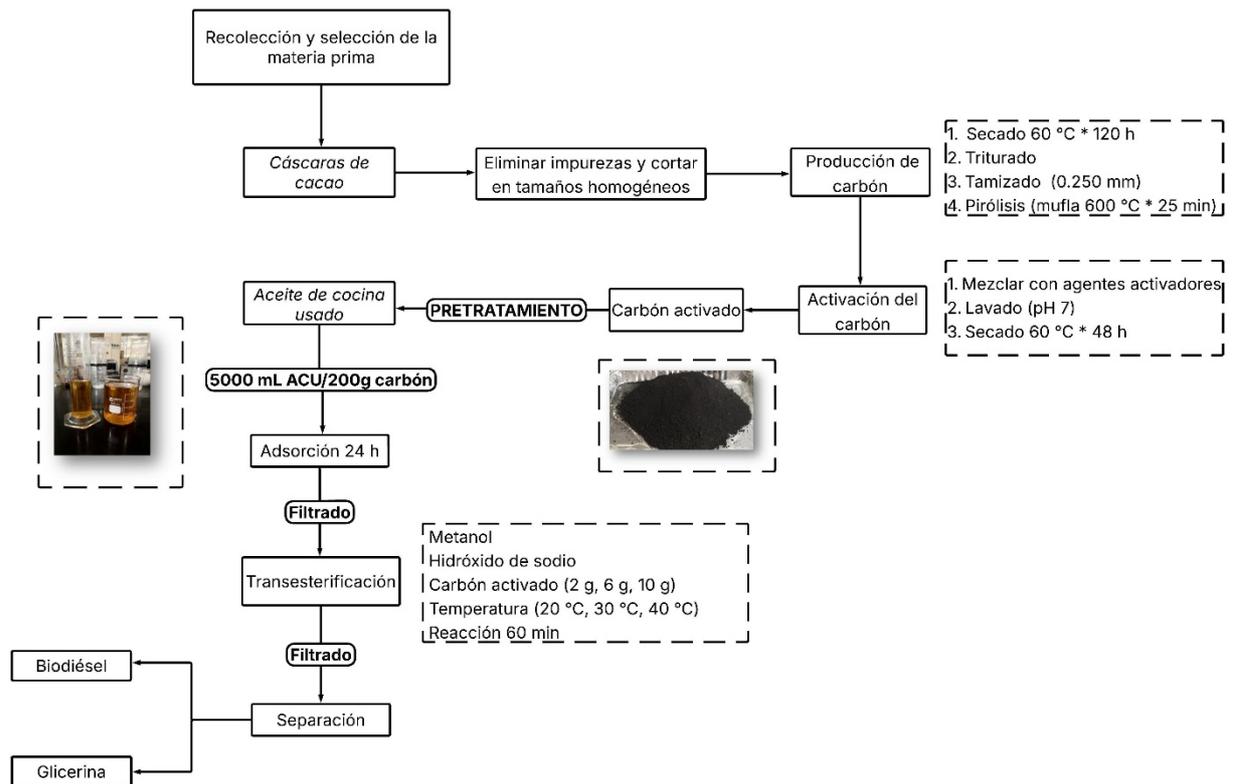


Figura 2. Diagrama de Flujo de Producción de Biodiésel

### 2.3.1 Recolección y selección de la materia prima

Las cáscaras utilizadas fueron de la variedad de cacao CCN-51, recolectadas en una finca cacaotera ubicada en la comunidad La Maravilla, cantón Pucará, provincia del Azuay. El cultivo, con cinco años de antigüedad, se maneja mediante prácticas agrícolas convencionales, lo que permite una producción estable y de buena calidad. La región presenta un clima tropical megatérmico seco, con temperaturas que oscilan entre 22 °C y 24 °C, condiciones ideales para el desarrollo óptimo del cacao [17]. Después de la recolección, se seleccionaron cuidadosamente alrededor de 15 libras de cáscaras, para asegurar su buen estado, eliminando daños visibles e impurezas. Luego, se cortaron en tamaños uniformes de 3 a 5 cm de largo y se almacenaron en una funda plástica para su transporte al laboratorio.

El aceite de cocina usado fue recolectado de 5 hogares de la misma comunidad, obteniendo un total de 5 litros. Posteriormente, fue envasado y almacenado bajo condiciones adecuadas para su procesamiento, asegurándose de protegerlo de la luz mediante envases opacos y conservándolo en un ambiente oscuro a una temperatura de 25 °C, lo que evitó alteraciones en sus propiedades. Además, se mantuvo en un entorno limpio, seco y libre de contaminantes.

### 2.3.2 Producción de Carbón

Para este proceso, las cáscaras cortadas de cacao fueron sometidas a un proceso de secado dentro de un esterilizador a una temperatura constante de 60 °C durante 120 horas, lo que permitió reducir significativamente su contenido de humedad. Una vez secas, se molieron y tamizaron hasta obtener un tamaño de partícula de 0.250 mm, para luego ser procesadas mediante pirólisis de acción termoquímica a una temperatura de 600 °C durante 25 minutos, generando la descomposición del material orgánico sólido por efecto del calor en ausencia de oxígeno, transformándose a un nuevo material [18].

### 2.3.3 Activación del Carbón

Para modificar y mejorar las propiedades del carbón, se empleó el método de activación ácida utilizando ácido clorhídrico (HCl). Para este proceso, se utilizaron 278 g de carbón en mezcla con 1.738 mL de agua destilada y 146 mL de ácido clorhídrico (HCl), dejándose en reposo durante 30 minutos para permitir su acidificación. Transcurrido este tiempo, se realizó un lavado con 500 mL de agua destilada previamente calentada a 100 °C, dejando reposar la mezcla durante 10 minutos. Este procedimiento se repitió 7 veces hasta alcanzar un pH de 7. Finalmente, el material fue secado a 60 °C durante 48 horas, logrando así la eliminación de metales y la incorporación de grupos funcionales ácidos en la superficie del carbón, lo que mejora su capacidad de adsorción y su selectividad [19].

### 2.3.4 Caracterización morfológica del carbón

Para el análisis morfológico, se tomaron muestras de 3 gramos de carbón sin activar y 3 gramos de carbón activado, las cuales fueron enviadas a un laboratorio especializado para su caracterización mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), el análisis consistió en 3 tipos de imágenes: 1) imagen con resolución a 1000× con carbón sin activar, 2) imágenes con resolución de 1050× y 2100× con carbón activado, estas resoluciones magnificadas permitieron detallar de manera eficaz la estructura porosa en las muestras. Para asegurar un mejor contraste y uniformidad para la observación y comparación de las muestras se aplicó parámetros similares de voltaje acelerador (HV) de

10 kV, intensidad (Int) y detector (Det) con una combinación del 50% de electrones secundarios y retrodispersados y la presión de vacío (Vac) se mantuvo en 0.10 Pascales (Pa). El ancho del marco (FW) y la distancia de trabajo (WD) fueron de tamaños diferentes en las tres imágenes.

El proceso consistió en preparar una delgada capa de carbón fijada a un portaobjetos, que luego fue analizada en un escáner de barrido. Este dispositivo captó información detallada de la superficie del carbón, generando imágenes tridimensionales que permiten examinar su estructura [20].

Las imágenes obtenidas fueron analizadas cualitativa y cuantitativamente en Python, evaluando la porosidad, el tamaño y la distribución de partículas mediante técnicas de procesamiento digital. Se aplicó detección de bordes para resaltar las características estructurales del material, permitiendo identificar con mayor precisión la morfología y la disposición de los poros.

