





Evaluación de la esterificación del aceite de corozo (*Attalea cohune*) para la producción de metil ésteres

Evaluation of corozo oil esterification (*Attalea cohune*) for methyl esters production

Andrés Gilberto Rueda Jaimés ^{1,2}, Sandra Milena Montesino Rincón ^{1,3},
Ana Milena Salazar Beleño ^{1,4}, Oscar Orlando Porras Atencia ^{1,5}.

¹Instituto Universitario de la Paz. UNIPAZ. Barrancabermeja, Colombia. ²✉ andresg.rueda@unipaz.edu.co; ³✉ sandra.montesino@unipaz.edu.co; ⁴✉ ana.salazar@unipaz.edu.co; ⁵✉ rectoria@unipaz.edu.co



<https://doi.org/10.15446/acag.v72n3.112055>

2023 | 72-3 p 217-224 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 2023-12-13 Acep.: 2024-02-28

Resumen

El uso de combustibles fósiles se ha clasificado como la principal causa de la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Es por esta razón que los biocombustibles han surgido como una alternativa sostenible en el aspecto energético, debido a la disminución de la emisión del CO₂. Además, estos se obtienen a partir de materia orgánica proveniente de la agroindustria, como la palma de corozo (*Attalea cohune*), especie distribuida en Centroamérica y la región tropical de Suramérica. Por su parte, en Colombia es encontrada en el corregimiento de Aguas Blancas del municipio de San Martín, Cesar. El presente estudio evalúa las condiciones de concentración del catalizador ácido (H₂SO₄) y la relación molar aceite : metanol en la reacción de esterificación del aceite extraído de la palma de corozo, teniendo en cuenta el rendimiento de la reacción y el índice de acidez del producto. Entre las condiciones evaluadas sobresalen una relación molar de 6.5 y una concentración de catalizador de 0.95 % P/P, que obtienen un valor de rendimiento de 85.06 % y un índice de acidez de 0.48 mg KOH/g aceite, las cuales son condiciones ideales para el uso potencial del aceite esterificado en la producción de metil ésteres.

Palabras clave: acidez, *Attalea cohune*, biocombustibles, biodiesel, esterificación.

Abstract

The use of fossil fuels has been classified as the main cause of the emission of greenhouse gases into the atmosphere, it is for this reason that biofuels have emerged as a sustainable energetic alternative due to the reduction in CO₂ emission. They are obtained from organic matter from agroindustry as corozo palm (*Attalea cohune*), a species distributed in Central America and the tropical region of South America. In Colombia, it is found in the district of Aguas Blancas in the municipality of San Martín, Cesar. The present study evaluated the concentration conditions of the acid catalyst (H₂SO₄) and the oil : methanol molar ratio in the esterification reaction of the oil extracted from the corozo palm, considering the reaction yield and the acidity index of the product. Among the evaluated conditions stands out a molar ratio of 6.5 and a catalyst concentration of 0.95 % W/W, obtaining a yield value of 85.06 % and an acidity index of 0.48 mg KOH/g oil, being these the ideal conditions for the potential use of the esterified oil in the production of methyl esters.

Keywords: acidity, *Attalea cohune*, biodiesel, biofuels, esterification.

Introducción

La palma de corozo (*Attalea cohune*) es una planta silvestre endémica de Centroamérica y, además, está distribuida en México y Colombia, donde se encuentra en la región del Magdalena Medio. Está clasificada junto a otras especies de palma en amenaza de extinción debido a la deforestación en esta zona, ya que no se encuentra ninguna reserva estatal (Calderón *et al.*, 2005). Esta palma puede alcanzar entre los 3 y 15 metros de altura, y tiene la ventaja de ser resistente a perturbaciones por la reducción de cubierta forestal y degradación de los suelos. Es común que se encuentre en regiones antropogénicas y es dominante en los bosques de rebrote, donde se adapta a suelos húmedos y provistos de altas concentraciones de nutrientes (Eshleman y Beach, 2020). Las condiciones ideales para que la palma produzca una buena cantidad de aceite corresponden a un promedio de precipitación anual de 1300 mm y un clima tropical (Rejón, 2012), estas condiciones se relacionan a las condiciones del Magdalena Medio y específicamente al municipio de San Martín.

En el caso de las semillas, se ha reportado que estas tienen entre un 65 y 75 % de lípidos, y su aceite es usado para la producción de lubricantes, jabones y margarinas, y puede ser extraído mediante métodos mecánicos como la extrusión (Krist, 2020). La composición del aceite extraído de la palma de corozo se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química del aceite de *Attalea cohune*

Ácido	Contenido (%)
Caprónico	0.3
Caprílico	8.7
Cáprico	7.2
Láurico	47.3
Mirístico	16.2
Palmítico	7.7
Esteárico	3.2
Oléico	8.3
Linoléico	1.0

Fuente: Krist, 2020.

