

Análisis fisicoquímico y transesterificación de algunos aceites de plantas amazónicas para la síntesis de biodiesel

Physicochemical analysis of some amazonian plant oils: implications for biodiesel synthesis

Anny A. Espitia-Cubillos¹   Miguel Á. Sánchez-Moyano¹ 

¹ Magíster en ingeniería. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.

² Magister en Docencia de la Química, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia

Resumen

Introducción: La composición y propiedades de cada materia prima, es relevante para el proceso de transesterificación y producción de biodiesel de alta calidad.

Materiales y métodos: Se realiza un análisis teórico comparativo de cuatro posibles materias primas para la producción de biodiesel a escala industrial: Attalea Maripa, Andiroba, Sejé y Sacha Inchi, para determinar la más adecuada según su disponibilidad comercial y análisis fisicoquímico de los aceites extraídos de cada una. Luego se hace la transesterificación de los aceites disponibles comercialmente para comparar su contenido de metil ésteres,

Resultados: En tres de los aceites se identificaron, mediante cromatografía, los ácidos grasos que cuentan con mayor predominancia, que pueden ser: linolénico, linoleico, oleico, palmítico, se excluyó el aceite de Attalea Maripa dada su falta de disponibilidad comercial. Tras la experimentación solo fue posible obtener biodiesel a partir de los aceites de Sejé y Sacha Inchi, en el primer caso existe la necesidad filtrar el biodiesel para su limpieza y refinado y la reacción presenta un rendimiento superior al 90%, mientras que en el segundo caso el biodiesel no requiere procesamiento adicional, pero tiene bajo rendimiento que corresponde al 25%.

Conclusiones: Se define el biodiesel obtenido a partir del aceite de Sejé puede ser una alternativa viable desde el punto de vista técnico, con adecuado rendimiento y disponibilidad en el mercado. Estos hallazgos contribuyen al avance en la diversificación de materias primas para el biodiesel y promueven el desarrollo de fuentes sostenibles.

Palabras clave: Aceite vegetal, análisis fisicoquímico, biodiesel, plantas amazónicas, transesterificación.

Abstract

Introduction: The composition and properties of each raw material are relevant to the transesterification process and the production of high-quality biodiesel.

Materials and methods: A comparative theoretical analysis of four possible raw materials for industrial-scale biodiesel production is carried out: Attalea Maripa, Andiroba, Sejé, and Sacha Inchi, to determine the most suitable one based on its commercial availability and physicochemical analysis of the oils extracted from each. The commercially available oils are then transesterified to compare their methyl ester content.

Results: Chromatography was used to identify the most predominant fatty acids in three of the oils, which can be: linolenic, linoleic, oleic, and palmitic. Attalea Maripa oil was excluded due to its lack of commercial availability. After experimentation, it was only possible to obtain biodiesel from Sejé and Sacha Inchi oils. In the first case, the biodiesel needs to be filtered for cleaning and refining, and the reaction has a yield of over 90%, while in the second case, the biodiesel does not require additional processing but has a low yield of 25%.

Conclusions: Biodiesel obtained from Sejé oil is defined as a viable alternative from a technical standpoint, with adequate performance and market availability. These findings contribute to the advancement of raw material diversification for biodiesel and promote the development of sustainable sources.

Keywords: Vegetable oil, physicochemical analysis, biodiesel, Amazonian plants, transesterification.

¿Cómo citar?

Espitia-Cubillos AA, Sánchez-Moyano MA. Análisis fisicoquímico y transesterificación de algunos aceites de plantas amazónicas para la síntesis de biodiesel. Ingeniería y Competitividad, 2025, 27(3) e-2020715195.

<https://doi.org/10.25100/iyv.v27i3.15195>

Recibido: 28/08/25

Revisado: 25/9/25

Aceptado: 6/11/25

Online: 5/12/25

Correspondencia

anny.espitia@unimilitar.edu.co



¿Por qué se realizó este estudio?

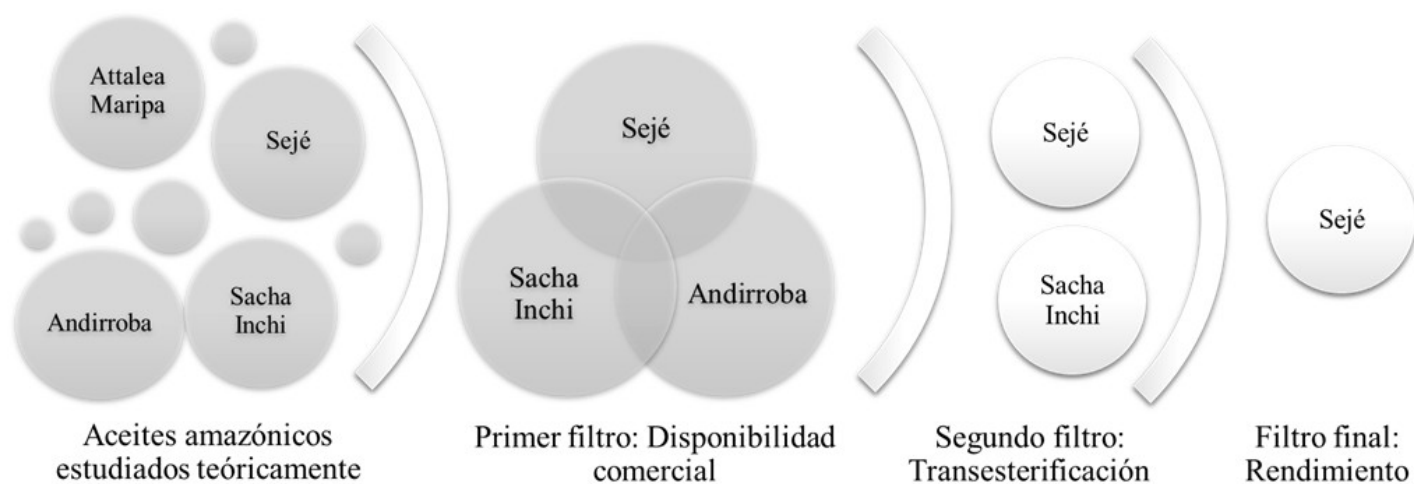
El estudio se realizó para encontrar fuentes alternativas y sostenibles para la producción de biodiésel en Colombia, dado el creciente consumo de combustibles fósiles y la contaminación ambiental. Actualmente, la principal materia prima utilizada en el país es el aceite de palma, cuyo uso intensivo ha generado problemas ambientales como el monocultivo y la pérdida de biodiversidad. Por lo tanto, la investigación buscó evaluar los aceites amazónicos de andiroba, sejé, attalea maripa y sacha inchi para determinar su idoneidad como materia prima para la síntesis de biodiésel, mediante caracterización fisicoquímica, análisis cromatográfico y pruebas experimentales de transesterificación.