### 2.3.5 Producción de biodiésel

Para la obtención de biodiésel, se realizó previamente un proceso de adsorción de impurezas al aceite de cocina usado, mejorando así su calidad antes de la transesterificación. Este proceso se llevó a cabo bajo un diseño experimental que incluyó 9 tratamientos, con el objetivo de evaluar el efecto de las variaciones en la temperatura y el tipo de catalizador. Se probaron 2 tipos de catalizadores: hidróxido de sodio y carbón activado. Como punto de referencia, se llevó a cabo una muestra inicial utilizando únicamente hidróxido de sodio como catalizador, a una temperatura de 20 °C. Esta muestra sin carbón sirvió para identificar variaciones en las propiedades del biodiésel. Cada tratamiento fue diseñado para analizar cómo estas variables independientes influyen en la calidad del biodiésel obtenido. El tiempo de reacción se mantuvo constante para garantizar la comparabilidad de los resultados y minimizar factores externos que pudieran alterar los efectos observados. Para conocer en detalle las condiciones experimentales establecidas para cada muestra (ver Tabla 1).

**Tabla 1.** Diseño experimental del proceso de transesterificación para la producción de biodiésel

Tratamiento	Temperatura (°C)	Carbón Activado (g)	Hidróxido de Sodio (g)	Metanol (mL)	Agitación (rpm)	Tiempo (min)
Testigo	20	0	3.6	99	260	60
M1	20	2	3.6	99	260	60
M2		6	3.6	99	260	60

M3		10	3.6	99	260	60
M4		2	3.6	99	260	60
M5	30	6	3.6	99	260	60
M6		10	3.6	99	260	60
M7		2	3.6	99	260	60
M8	40	6	3.6	99	260	60
M9		10	3.6	99	260	60

Para el proceso de adsorción de residuos del aceite de cocina usado, se utilizaron 5000 mL de aceite, al que se le añadieron 200 g de carbón, dejándolo reposar durante 24 horas. Al finalizar este tiempo, se procedió a filtrar el aceite para eliminar los residuos retenidos por el carbón, logrando así una mayor pureza. Posteriormente, el biocombustible se obtuvo mediante el proceso de transesterificación. Para ello, se preparó una solución compuesta por 99 mL de metanol y 3.6 g de hidróxido de sodio (NaOH), los cuales se disolvieron mediante agitación a 1000 rpm y control de temperatura a 55 °C para asegurar la completa disolución del hidróxido de sodio. Una vez obtenida la solución homogénea, se introdujo en un reactor de vidrio de doble camisa, donde se añadió 390 mL de aceite pretratado. Finalmente, para el análisis experimental, se añadió el catalizador de carbón en diferentes cantidades (2 g, 6 g y 10 g), la reacción se llevó a cabo durante 60 minutos mediante agitación constante de 260 rpm (ver Tabla 1). Una vez completada la reacción, cada muestra fue filtrada para proceder a la decantación durante 24 horas permitiendo así la separación del biodiésel y la glicerina.

### 2.3.6 Cuantificación de rendimiento, densidad y viscosidad del biodiésel

El rendimiento del biodiésel se refiere a la cantidad de biodiésel obtenido en relación con la cantidad de aceite de cocina usado como materia prima utilizada, expresada en porcentaje. Este rendimiento es un indicador clave de la eficiencia del proceso. Para el cálculo de este parámetro se empleó la ecuación (1):

$$\% \text{ Rendimiento de Biodiesel} = \frac{\text{Volumen de biodiésel obtenido (mL)}}{\text{Volumen de aceite utilizado (mL)}} \times 100$$

(1)

Para determinar la densidad del biodiésel, se procedió a medir un volumen de 10 mL de cada muestra y se determinó su masa utilizando una balanza analítica. Posteriormente, se aplicó estos valores a la ecuación correspondiente (2):

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

(2)

Donde,  $\rho$ : Densidad;  $m$ : Masa;  $v$ : Volumen

La viscosidad del biodiésel fue determinada mediante el método de caída de bola, que consistió en medir el tiempo que una esfera tardó en recorrer una distancia específica dentro de un tubo que contenía 200 mL de biodiésel. Luego, se utilizó la ecuación derivada de la Ley de Stokes para calcular la viscosidad. A continuación, se presenta la ecuación (3) empleada:

$$\eta = \frac{2 \cdot g \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot r^2}{9 \cdot v_t} \quad (3)$$

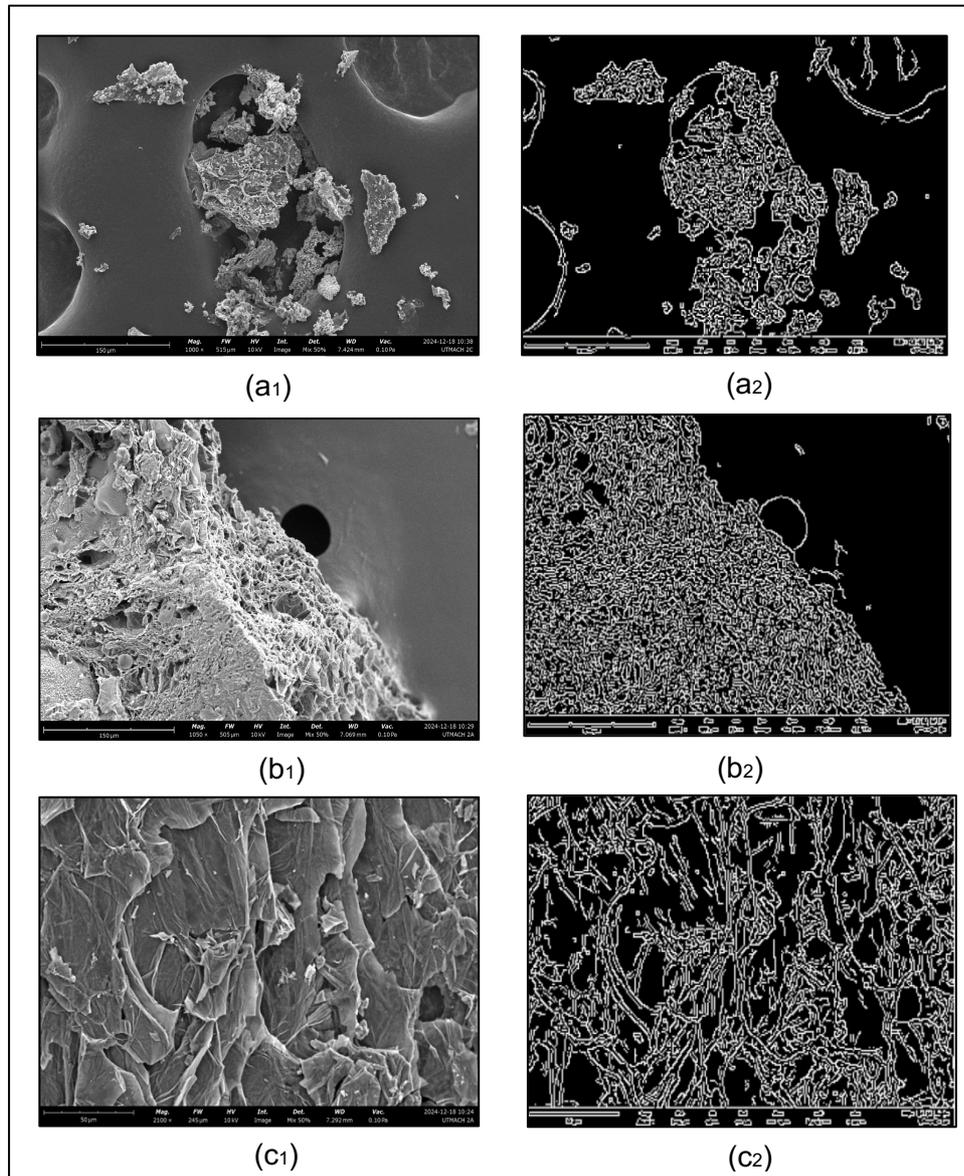
Donde,  $\eta$ : Viscosidad dinámica del fluido;  $g$ : Aceleración gravitacional;  $\rho_s$ : Densidad de la esfera (sólido);  $\rho_f$ : Densidad del fluido;  $r$ : Radio de la esfera;  $v_t$ : Velocidad terminal de la esfera en el fluido.