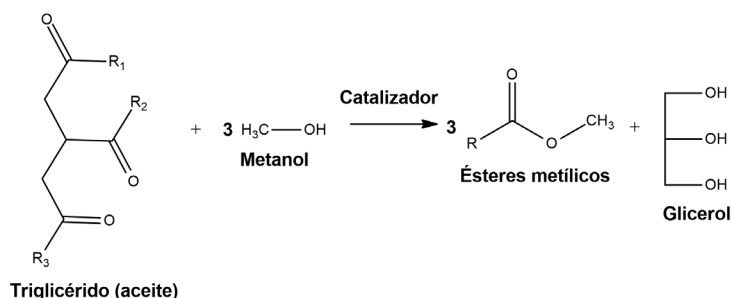


Figura 1. Reacción de transesterificación de triglicéridos.

A pesar del alto rendimiento en la extracción del aceite, y de tener propiedades similares al aceite de palma, el aceite extraído de *Attalea cohune* tiene un índice de saponificación de 241 mg KOH/g de aceite (Oboh, 2023), el cual excede al aceite de palma en un rango entre 189 y 199 mg KOH/g de aceite, y es utilizado como biocombustible en la industria energética (Camargo, 2022). Este valor de índice de saponificación del aceite de *Attalea cohune* es la causa de su poca presencia en el mercado, lo que indica que al aceite crudo se le debe realizar un pretratamiento con el fin de disminuir la cantidad de ácidos grasos libres que formen compuestos indeseables no pertenecientes a los metil ésteres del biodiesel.

Para la obtención de biodiesel a partir de material oleaginoso, se realiza la reacción de transesterificación, la cual consiste en el rompimiento de los triglicéridos por la acción de un catalizador básico para la formación de ésteres metílicos y glicerol, tal como se muestra en la Figura 1.

Entre las condiciones de la materia prima para la obtención de biodiesel, aquellas que llaman más la atención son el índice de acidez y el índice de saponificación, ya que un valor bajo en estos índices asegura una mayor conversión en metil ésteres, lo que, a su vez, da una mayor calidad al biodiesel obtenido y evita la rancidez oxidativa del producto (Ferreira *et al.*, 2021). Para la obtención del biodiesel se han estudiado diferentes materias primas, tanto de fuente vegetal como animal, las cuales se registran en la Tabla 2.

Aunque varias fuentes de biodiesel tienen un índice de acidez bajo, en el caso de algunos aceites crudos que tienen este valor alto, se necesita hacer un pretratamiento debido a la alta probabilidad de formación de jabones que dificultan la separación entre el biodiesel y el glicerol producido en la transesterificación (Takase y Essandoh, 2021) respectively. Biodiesel yield of 90 wt.% was obtained by acid transesterification (9 wt.% HCl, 6:1 methanol: oil molar ratio, 60°C, 46 h. Es por esta razón que se necesita realizar una refinación del aceite que consiste en una esterificación ácida (Figura 2).

Tal como se muestra en la Figura 2, el propósito de la esterificación es la transformación de los ácidos grasos libres en ésteres metílicos con el fin de evitar

la interacción de estos con el catalizador básico de la transesterificación (Punvichai *et al.*, 2022) namely palm oil derived using palm fatty acid distillate (PFAD). En el caso del presente estudio, para el aceite extraído de la palma de corozo (*Attalea cohune*) no se han reportado usos energéticos como la producción de biodiesel, por lo tanto, aprovechando que es una especie presente en la región de San Martín, Cesar, se propone evaluar el potencial uso del aceite de corozo como biodiesel mediante el proceso de esterificación ácida con metanol.

Materiales y métodos

Zona de estudio

El desarrollo de la investigación fue realizado en el Centro de Investigaciones Santa Lucía del Instituto Universitario de la Paz - UNIPAZ, ubicado en el Distrito Especial de Barrancabermeja del departamento de Santander, Colombia, en el km 14 vía Barrancabermeja - Bucaramanga (7.069330882046121,

-73.74556390570883). La recolección de la materia prima se realizó en la finca El Paraíso, que está ubicada a 11 km del municipio de San Martín, en el departamento de Cesar (8.519572631878741, -73.6503794361922).

Extracción del aceite de corozo

Para la extracción del aceite, posterior a la recolección, el fruto fue lavado con agua con el fin de eliminar los contaminantes. Posteriormente el fruto se rompió de forma mecánica para eliminar el exocarpio y mesocarpio; después de obtener el endocarpio del fruto, este se trocó con el uso de un cuchillo para finalmente secar al sol durante 24 horas (Figura 3). Después de este proceso de secado, el endocarpio recolectado se secó al horno durante 2 horas a 60 °C con el fin de extraer el aceite por método mecánico; para ello se utilizó una extrusora de aceite Vevor®. El aceite extraído fue centrifugado durante 10 minutos a 5000 rpm con el fin de eliminar contaminantes presentes en la extracción.