### 3. Resultados

#### 3.1 Morfología del carbón de cáscara de cacao

Los resultados de este análisis (ver Figura 3) revelan que la muestra de carbón sin activar, con FW de 515  $\mu\text{m}$  y WD 7424 mm (ver Figura 3a1), abarca 354 poros con un área promedio de 182.45  $\mu\text{m}^2$ , caracterizada por una distribución irregular y poros alargados, lo que representa una porosidad moderada y una estructura fracturada que favorece cierta capacidad de adsorción. La imagen 3b1, con carbón activado de FW 505  $\mu\text{m}$  y WD 7069 mm y 7292 mm, indicó cantidades variadas en los poros y tamaño de superficie, alcanzó 438 poros con un área específica promedio de 214.25  $\mu\text{m}^2$ , con una distribución heterogénea de microporos y mesoporos, lo que aumenta la superficie específica y mejora la retención de fluidos. En cambio, la imagen 3c1 la cantidad de poros fue menor (238), con un aumento en el tamaño del área de (772.77  $\mu\text{m}^2$ ), evidenciando cavidades y canales abiertos que, aunque en menor cantidad, pueden facilitar rutas preferenciales para la adsorción.

Las imágenes 3a2, 3b2 y 3c2 corresponden a las mismas muestras previamente analizadas, pero con un proceso de detección de bordes aplicado para mejorar la visualización, resaltando de manera más clara los contornos de las estructuras y facilitando su identificación y caracterización.



**Figura 3.** Microscopía electrónica de barrido y detección de bordes a diferentes niveles de magnificación: 1000× para carbón sin activar (a1 y a2); 1050× para carbón activado (b1 y b2); y 2100× para carbón activado (c1 y c2).

### 3.2 Volumen y rendimiento del biodiésel

El rendimiento promedio general de biodiésel obtenido fue de aproximadamente 81.00%, con resultados uniformes y consistentes en todas las condiciones experimentales evaluadas (ver Tabla 1). El tratamiento testigo presentó la mayor tasa de rendimiento (84.62%), con un volumen producido de 330 mL, seguido de los tratamientos M8, con 83.33% y 325 mL. Los tratamientos M7 y M3 obtuvieron rendimientos similares de 82.05%, con volúmenes de 320 mL cada uno, mientras que los rendimientos más bajos fueron M1 (76.92%) y M2 (78.21%), ambos por debajo del promedio general, con volúmenes de 300 mL y 305 mL (ver Figura 4).

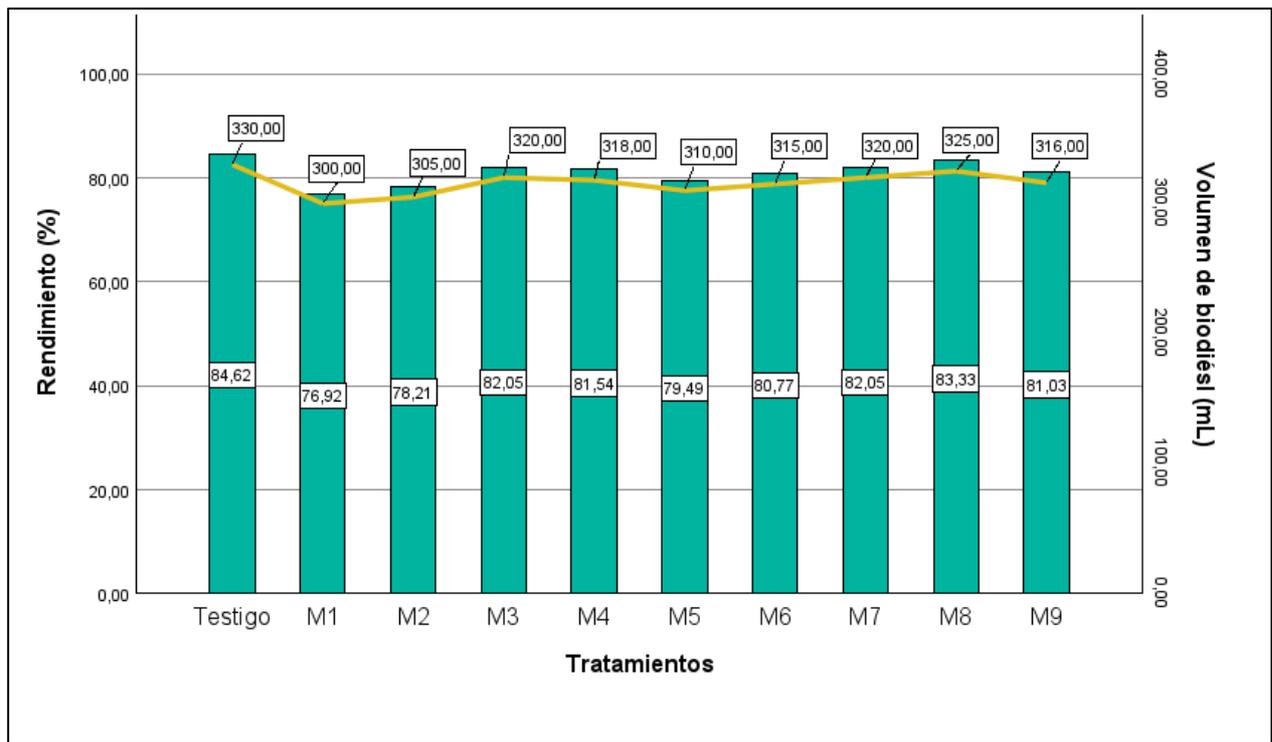


Figura 4. Gráfico comparativo del volumen y rendimiento de biodiésel

### 3.3 Análisis de densidad y viscosidad del biodiésel

La densidad presentó una tendencia relativamente estable en función de las concentraciones de carbón utilizadas y la temperatura aplicado en cada tratamiento. El tratamiento testigo sin la incorporación de carbón registró una densidad de  $853.67 \text{ kg/m}^3$ . Los tratamientos M1, M2 y M3 presentaron una dispersión con valores de  $979.33 \text{ kg/m}^3$ ,  $845.33 \text{ kg/m}^3$  y  $852.33 \text{ kg/m}^3$ , respectivamente. En cambio, en los tratamientos M4, M5 y M6 se obtuvo una tendencia estable al aumentar una mayor cantidad de carbón, se alcanzaron valores que varían entre  $849.67 \text{ kg/m}^3$  y  $899.00 \text{ kg/m}^3$ . Asimismo, en los tratamientos M7, M8 y M9 los valores se situaron entre  $848.33 \text{ kg/m}^3$  a  $861.67 \text{ kg/m}^3$ , evidenciando un ligero aumento al emplear mayores concentraciones de carbón (ver Figura 5).

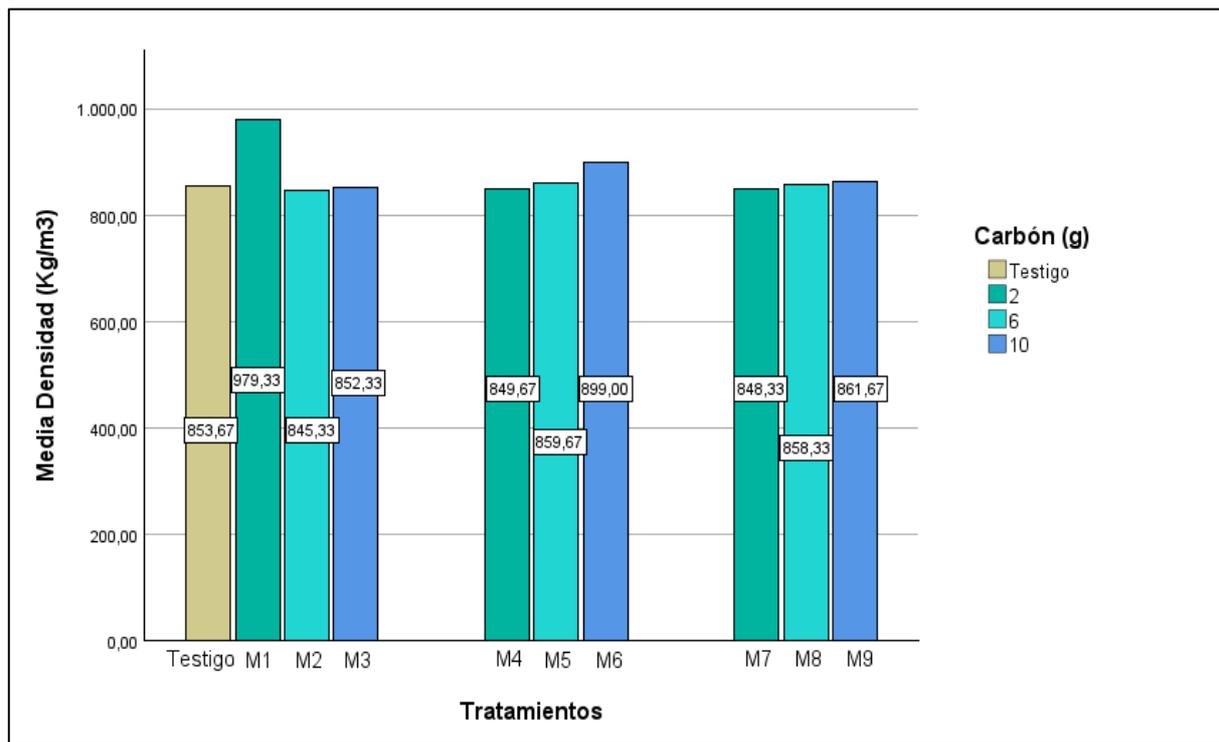


Figura 5. Valores de media de densidad por tratamientos

El comportamiento de la viscosidad mostró variaciones significativas dependiendo de las concentraciones y las condiciones experimentales establecidas. El tratamiento testigo, sin presencia de carbón, presentó la viscosidad más alta con un valor de  $1.93 \text{ mm}^2/\text{s}$ , superando a los demás tratamientos. La viscosidad disminuyó notablemente en M1 ( $1.26 \text{ mm}^2/\text{s}$ ), en comparación con el tratamiento sin carbón. En los tratamientos M2 y M3, se aprecia un incremento de la viscosidad conforme aumenta la concentración de carbón. Los valores registrados para M1, M2 y M3 son  $1.53 \text{ mm}^2/\text{s}$ ,  $1.64 \text{ mm}^2/\text{s}$  y  $1.41 \text{ mm}^2/\text{s}$  respectivamente. Mientras que para los tratamientos M7, M8 y M9 se mantuvo un valor constante de  $1.51 \text{ mm}^2/\text{s}$ . La mayor viscosidad se registró en la M3 ( $1.75 \text{ mm}^2/\text{s}$ ) mayor densidad con presencia de carbón, aunque sigue siendo inferior al tratamiento testigo (ver Figura 6). Este comportamiento sugiere que concentraciones más elevadas de carbón pueden generar un ligero incremento en la viscosidad a temperaturas más bajas.