Tabla 2. Índice de acidez del biodiesel producido a partir de diferentes materias primas

Materia prima	Índice de acidez (mg KOH/g aceite)	Fuente
Aceite de icaco (<i>Chrysobalanus icaco</i> L.)	0.32 - 0.40	(Rueda Jaimés <i>et al.</i> , 2023)
Aceite de palma (<i>Elaeis guineensis</i> Jac.)	1.1 - 1.2	
Aceite de <i>Jatropha curcas</i>	0.21	(Sánchez-Hechavarría <i>et al.</i> , 2023)
Grasa de cerdo	0.45	(Takase & Essandoh, 2021)respectively. Biodiesel yield of 90 wt.% was obtained by acid transesterification (9 wt.% HCl, 6:1 methanol: oil molar ratio, 60°C, 46 h
Aceite de cocina usado	4.81	(Hsiao <i>et al.</i> , 2021)low quality oils (waste cooking oils
Aceite de colza (<i>Brassica napus</i>)	0.32	
Aceite de girasol (<i>Helianthus annuus</i>)	0.47	(Encinar <i>et al.</i> , 2020)

Fuente: elaboración propia.

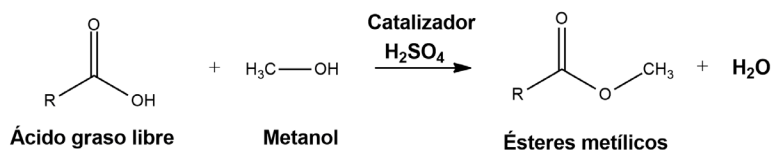


Figura 2. Reacción de esterificación de ácidos grasos libres.

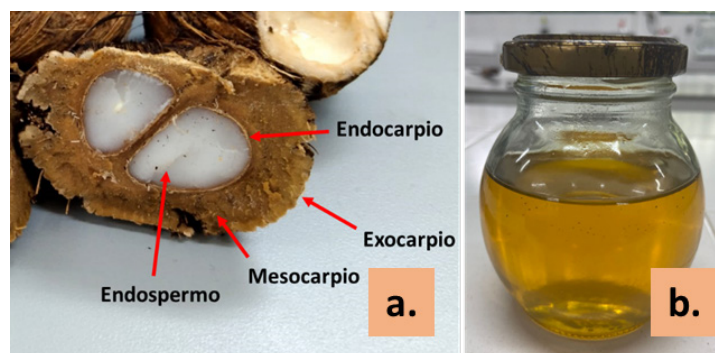


Figura 3. a. Anatomía del fruto de corozo (*Attalea cohune*). b. Aceite extraído de la palma de corozo.

Caracterización fisicoquímica del aceite extraído

Para evaluar las características del aceite de *Attalea cohune*, se realizaron los siguientes análisis fisicoquímicos al aceite extraído:

1. Densidad aparente: utilizando la metodología establecida en la NTC 336, se pesó un picnómetro vacío con el tapón esmerilado, seguidamente se llenó con el aceite extraído y se colocó el tapón esmerilado, teniendo cuidado de no incluir burbujas de aire, y se limpió cuidadosamente hasta secar completamente. Por último, se pesó el picnómetro lleno con el tapón esmerilado. El proceso se realizó por triplicado a una temperatura de 25 °C y la determinación de la densidad se realizó con la ecuación 1.

$$\text{Densidad} = \delta = \frac{m_{\text{picnómetro lleno}} - m_{\text{picnómetro vacío}}}{\text{Volumen picnómetro}} \quad (\text{Ec. 1})$$

2. Índice de acidez: de acuerdo con la metodología de la NTC 218, se pesaron en un matraz aproximadamente 7 gr del aceite extraído. Posteriormente, en un Erlenmeyer se calentaron 50 ml de etanol con 0.5 ml del indicador de fenoltaleína hasta alcanzar una temperatura de 70 °C, para luego neutralizar el etanol con una solución de KOH 0.1 N. Luego de esto se agregó el etanol neutralizado a la porción de ensayo en el primer matraz y se mezcló. Se llevó el contenido a ebullición y se tituló con la solución de KOH, agitando el contenido del matraz vigorosamente durante la titulación. Se realizó el procedimiento para las muestras en estudio expresando el resultado en mg de KOH/ 100 g por triplicado, y calculando el valor con la ecuación 2.

$$\text{Índice de acidez} = \text{I.A.} = \frac{(\text{P.M.} \cdot \text{V} \cdot \text{N})}{\text{P}} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

P.M. = peso molecular KOH

V = volumen titulado de KOH

N = normalidad de KOH

P = peso del aceite

3. Índice de peróxido: el procedimiento se basó en la norma NTC 236. Se calentó el aceite en una plancha de calentamiento a 60 °C hasta lograr homogenización. Por otro lado, se pesó aproximadamente 5 gr de aceite en un Erlenmeyer de 250 ml. Después se disolvió completamente la muestra adicionando 50 ml de una solución ácido acético : cloroformo 3:2 V/V. Seguido a esto, se adicionaron 0.5 ml de KI saturado agitando por espacio de 1 minuto y se detuvo la reacción adicionando 30 ml de agua destilada. Luego se

adicionó 1 ml de la solución indicadora de almidón. Se tituló con tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) 0.01 N hasta que el color negro de la muestra desapareció y dio lugar al amarillo inicial. Este mismo procedimiento se realizó con un blanco. Esta medición se realizó por triplicado y su resultado se expresa en mmol O_2/kg muestra a partir de la ecuación 3.