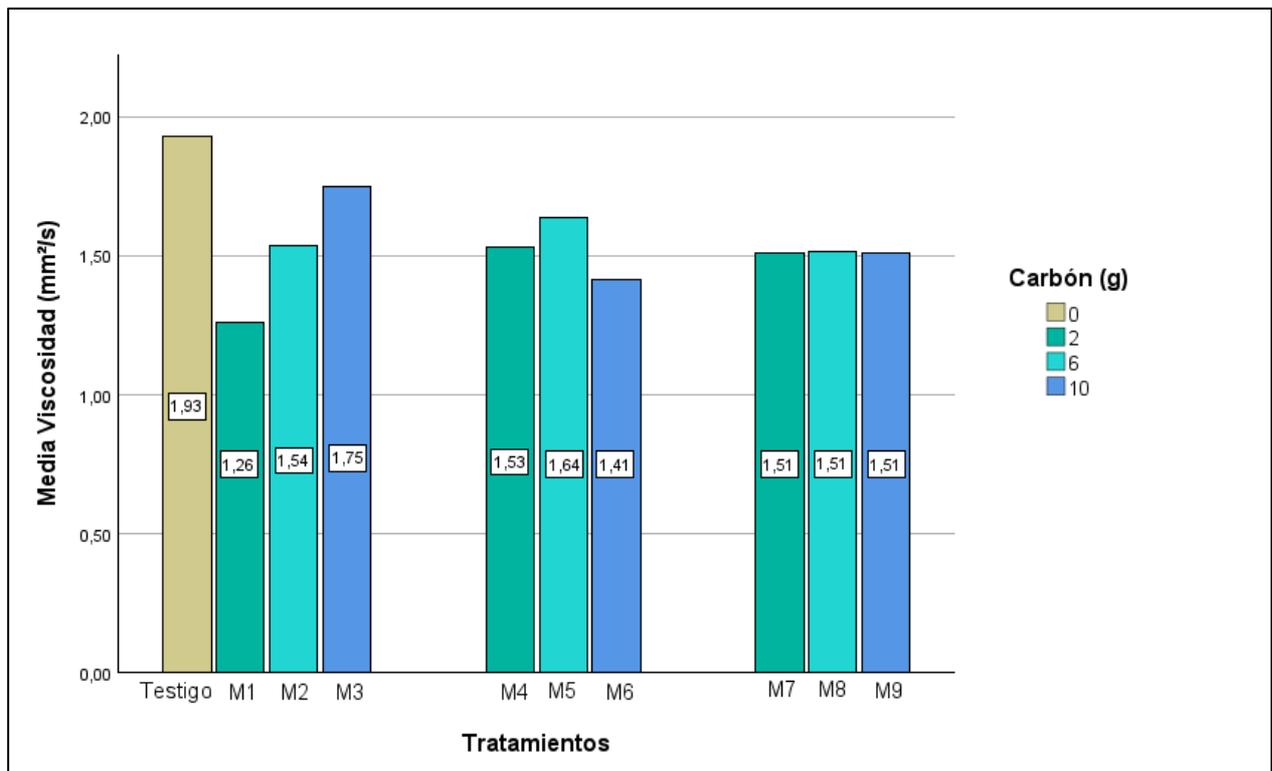


Figura 6. Valores de media de viscosidad por tratamientos

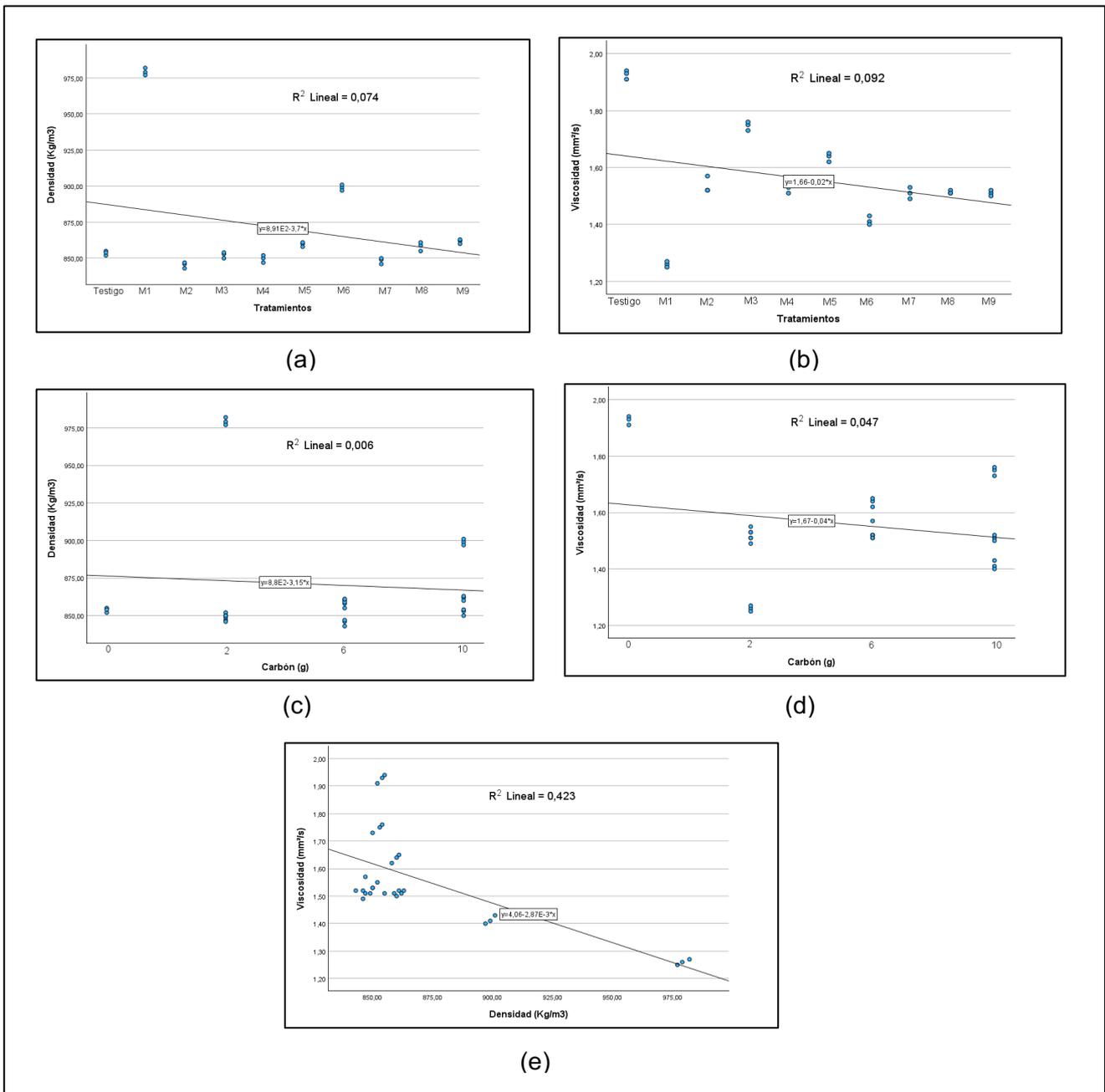
### 3.4 Correlación entre las propiedades físicas y las condiciones de producción del biodiésel

El análisis de correlación de Pearson muestra una relación inversa alta y significativa al nivel de 0.01 entre la densidad y la viscosidad. En contraste, las correlaciones entre los tratamientos y ambas variables, así como entre el carbón y la viscosidad, fueron inversas bajas, mientras que la correlación entre el carbón y la densidad fue inversa muy baja (ver Tabla 2).

Tabla 2. Correlación de Pearson entre las propiedades físicas del biodiésel y sus condiciones de producción

Correlación entre:		p-valor	Coefficiente de correlación r
Tratamientos	Densidad	0.145	-0.272
	Viscosidad	0.103	-0.303
Carbón	Densidad	0.678	-0.079
	Viscosidad	0.249	-0.217
Densidad	Viscosidad	< 0.001	-0.650**

La Figura 7, en los paneles (a) y (b), presenta una alta dispersión de los puntos, lo que indica una correlación débil entre las variables. Esto se refleja en bajos coeficientes de determinación ( $R^2 = 0.074$  para densidad y  $R^2 = 0.092$  para viscosidad). De manera similar, en (c) y (d) se evidencia una gran dispersión, con coeficientes de determinación aún más bajos ( $R^2 = 0.006$  para densidad y  $R^2 = 0.047$  para viscosidad). Por otro lado, en (e) se muestra una nube de puntos con mejor agrupación a lo largo de la línea de tendencia lineal ( $R^2 = 0.423$ ).



**Figura 7.** Diagramas de correlación – dispersión entre: a) Tratamientos y densidad; b) Tratamientos y viscosidad; c) Carbón y densidad; d) Carbón y viscosidad; y e) Densidad y viscosidad.

## 4. Discusión

### 4.1 Análisis de la morfología del carbón de cáscara de cacao

La caracterización morfológica de materiales carbonosos derivados de biomasa permite evaluar su potencial adsorbente, especialmente cuando son sometidos a procesos de activación [21]. Estudios previos han demostrado que la activación, tanto física como química, incrementa la cantidad de microporos y mesoporos, mejorando así la superficie específica y la capacidad de adsorción del material [22,23]. Nuestros hallazgos concuerdan con estos estudios y destacan la importancia de la activación en la optimización de la estructura porosa de los carbones derivados de biomasa.

En este estudio, se observó una diferencia notable entre el carbón sin activar y las muestras activadas. El carbón sin activar mostró una estructura fracturada con 354 poros de distribución irregular y alargada, y un área promedio de  $182.45 \mu\text{m}^2$ , caracterizados por una distribución irregular y poros alargados, lo cual sugiere una porosidad moderada y una estructura fracturada que podría favorecer cierta capacidad de adsorción. La ausencia de un proceso de activación limita el desarrollo de una estructura porosa más definida y una mayor área superficial específica, factores cruciales para una adsorción eficiente. La activación es esencial para mejorar estas propiedades en carbones derivados de biomasa [24].

Las muestras activadas presentaron mejoras significativas en la morfología y propiedades adsorbentes. La primera muestra de carbón activado (muestra 3b<sub>1</sub>) exhibió la mayor cantidad de poros (438) con un área promedio de  $214.25 \mu\text{m}^2$  y una distribución heterogénea de microporos y mesoporos. Esta estructura aumenta la superficie específica y mejora la retención de fluidos, lo cual es beneficioso para aplicaciones de adsorción. La presencia de una combinación de microporos y mesoporos es deseable, ya que permite la adsorción de moléculas de diferentes tamaños [25]. La segunda muestra de carbón activado (muestra 3c<sub>1</sub>), analizada con una mayor magnificación, mostró una menor cantidad de poros (238) pero con un mayor tamaño promedio ( $772.77 \mu\text{m}^2$ ), evidenciando cavidades y canales abiertos. Las características estructurales de las cáscaras de cacao, incluida su porosidad, favorecen una morfología más desarrollada del material, lo que podría facilitar la difusión de moléculas más grandes hacia su interior y, en consecuencia, mejorar su capacidad de adsorción de contaminantes [26].