$$\text{Índice de peróxidos} = \text{I.P.} = \frac{(\text{S-B}) \cdot \text{N} \cdot 1000}{\text{P}} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

S = volumen titulado de tiosulfato de sodio en la muestra

B = volumen titulado de tiosulfato de sodio en el blanco

N = normalidad de tiosulfato de sodio

P = peso del aceite

4. Índice de yodo: siguiendo los parámetros señalados por la AOAC 920.159, a un balón de 500 ml se adicionaron 20 ml de tetracloruro de carbono (CCl_4). Posteriormente, se adicionaron 25 ml del reactivo de Wijs. Luego se tapó el matraz y se mantuvo en un sitio oscuro por 1 hora. Terminado el tiempo de reacción, se adicionaron 20 ml de yoduro de potasio (KI) y 100 ml de agua. Finalmente, se tituló con una solución normalizada de tiosulfato de sodio 0.1 N hasta obtener una coloración amarilla, que indica la desaparición del yoduro producido. Se adicionaron unas gotas de la solución de almidón al 15 % P/V y se continuó la titulación hasta la desaparición del color azul después de una agitación vigorosa. El procedimiento se repitió por triplicado y el resultado se expresó en gramos de yodo/100 g de muestra mediante la ecuación 4.

$$\text{Índice de yodo} = \text{I.Y.} = \frac{(\text{S-B}) \cdot \text{N} \cdot \text{meq I}}{\text{P}} \quad (\text{Ec. 4})$$

5. Porcentaje de humedad: Basados en la norma NTC 287. Se pesó el aceite en un vaso precipitado y se secó en un horno de secado universal marca Memmert hasta alcanzar una masa constante. Finalmente se dejó enfriar el frasco y se pesó. La determinación se realizó por diferencia de pesos mediante la ecuación 5.

$$\% \text{Humedad} = \frac{\text{MH} - \text{MS}}{\text{MH} - \text{M0}} \cdot 100 \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

MH = masa del recipiente con aceite antes de secar

MS = masa del recipiente con aceite después de secar

M0 = masa del recipiente vacío

Diseño experimental de la reacción de esterificación

Con el fin de evaluar las condiciones en la esterificación del aceite de corozo, se realizó un diseño experimental variando la concentración de catalizador (H_2SO_4) y la relación molar metanol : aceite. La evaluación se realizó mediante el método de diseño central compuesto usando la metodología de superficie de respuesta en el software Statgraphics 19®, variando la concentración del catalizador entre 0.95 y 1.2 % P/V, y la relación molar metanol : aceite entre 6.0 y 7.2, y se analizó el efecto de las variables sobre el rendimiento de la reacción y el índice de acidez del producto obtenido. La selección de estos valores se basó en estudios previos realizados en la reacción de esterificación con sebo bovino como materia prima (Camargo, 2022).

Reacción de esterificación

Para la refinación del aceite se llevó a cabo la reacción de esterificación del aceite extraído utilizando ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) como catalizador ácido y metanol (CH_3OH). Para el caso del presente estudio se evaluaron concentraciones de 0.95, 1.0, 1.1 y 1.2 % P/V, mientras que las condiciones de la relación molar metanol : aceite fueron 5.7, 6.0, 6.5, 7.0 y 7.2. La esterificación se llevó a cabo de la siguiente manera:

Realizando un montaje de calentamiento en reflujo, se adicionó a un matraz de 250 ml una porción del aceite extraído y se calentó a una temperatura de 60 °C. Mientras el aceite llegó a esta temperatura, se preparó una mezcla de metanol y ácido sulfúrico en las cantidades correspondientes en cada experimento y se calentó a una temperatura entre 40 y 50 °C. Cuando el aceite llegó a la temperatura indicada se inició la agitación en la plancha de calentamiento y se adicionó la mezcla catalizador-metanol para iniciar el reflujo. Esta reacción se llevó a cabo durante 2 horas. Al finalizar la reacción, el producto obtenido se transfirió a un embudo de decantación para separar las fases durante 24 horas. Inmediatamente después, se retiró la fase inferior (glicerina), y el aceite refinado (fase superior) se transfirió a un recipiente y se llevó a un horno de secado a 60 °C durante 2 horas. Finalmente, este aceite se pesó para determinar el rendimiento de la reacción. El valor final del índice de acidez se determinó utilizando la misma metodología que para el aceite crudo.

Resultados

Extracción del aceite de corozo

Mediante la ecuación 6 se calculó el rendimiento de extracción del aceite de *Attalea cohune*, el cual fue del 43.07 %. Para el caso del aceite de palma,

el rendimiento de extracción utilizando el mismo método fue de 37.19 % (Tan *et al.*, 2009), el cual es un valor inferior en comparación al obtenido en el presente estudio. Además de esto, al comparar con los rendimientos de extracción por método Soxhlet para el aceite de palma, se reporta un rendimiento de 12.64 %, inferior al obtenido por método mecánico en el presente estudio (Nuchdang *et al.*, 2022)the extraction of oil and bioactive compounds from palm kernel cake (PKC).

$$\% \text{Extracción} = \frac{m_{\text{inicial}} - m_{\text{final}}}{m_{\text{inicial}}} * 100\% \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

m_{inicial} : masa de material prima

m_{final} : masa del aceite extraído

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos para el aceite extraído se reportan en la Tabla 3.

Reacción de esterificación

El estudio estadístico del diseño experimental arrojó como resultado un total de 10 experimentos con variados valores de la concentración del catalizador (H_2SO_4) y la relación molar metanol : aceite tal como se menciona en la metodología. Los resultados de los productos obtenidos se registran en la Tabla 4 y la comparación entre el aceite crudo y el esterificado se muestra en la Figura 4.

A partir del estudio estadístico se obtuvieron las gráficas de efectos principales para el rendimiento y el índice de acidez (las cuales se muestran en las Figura 5 y 6 respectivamente), y las gráficas de superficie de respuesta (que se muestran en las Figuras 7 y 8). Ninguno de los factores del estudio presenta efectos principales significativos ($p < 0.05$).

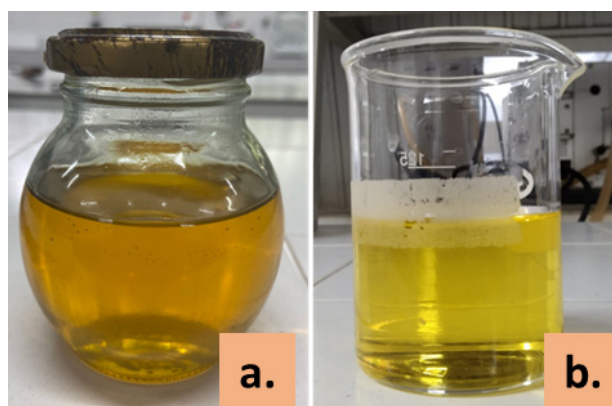
Discusión de resultados

Extracción del aceite de corozo

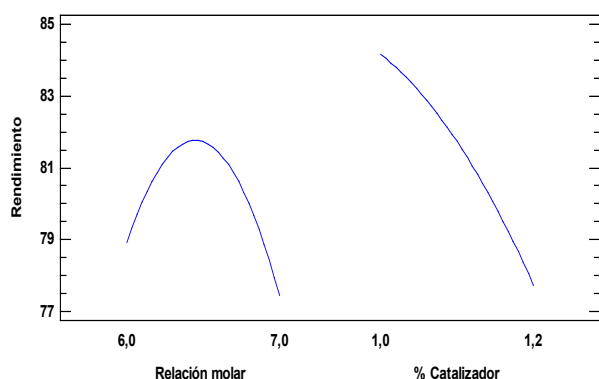
Como se puede observar en la Tabla 3, algunos parámetros fisicoquímicos del aceite, como la densidad, la humedad y el índice de refracción están dentro del rango comparado con el aceite de palma. Sin embargo, en el caso del índice de acidez, el valor del aceite de corozo es mayor que el reportado como referencia; este valor puede ser causado por el método de extracción o por el estado de madurez del fruto, según lo reportado en estudios previos con el fruto de *Attalea guayacule* (Rejón, 2012). La importancia de este resultado está en que un valor

Tabla 3. Comparación de los parámetros fisicoquímicos del aceite extraído de corozo frente al de aceite de palma

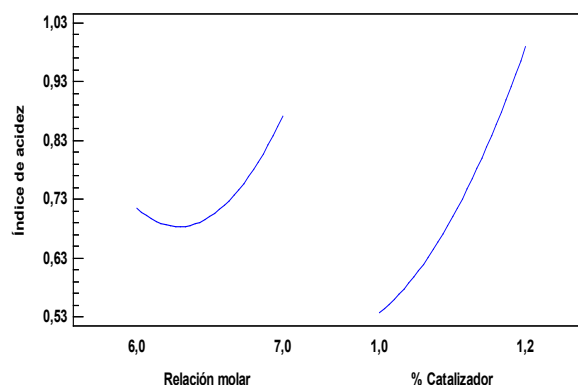
Parámetro	<i>Attalea cohune</i>	<i>Elaeis guineensis</i>
Densidad (g/cm ³)	0.8987 ± 0.0006	0.869 - 0.910 (ICONTEC, 2021)
Índice de acidez (mg KOH/g muestra)	8.552 ± 0.0015	<2 (Camargo, 2022)
Índice de peróxido (mmol O ₂ /Kg muestra)	2.794 ± 0.0010	9.3 - 12.6 (Araújo et al., 2019)
Índice de yodo (g I ₂ /100g muestra)	16.981 ± 0.0056	58-75 (ICONTEC, 2021)
% Humedad	0.137 ± 0.0058	Máximo 0,5 (ICONTEC, 2021)
Índice de refracción	1.4537 ± 0.0008	1,459 - 1,462 (ICONTEC, 2021)