La elección de la biomasa y las condiciones de activación, como la temperatura y el tiempo, son factores determinantes en la calidad del carbón activado producido. La elevada concentración de celulosa y lignina en la cáscara de la mazorca de cacao es una materia prima adecuada para su producción [20]. Al ser un residuo lignocelulósico, posee una

estructura y contenido de carbono que favorecen la generación de un carbón activado con características óptimas para procesos de adsorción [27].

#### 4.2 Rendimiento del biodiésel

Los resultados obtenidos muestran un rendimiento promedio del 81.00%, considerado satisfactorio al emplear un catalizador alternativo. La producción más alta fue obtenida por el tratamiento testigo, con un rendimiento de 84.62% y un volumen de 330 mL. Este rendimiento superior puede atribuirse a la ausencia de interferencias catalíticas y a la influencia de parámetros en el proceso. Los autores [28] estudiaron cómo la transesterificación sin catalizadores específicos puede optimizar la producción de biodiésel bajo condiciones adecuadas y factores como la mezcla, la agitación y la estabilidad del sistema influyen significativamente en la eficiencia y calidad del producto final.

El uso del catalizador de carbón derivado de cáscara de cacao mostró resultados prometedores, con M8 alcanzando un rendimiento del 83.33% y un volumen de 325 mL, valores cercanos al tratamiento testigo, lo que sugiere su efectividad bajo condiciones específicas. Esto coincide con estudios que indican que la activación térmica o química de materiales lignocelulósicos mejora su capacidad catalítica. El carbón, un material rico en carbono obtenido por pirólisis, ha demostrado ser un adsorbente eficiente, también puede actuar como un catalizador o soporte de catalizadores [29].

Los tratamientos M7 y M3, con rendimientos de 82.05% y volúmenes producidos de 320 mL, reflejan la efectividad del catalizador de carbón activado. Aunque sus rendimientos son levemente inferiores al tratamiento testigo, la producción de biodiésel se mantiene dentro de un rango aceptable. Las condiciones de proceso, incluyendo el tiempo de reacción, la relación molar de alcohol a aceite, la temperatura de reacción y la cantidad de catalizador tienen un efecto significativo en el rendimiento de biodiésel [30].

En contraste, los tratamientos M1 (76.92%) y M2 (78.21%) presentaron rendimientos por debajo del promedio general, con volúmenes de 300 mL y 305 mL, respectivamente. Este comportamiento puede estar relacionado con condiciones menos favorables para la actividad catalítica, como temperaturas inadecuadas o una baja afinidad entre el catalizador y el aceite de cocina usado. Sin embargo, estudios como el de Behera et al. [31] han demostrado que la biomasa pirolizada es el material carbonoso más eficiente y rentable para actuar como catalizador, lo que resalta la importancia de optimizar las condiciones del proceso para mejorar su desempeño.

En general, se evidencia una correlación positiva entre el rendimiento porcentual y el volumen de biodiésel producido. Aunque esta relación no es completamente lineal,

tratamientos como M8 y M3, que muestran altos rendimientos y volúmenes producidos, confirman la viabilidad del uso de carbón de cáscara de cacao como catalizador. Sin embargo, la eficiencia del proceso aún puede mejorarse mediante la optimización de parámetros como la concentración del catalizador, la temperatura y el tiempo de reacción [32].

#### 4.3 *Análisis de densidad y viscosidad del biodiésel*

Los resultados obtenidos evidencian que la adición de carbón y las variaciones de temperatura influyen significativamente en las propiedades de densidad y viscosidad del biodiésel. La densidad del biodiésel, según normativas como la ASTM D6751 y la europea EN 14214, deben situarse entre 860 y 900 kg/m<sup>3</sup> [33]. Se observa que la densidad tiende a aumentar ligeramente con la incorporación de pequeñas cantidades de carbón (2 g), alcanzando un máximo de 979.33 kg/m<sup>3</sup> a 20 °C, valor que excede el límite superior establecido por la normativa. Este fenómeno podría explicarse por la mayor eficiencia en la catálisis al emplear pequeñas cantidades de carbón, promoviendo una conversión más completa de los triglicéridos a ésteres metílicos. La presencia de catalizadores heterogéneos puede influir en la densidad debido a la interacción con los compuestos presentes en la mezcla de reacción [34]. Con incrementos en la cantidad de carbón a 6 g y 10 g, la densidad disminuye a 845.33 kg/m<sup>3</sup> y 852.33 kg/m<sup>3</sup>. A 30 °C y 40 °C, las variaciones en la densidad son menos pronunciadas, con valores que oscilan entre 848.33 kg/m<sup>3</sup> y 899.00 kg/m<sup>3</sup>, acercándose más al rango especificado por la norma. Esto puede deberse a que las variaciones en la temperatura reducen la densidad del biodiésel debido a la disminución de las fuerzas intermoleculares, mejorando así la fluidez del biocombustible [35,36].

La norma ASTM D6751 establece que la viscosidad cinemática del biodiésel a 40 °C debe situarse entre 1.9 y 6.0 mm<sup>2</sup>/s [37]. El tratamiento testigo (sin carbón) presenta la viscosidad más alta con un valor de 1.93 mm<sup>2</sup>/s, apenas por encima del límite inferior del rango establecido. La adición de 2 g de carbón genera una disminución notable en la viscosidad, especialmente a 20 °C (1.26 mm<sup>2</sup>/s). Esto sugiere que el carbón derivado de cáscara de cacao facilita la descomposición de los triglicéridos, reduciendo la formación de compuestos con cadenas más largas y, por ende, disminuyendo la viscosidad. Este comportamiento concuerda con investigaciones que señalan la eficiencia de catalizadores heterogéneos para mejorar las propiedades reológicas del biodiésel [38,39].

A medida que se incrementa la cantidad de carbón a 6 g y 10 g, la viscosidad aumenta progresivamente, alcanzando valores de 1.64 mm<sup>2</sup>/s a 30 °C y 1.51 mm<sup>2</sup>/s a 40 °C para ambas concentraciones. Barros et al. [40] encontraron que cantidades excesivas de

catalizador pueden inducir reacciones secundarias o generar impurezas que afectan negativamente las propiedades del biodiésel.

#### 4.4 Influencia de los tratamientos y carbón en las propiedades físicas del biodiésel

Los resultados obtenidos del análisis de correlación de Pearson indicaron una fuerte relación inversa entre la densidad y la viscosidad del biodiésel ( $r = -0.650$ ,  $p < 0.001$ ). Esta correlación significativa indica que a medida que la densidad del biodiésel disminuye, su viscosidad tiende a aumentar, y viceversa. Esta tendencia puede explicarse por las interacciones moleculares presentes en los ésteres metílicos, las cuales influyen simultáneamente en ambas propiedades físicas [41]. Además, factores estructurales de los ácidos grasos, como el grado de insaturación y la longitud de la cadena, influyen de manera notable en los valores de densidad y viscosidad [42].

Las correlaciones entre los tratamientos experimentales y las propiedades físicas, como la densidad y la viscosidad fueron bajas y no significativas ( $r = -0.272$  y  $-0.303$ , respectivamente). La influencia de las condiciones experimentales sobre estas propiedades, al menos desde una perspectiva lineal, parece ser limitada. Pequeñas variaciones en parámetros como temperatura de reacción, proporción molar o tipo de catalizador no alteraron significativamente la densidad ni la viscosidad del producto final, lo que refleja una relativa estabilidad del biodiésel frente a ajustes en las condiciones operativas [43].