**Figura 4.** Comparación entre el aceite crudo (a) y esterificado (b) de *Attalea cohune*.

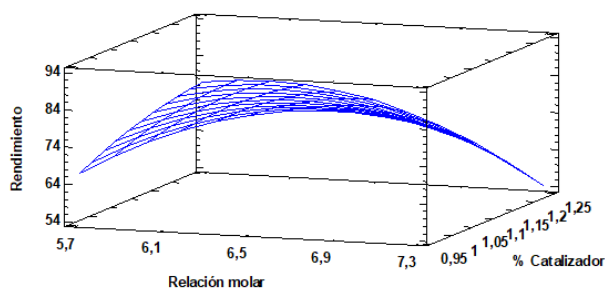
Gráfica de Efectos Principales para Rendimiento

**Figura 5.** Gráfica de efectos principales para el rendimiento de obtención del aceite esterificado.

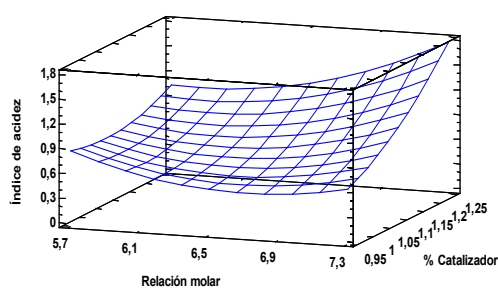
Gráfica de Efectos Principales para índice de acidez

**Figura 6.** Efectos principales para el índice de acidez del aceite esterificado.

Superficie de Respuesta Estimada

**Figura 7.** Gráfica de superficie de respuesta para el rendimiento del aceite esterificado.

Superficie de Respuesta Estimada

**Figura 8.** Gráfica de superficie de respuesta para el índice de acidez del aceite esterificado.

alto promueve la rancidez oxidativa del aceite debido a la alta concentración de ácidos grasos libres (Ferreira et al., 2021), lo cual confirma la necesidad de realizar un tratamiento de esterificación ácida con el fin de reducir este valor. Otros valores que se relacionan con la oxidación del aceite son el índice

de peróxido, debido a que un valor alto promueve la formación de alcoholes y aldehídos contaminantes en el aceite (Zhang et al., 2021), y el índice de yodo, que representa las insaturaciones del aceite y cuyo valor alto promueve la formación de hidroperóxidos que contaminan la muestra (Ruswanto et al., 2021).

Reacción de esterificación

A partir de los resultados obtenidos en la Tabla 4, se puede observar que los rendimientos de reacción estuvieron en un rango entre 73.58 % y 85.06 %, además de esto, los valores del índice de acidez estuvieron entre 0.48 y 1.54 mg KOH/gr muestra, lo que revela un menor valor en comparación con el aceite extraído antes de la esterificación (8.55 mg KOH/gr muestra). Las mejores condiciones en la reacción de esterificación del aceite de corozo (*Attalea cohune*) pertenecen a aquellas utilizadas en el experimento 4 con una concentración de H_2SO_4 de 0.95 %P/V y una relación molar metanol : aceite de 6.5:1, lo que muestra un mayor rendimiento de reacción (85.06 %) y un menor valor de índice de acidez (0.48 mg KOH/gr muestra), lo cual mejora su calidad y evita que se produzca la rancidez oxidativa del aceite.

Al comparar los resultados obtenidos en la Figura 4, se puede observar un cambio en la coloración del aceite esterificado; este cambio puede interpretarse como una disminución de la rancidez oxidativa del aceite, lo cual se confirma con los valores del índice de acidez en los productos obtenidos (Tabla 4). Por lo tanto, es posible también una disminución en los valores del índice de yodo y peróxido (Chavoshizadeh *et al.*, 2020).

A partir de la Figura 5 se puede notar que la relación molar y la concentración del catalizador afectan de forma diferente al rendimiento de la reacción de esterificación. Inicialmente el rendimiento aumenta directamente proporcional a la relación molar hasta un máximo cercano a 6.5, el cual es reportado en la Tabla 4, y luego tiende a disminuir. Dicho comportamiento se puede interpretar como un aumento en la transformación de los ácidos grasos libres en metil ésteres al aumentar la cantidad de alcohol, como se ha reportado para otros tipos de aceites (Ofoefule *et al.*, 2019) catalyst concentration, temperature and reaction time. Sin embargo, al seguir

aumentando la cantidad de metanol, puede haber una mayor cantidad de glicerina, lo cual disminuye el rendimiento de la reacción. Por otro lado, se puede observar que, al aumentar la cantidad de ácido sulfúrico, el rendimiento en la obtención de metil ésteres disminuye. En este caso, en estudios previos se ha reportado que el catalizador ácido actúa a concentraciones bajas, ya que al disolverse en el medio de reacción se dificulta más el proceso de eliminación para purificar los metil ésteres producidos (Khan *et al.*, 2021). A partir de las diferentes condiciones evaluadas se puede mencionar que los valores óptimos para un alto rendimiento en la reacción de esterificación son una relación molar metanol : aceite de 6.5:1 y una concentración de catalizador de 0.96 % P/V.