En relación a la variable gramos de carbón, se observó una correlación inversa baja con la viscosidad ( $r = -0.217$ ) y muy baja con la densidad ( $r = -0.079$ ), lo que evidencia que el contenido de carbono residual en el producto final podría tener una influencia leve sobre sus propiedades físicas. La presencia de impurezas, como carbón no reaccionado o glicerol, puede impactar negativamente la estabilidad y el rendimiento del biodiésel [44]. No obstante, su influencia directa sobre la densidad y la viscosidad varía dependiendo del tipo de materia prima y las condiciones del proceso de producción [45].

## 5. Conclusión

El análisis morfológico mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) indicó diferencias significativas entre las muestras de carbón sin activar y las de carbón activado, presentando un área promedio de  $182.45 \mu\text{m}^2$  (carbón sin activar), menor que el área del carbón activado, que fue de  $214.25 \mu\text{m}^2$ , un factor esencial para mejorar la eficiencia catalítica en el proceso. Adicionalmente, la densidad del biodiésel obtenido cumple con las normativas ASTM D6751 y EN 14214, alcanzándose valores de  $899.00 \text{ kg/m}^3$  (M6) y  $861.67 \text{ kg/m}^3$  (M9) en las muestras analizadas. En lo referente a la viscosidad, el valor más cercano a la norma fue de  $1.75 \text{ mm}^2/\text{s}$  (M3). Por último, se puede concluir que

existió una diferencia significativa entre la densidad y viscosidad ( $r = -0.650$ ,  $p < 0.001$ ) indicando que, a medida que la densidad disminuye, la viscosidad tiende a aumentar.

**Contribución de autores:** Todos los autores han contribuido sustancialmente al trabajo.

**Financiamiento:** Los autores financiaron a integridad el estudio.

**Conflictos de interés:** Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

## Referencias

1. Dinh, S.K.; Duong, H.; Phan Dinh, T. Environmental Impacts Assessment of Biodiésel Production from Jatropha and Waste Cooking Oil (Wco). *Vietnam Journal of Science and Technology* **2019**, *57*, 606–616, doi:10.15625/2525–2518/57/5/13371.
2. Rana, Md.M.; Mueed, Md.M.A.–; Islam, M.N.; Ali, Md.H. Production and Analysis of Biodiésel from Mango Seed Kernels and Tamarind Seeds Using Hybrid Approach of Solvent Extraction and Transesterification. *Results in Engineering* **2025**, *25*, 103983, doi:10.1016/j.rineng.2025.103983.
3. Rufai Fakai, U.; Zubairu Utono, A.; Nuradden Bui, M. Evaluating Biodiésel Properties from Waste Cooking Oil for Sustainable Energy Applications. *Journal of Energy Engineering and Thermodynamics* **2024**, *4*, doi:10.55529/jet.46.1.8.
4. Chen, H.; Ding, M.; Li, Y.; Xu, H.; Li, Y.; Wei, Z. Feedstocks, Environmental Effects and Development Suggestions for Biodiésel in China. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* **2020**, *7*, 791–807, doi:10.1016/j.jtte.2020.10.001.
5. Velasco, J.F.; F. Mendoza, J.M.; Aznar, J.A.; Gallego, A. (PDF) Circular Economy Implementation in the Agricultural Sector: Definition, Strategies and Indicators. *Resources, Conservation & Recycling* **2021**, *170*, doi:10.1016/j.resconrec.2021.105618.
6. Hosseinzadeh–Bandbafha, H.; Li, C.; Chen, X.; Peng, W.; Aghbashlo, M.; Lam, S.S.; Tabatabaei, M. Managing the Hazardous Waste Cooking Oil by Conversion into Bioenergy through the Application of Waste–Derived Green Catalysts: A Review. *Journal of Hazardous Materials* **2022**, *424*, 127636, doi:10.1016/j.jhazmat.2021.127636.
7. Jadán, M.; Morejón, M.; García, S.; Burgos, G.; García, G. Obtención de biodiésel a partir de la transesterificación de aceite vegetal residual. *infoANALÍTICA* **2022**, *11*, 31–51, doi:10.26807/ia.v11i1.242.
8. Malla, L.; Bravo, D.; Toledo, E. Disposición a Pagar Por El Servicio de Recogida de Aceite de Cocina Usado En El Hogar: Un Estudio de Caso En Loja, Ecuador. *Revista Económica* **2024**, *12*, 57–66, doi:10.54753/rve.v12i2.2181.

9. Moya, M.M.; Moya, J. Biodegradación de residuos de aceite usado de cocina por hongos lipolíticos: un estudio in vitro. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* **2020**, *36*, 351–359, doi:10.20937/RICA.53054.
10. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos [INEC] Información Ambiental En Hogares ESPND 2019 Available online: [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas\\_Ambientales/Hogares/Hogares%202019/MOD\\_AMB\\_HOGAR\\_ESPND\\_2019\\_11.pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Hogares/Hogares%202019/MOD_AMB_HOGAR_ESPND_2019_11.pdf) (accessed on 27 December 2024).
11. Mora, A.G.; Ureña, D.A. Obtención de Biodiésel a Partir de Aceites Usados de Cocina, Utilizando Un Catalizador de Ceniza de Cacao CCN-51., 2022.
12. Vélez, A.M.; Marquinez, J.F.; Vega, F.Y.; Vega, A. del C. Desarrollo sostenible de Ecuador a través del desarrollo de las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable. *Recimundo* **2024**, *8*, 103–113, doi:10.26820/recimundo/8.(2).abril.2024.103-113.
13. Herrera, D.; Bermúdez, J.; Castilla, C. (PDF) Análisis Del Desempeño de La Potencia y El Torque de Un Motor Diésel Operando Con Mezclas de Biodiésel de Palma. *Ingeniería* **2020**, *25*, 250–263, doi:10.14483/23448393.15676.
14. Aguiar, S.; Estrella, M.E.; Cabadiana, H.U. Residuos agroindustriales: su impacto, manejo y aprovechamiento. *Axioma* **2022**, 05–10, doi:10.26621/ra.v1i27.803.
15. Delgado, S.J.; Zambrano, G.J.; Burgos, G.A.; Moreira, C.A. Evaluación de los residuos agroindustriales con potencial para biocombustibles. *Revista Colón Ciencias, Tecnología y Negocios* **2023**, *10*, 53–73, doi:10.48204/j.colonciencias.v10n2.a4140.
16. Morales, D.P.; Arrieta, Á.Á.A. Utilización de residuos agroindustriales en la elaboración de materiales. *Editorial CECAR* **2023**, 231–251, doi:10.21892/9786287515413.10.
17. Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) Actualización Del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Cantonal de Pucará 2024.
18. Ibrahim, H. Pyrolysis in the Chemical Industry and Its Major Industrial Applications. *Innovation Science and Technology* **2023**, *2*, 1–11, doi:10.56397/IST.2023.03.01.
19. Munar, D.A.; Ramírez, N.E.; García, J.A. Biocarbón como producto de la biomasa residual de palma de aceite en un concepto de economía circular. *Boletines técnicos* **2022**, 1–80.
20. Barrezueta Unda, S.; Romero Bonilla, H.; Rios Hidalgo, M. Características principales del biocarbón derivado de restos de *Theobroma cacao* L. para su uso en suelos agrícolas. *Revista Colombiana de Química* **2023**, *52*, 19–24, doi:10.15446/rev.colomb.quim.v52n1.110591.
21. Díaz Chacón, L.; Arévalo Fester, J.; Plaza Pirela, E.; Atencio-Fuenmayor, R. Caracterización Por Microscopía Electrónica de Barrido de Micro y Nanoesferas de Carbono Obtenidas a Partir de

- Naftaleno Empleando La Técnica de Deposición Química En Fase de Vapor. *Acta Microscopica* **2011**, *20*, 54–59.
22. Feng, P.; Li, J.; Wang, H.; Xu, Z. Biomass-Based Activated Carbon and Activators: Preparation of Activated Carbon from Corncob by Chemical Activation with Biomass Pyrolysis Liquids. *ACS Omega* **2020**, *5*, 24064–24072, doi:10.1021/acsomega.0c03494.
23. Tsarpali, M.; Kuhn, J.N.; Philippidis, G.P. Activated Carbon Production from Algal Biochar: Chemical Activation and Feasibility Analysis. *Fuel Communications* **2024**, *19*, 100115, doi:10.1016/j.fueco.2024.100115.
24. Abdulbari A., A.; Abdulraqueeb, A.; Laila A. Al, K.; Hani, D. Biomass-Based Activated Carbon. In *From Biomass to Biobased Products*; IntechOpen, 2024 ISBN 978-1-83769-003-9.
25. Rodriguez, A.; Trujillo, D.; Carranza Rodriguez, A. *Propiedades y Aplicaciones Del Carbón Activado: Un Análisis Completo*; 2025;
26. Saltos, K.; Bravo, A.; Mosquera, R.; Riera, M. Efficiency of Activated Carbon Derived from Cocoa Shells in Removing Pollutants from Wastewater. *Journal of Ecological Engineering* **2024**, *25*, 151–162, doi:10.12911/22998993/188206.
27. Valencia, L.F.; Tovar, A.M.; Villa, A.L. Transformation of Organic Cacao (Theobroma Cacao) Husk into Commercial. *Ingeniería y Competitividad* **2024**, *26*, doi:10.25100/iyc.v26i3.13519.
28. Oyekunle, D.T.; Barasa, M.; Gendy, E.A.; Tiong, S.K. Heterogeneous Catalytic Transesterification for Biodiésel Production: Feedstock Properties, Catalysts and Process Parameters. *Process Safety and Environmental Protection* **2023**, *177*, 844–867, doi:10.1016/j.psep.2023.07.064.
29. Kopp Alves, A.; Hauschild, T.; Basegio, T.M.; Amorim Berutti, F. Influence of Lignin and Cellulose from Termite-Processed Biomass on Biochar Production and Evaluation of Chromium VI Adsorption. *Sci Rep* **2024**, *14*, 14937, doi:10.1038/s41598-024-65959-5.
30. Yusuf, B.O.; Oladepo, S.A.; Ganiyu, S.A. Efficient and Sustainable Biodiésel Production via Transesterification: Catalysts and Operating Conditions. *Catalysts* **2024**, *14*, 581, doi:10.3390/catal14090581.
31. Behera, B.; Selvan S, M.; Dey, B.; P, B. Algal Biodiésel Production with Engineered Biochar as a Heterogeneous Solid Acid Catalyst. *Bioresource Technology* **2020**, *310*, 123392, doi:10.1016/j.biortech.2020.123392.
32. Putri, P.E.Y.; Bestari, C.B.A. Optimization Transesterification Reaction in the Synthesis of Biodiésel from Household Catering Waste Cooking Oil: Transesterification. *Journal of Biobased Chemicals* **2024**, *4*, 81–95, doi:10.19184/jobc.v4i1.813.

33. Tobío-Pérez, I.; Melo-Espinosa, E.A.; Suárez-Hernández, J.; Sotolongo-Pérez, J.Á.; Piloto-Rodríguez, R. Evaluación de mezclas de biodiésel de *Jatropha curcas* (L.) en bancos de motores diésel. *Pastos y Forrajes* **2018**, *41*, 300–309.
34. Gómez-Delgado, E.E.; Nabarlatz, D.; Avellaneda-Vargas, F.A. Obtención de biodiésel por transesterificación in situ a partir de semillas de *Jatropha curcas* L. *Revista UIS ingenierías* **2022**, *21*, 21–38.
35. Kassem, Y.; Çamur, H. A Laboratory Study of the Effects of Wide Range Temperature on the Properties of Biodiésel Produced from Various Waste Vegetable Oils. *Waste and Biomass Valorization* **2017**, *8*, 1995–2007, doi:10.1007/S12649-016-9753-4.
36. Gómez-Delgado, E.E.; Nabarlatz, D.; Avellaneda-Vargas, F.A. Obtención de biodiésel por transesterificación in situ a partir de semillas de *Jatropha curcas* L. *Revista UIS ingenierías* **2022**, *21*, 21–38.
37. García Muentes, S.A.; Lafargue Pérez, F.; Labrada Vázquez, B.; Díaz Velázquez, M.; Sánchez del Campo-Lafita, A.E. Propiedades fisicoquímicas del aceite y biodiésel producidos de la *Jatropha curcas* L. en la provincia de Manabí, Ecuador. *Revista Cubana de Química* **2018**, *30*, 142–158.
38. Prasetyo, D.A.; Saputro, M.R.A.; Ulma, Z. Arang Kulit Biji Kakao (*Theobroma Cacao* L) Sebagai Adsorben Untuk Menurunkan Kadar Asam Lemak Bebas Pada Pembuatan Biodiésel Dari Minyak Jelantah. *Jurnal Teknik Terapan* **2023**, *2*, 12–23, doi:10.25047/jteta.v2i1.24.
39. Silva, D.S.; Silva dos Santos, R.K.; Silva Carneiro, M.E.; Thode Filho, S.; da Silveira Maranhão, F.; Gomes de Souza, F. The Importance of Viscosity Analysis in Biodiésel. *Brazilian Journal of Experimental Design, Data Analysis and Inferential Statistics* **2023**, *1*, doi:10.55747/bjedis.v1i2.62228.
40. Barros Ferreira, R.S.; Menezes dos Passos, R.; Araujo Sampaio, K.; Caldas Batista, E.A. Heterogeneous Catalysts for Biodiésel Production: A Review. *Food and Public Health* **2019**, *9*, 125–137, doi:10.5923/j.fph.20190904.04.
41. Hoang, A.T. Prediction of the Density and Viscosity of Biodiésel and the Influence of Biodiésel Properties on a Diesel Engine Fuel Supply System. *Journal of Marine Engineering & Technology* **2021**, *20*, 299–311, doi:10.1080/20464177.2018.1532734.
42. Khethiwe, E.; Clever, K.; Jerekias, G. Effects of Fatty Acids Composition on Fuel Properties of *Jatropha Curcas* Biodiésel. *SGRE* **2020**, *11*, 165–180, doi:10.4236/sgre.2020.1110010.
43. Kocakulak, M.B.-S.K.-T. Response Surface Method Based Optimization of the Viscosity of Waste Cooking Oil Biodiésel. *sciperspective* **2021**, *1*, 30–37, doi:10.29228/sciperspective.49697.

44. Šalić, A.; Kučan, K.Z.; Gojun, M.; Rogošić, M.; Zelić, B. Chapter 7 – Biodiésel Purification: Real-World Examples, Case Studies, and Current Limitations. In *Sustainable Biodiésel*; Tabatabaei, M., Nizami, A.-S., Eds.; Biomass and Biofuels; Academic Press, **2023**; pp. 185–237 ISBN 978-0-12-820361-3.
45. Bharathiraja, B.; Chakravarthy, M.; Kumar, R.R.; Yuvaraj, D.; Jayamuthunagai, J.; Kumar, R.P.; Palani, S. Biodiésel Production Using Chemical and Biological Methods – A Review of Process, Catalyst, Acyl Acceptor, Source and Process Variables. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2014**, *38*, 368–382, doi:10.1016/j.rser.2014.05.084.



© 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>