Finalmente, se puede observar en la Figura 6 que el índice de acidez se afecta de forma inversa al rendimiento de la reacción; inicialmente, el índice de acidez disminuye al aumentar la relación molar, sin embargo, después de un valor mínimo empieza a incrementarse. Esto puede deberse a que el metanol promueve la formación de metil ésteres hasta un punto de inactivación, ya que se pierde el equilibrio en la reacción al aumentar su concentración, lo cual promueve la reacción inversa y aumenta la concentración de ácidos grasos libres según el principio de Le Chatelier (Khan *et al.*, 2021). Al evaluar la concentración del catalizador se puede observar una tendencia directamente proporcional con el índice de acidez, debido a la regeneración del catalizador durante la reacción al protonarse en el medio acuoso y debido a la solubilidad de este catalizador en el medio de reacción. Dicho lo anterior, se puede deducir que las mejores condiciones de esterificación para el índice de acidez son las mismas condiciones que para el rendimiento (relación molar metanol : aceite = 6.5:1 y concentración de catalizador= 0.96 % P/V), lo que muestra una correlación entre las condiciones evaluadas.

Por otro lado, como futuras investigaciones se pueden evaluar los parámetros de índice de peróxidos y yodo con el fin de confirmar los efectos de la esterificación en la oxidación del aceite. Además de esto, se puede continuar con la reacción de transesterificación para evaluar el potencial uso del aceite de *Attalea cohune* como fuente de biodiesel y comparar las características fisicoquímicas del aceite al extraerlo por método Soxhlet.

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que el proceso de esterificación es importante en la refinación del aceite extraído del corozo (*Attalea cohune*). Al comparar los valores del índice de acidez entre el aceite crudo y el refinado mediante la esterificación, se observa una disminución de 8.55 mg KOH/g muestra a 0.48 mg KOH/g muestra,

Tabla 4. Resultados de la reacción de esterificación del aceite de corozo

Exp.	Concentración H_2SO_4 (% P/V)	Relación metanol : aceite	Rendimiento	Índice de acidez
1	1.1	7.20	81.09	0.68
2	1.1	5.79	73.58	0.95
3	1.2	7.0	61.42	1.54
4	0.95	6.5	85.06	0.48
5	1.0	6.0	79.37	0.52
6	1.0	7.0	79.76	0.82
7	1.2	6.0	78.27	0.83
8	1.1	6.5	80.89	0.56
9	1.24	6.5	80.67	1.03
10	1.1	6.5	82.56	0.84

lo cual confirma la transformación de los ácidos grasos libres en metil ésteres. Finalmente, mediante la evaluación las condiciones de relación molar y concentración de catalizador, se escogieron las condiciones de relación molar metanol : aceite de 6.5:1 y concentración de catalizador de 0.96 % como aquellas que corresponden al mayor rendimiento (85.06 %) y el menor índice de acidez (0.48 mg KOH/g muestra), lo que concuerda con las condiciones óptimas en el diseño experimental. Estos resultados representan una mejor calidad del aceite y confirma el potencial uso de esta materia prima como fuente de biodiesel.

Referencias

- Araújo, K.; Mercier, S.; Devilles, L.; Barbosa, C. y Oliveira, M. (2019). A preliminary study of the physico-chemical properties and fatty acid profile of five palm oil genotypes cultivated in Northeast of Brazil. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 4, 251-256. <https://doi.org/10.24221/jeap.4.4.2019.2632.251-256>
- Calderón, E.; Galeano, G. y García, N. (2005). *Libro rojo de plantas en Colombia: palmas, frailejones y zamias*. Instituto Alexander Von Humboldt - Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia; Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, vol 2. https://www.researchgate.net/publication/279204797_Libro_Rojo_de_Plantas_de_Colombia_Volumen_2_Palmas_Frailejones_y_Zamias
- Camargo, C. A. (2022). *Obtención de una base biolubrificante a partir de aceites transesterificados de las grasas animales (sebos) provenientes de la industria bovina*. [Tesis de maestría]. Universidad Industrial de Santander.
- Chavoshizadeh, S.; Pirsá, S. y Mohtarami, F. (2020). Sesame oil oxidation control by active and smart packaging system using wheat gluten/chlorophyll film to increase shelf life and detecting expiration date. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 122(3), 1-12. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201900385>
- Encinar, J. M.; Nogales, S. y González, J. F. (2020). Biodiesel and biolubricant production from different vegetable oils through transesterification. *Engineering Reports*, 2(12), 1-10. <https://doi.org/10.1002/eng2.12190>
- Eshleman, S. y Beach, T. (2020). Soil fertility of cohune palm (*Attalea cohune*) dominant forests compared to non-cohune forests in northwestern Belize. *Plant and Soil*, 452(1), 295-311. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04575-4>
- Ferreira, M. J. A.; Mota, M. F. S.; Mariano, R. G. B. y Freitas, S. P. (2021). Evaluation of liquid-liquid extraction to reducing the acidity index of the tucuma (*Astrocaryum vulgare* Mart.) pulp oil. *Separation and Purification Technology*, 257, 117894. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117894>
- Hsiao, M. C.; Liao, P. H.; Lan, N. V. y Hou, S. S. (2021). Enhancement of biodiesel production from high-acid-value waste cooking oil via a microwave reactor using a homogeneous alkaline catalyst. *Energies*, 14(2), 437. <https://doi.org/10.3390/en14020437>
- ICONTEC. (2021). NTC 5895:2021: *aceite crudo de palma con mayor contenido de ácido oleico*. Requisitos. <https://tienda.icontec.org/gp-aceite-crudo-de-palma-con-mayor-contenido-de-acido-oleico-requisitos-ntc5895-2021.html>
- Khan, Z.; Javed, F.; Shamair, Z.; Hafeez, A.; Fazal, T.; Aslam, A.; Zimmerman, W. B. y Rehman, F. (2021). Current developments in esterification reaction: A review on process and parameters. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 103, 80-101. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.07.018>
- Krist, S. (2020). Cohune oil. En *Vegetable fats and oils* (pp. 261-264). Cham: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-30314-3>
- Nuchdang, S.; Phruetthinan, N.; Paleeleam, P.; Domrongpokkaphan, V.; Chuetor, S.; Chirathivat, P. y Phalakornkule, C. (2022). Soxhlet, microwave-assisted, and room temperature liquid extraction of oil and bioactive compounds from palm kernel cake using isopropanol as solvent. *Industrial Crops and Products*, 176, 114379. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2021.114379>
- Oboh, F. (2023). Chapter 2. Palm Resources. En *Plant Resources. Their Description, composition and utilisation* (agosto, pp. 10-58). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18270.00323>
- foefule, A. U.; Esonye, C.; Onukwuli, O. D.; Nwaeze, E. y Ume, C. S. (2019). Modeling and optimization of African pear seed oil esterification and transesterification using artificial neural network and response surface methodology comparative analysis. *Industrial Crops and Products*, 140, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111707>
- Punvichai, T.; Patisuwan, S.; Khamon, P.; Peaklin, S. y Pianroj, Y. (2022). Factors affecting the quality of biodiesel from palm fatty acid distillate at palm oil refining plant. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 12(6), 8144-8151. <https://doi.org/10.33263/BRIAC126.81448151>
- Rejón, N. G. (2012). *Estudio del potencial del corozo [Attalea guacuyule (Liebmann. Ex Mart.) S. Zona] como materia prima para la producción de biodiesel*. [Tesis de maestría]. Universidad de Yucatán. https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/677/1/PCER_M_Tesis_2012_Nancy_Guadalupe_Eb_Rejon.pdf
- Rueda Jaimes, A. G.; Carreño Castaño, L. A.; Medina Caballero, L. F.; Alarcón Vesga, O. C.; Salazar Beleño, A. M. y Montesino Rincón, S. M. (2023). Influencia del catalizador en las propiedades fisicoquímicas de metil ésteres obtenidos a partir de aceite de *Chrysobalanus icaco*. *Ingeniería y Competitividad*, 25(3), 1-11. <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i3.12696>
- Ruswanto, A.; Ramelan, A. H.; Praseptianga, D. y Partha, I. B. B. (2021). The study of carotene content and iodine value of oil from different ripening levels and storage duration of palm fresh fruit bunches. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 709(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/709/1/012022>
- Sánchez-Hechavarría, J.; Lafargue-Pérez, F. y Pino-Tarrago, J. C. (2023). Propiedades fisicoquímicas y tribológicas del aceite de *Jatropha curcas* L. epoxidado. *Revista Cubana de Ciencias Químicas*, 30(1), 204-212. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852023000100204&lng=es&tng=es
- Takase, M. y Essandoh, P. K. (2021). Two-step biodiesel production using high free fatty acid containing pig fat. *International Journal of Green Energy*, 18(4), 381-389. <https://doi.org/10.1080/15435075.2020.1865364>
- Tan, C. H.; Ghazali, H. M.; Kuntom, A.; Tan, C. P. y Ariffin, A. A. (2009). Extraction and physicochemical properties of low free fatty acid crude palm oil. *Food Chemistry*, 113(2), 645-650. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.07.052>
- Zhang, N.; Li, Y.; Wen, S.; Sun, Y.; Chen, J.; Gao, Y.; Sagymbek, A. y Yu, X. (2021). Analytical methods for determining the peroxide value of edible oils: A mini-review. *Food Chemistry*, 358, 129834. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129834>