¿Cuáles fueron los hallazgos más relevantes?

Los resultados del estudio demostraron que el aceite de sejé es la materia prima más adecuada para la producción de biodiésel, alcanzando un rendimiento del 90 % y presentando una composición rica en ácidos grasos, principalmente ácido oleico, lo que promueve la estabilidad y la calidad del biocombustible. El aceite de sacha inchi también produjo biodiésel, aunque con un bajo rendimiento del 25 % debido a su alto contenido de insaturadas y precipitados formados durante el lavado. El aceite de andiroba, por otro lado, no produjo biodiésel debido a la formación de jabones e impurezas que inhibieron la reacción. El aceite de attalea maripa, si bien teóricamente apto, no pudo analizarse experimentalmente debido a su limitada disponibilidad comercial.

¿Qué aportan estos hallazgos?

Los hallazgos de este estudio ofrecen una alternativa prometedora para diversificar las materias primas utilizadas en la producción de biodiésel en Colombia, destacando el aceite de sejé como una fuente sostenible y eficiente. Estos resultados contribuyen al conocimiento científico de los biocombustibles, promueven el uso de especies nativas de la Amazonía y fomentan el desarrollo de una bioeconomía sostenible que reduzca la dependencia de los combustibles fósiles. Además, el trabajo proporciona información valiosa para la industria energética nacional, fomentando el uso de biocombustibles que reducen la contaminación y facilitan la transición a fuentes de energía renovables, cumpliendo con la normativa vigente.



Introducción

En respuesta al aumento del consumo de combustibles fósiles y la contaminación ambiental, la síntesis de biodiésel ha experimentado un crecimiento significativo (1). Esta iniciativa enmarca la búsqueda de fuentes de energía alternativas y renovables para promover el desarrollo sostenible.

En Colombia, la principal fuente de energía se basa en los combustibles fósiles, lo que ha provocado la emisión de gases tóxicos (CO_2 , CO , SO_2 y NO_x) derivados de combustibles obtenidos de hidrocarburos (2). La mitigación de estos contaminantes, aunque no es una tarea sencilla, se vuelve viable mediante la síntesis de biodiésel. La industria del biodiésel en Colombia tiene un gran potencial en el campo de los biocombustibles (3).

Según ASTM D-6751 (Sociedad Americana de Ensayos y Materiales), los biocombustibles se derivan de la biomasa. Además, el biodiésel se define como un combustible compuesto por ésteres monoalquilados de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites vegetales o grasas animales (4). En Colombia, el uso de biocombustibles se ha implementado en las principales ciudades (5), y la producción media de biodiésel en 2022 fue de 685.000 toneladas, un aumento del 40% respecto al año anterior (6).

Actualmente, la materia prima principal para la producción de biodiésel es el aceite de palma, concretamente el híbrido OxG, que es un cruce entre *Elaeis oleífera* y *Elaeis guineensis* (7). Sin embargo, su uso excesivo ha generado problemas de monocultivo, lo que reduce la resistencia de los cultivos frente a las plagas y aumenta su riesgo de daños e inestabilidad alimentaria (8). Las normativas colombianas (Resolución 40111 de 2021) exigen que todo diésel contenga al menos un 10% de biodiésel para su uso en motores de combustión. A pesar de las ventajas, la implementación de esta regulación ha enfrentado dificultades, siendo el precio la barrera más significativa (9).

Para una producción eficiente de biodiésel, es esencial un estudio exhaustivo de la selección de aceite, ya que no todos los aceites son adecuados como materia prima. Este proceso implica evaluar la composición y concentración de ésteres metilíticos de ácidos grasos (FAMES) mediante análisis físico-químicos y caracterización del material de entrada. En Colombia, las materias primas predominantes para la síntesis de biodiésel incluyen palma, coco, aceite de ricino, aguacate, jatrofa, colza, cacahuete, soja y girasol (10).

Los aceites derivados de semillas oleaginosas deben cumplir ciertas características que indiquen su idoneidad como materia prima. Parámetros importantes incluyen el contenido de aceite en el grano y el rendimiento por hectárea. Por ejemplo, el girasol, el cacahuete, la colza y la jatrofa tienen un alto contenido de aceite en el grano, oscilando entre el 40% y el 60% (11). Además, factores como los costes de producción por hectárea, la disponibilidad en el mercado y el porcentaje de ácidos grasos son cruciales a la hora de seleccionar materia prima adecuada.

El ciclo de producción de biodiésel comienza con la extracción de aceite de material vegetal, utilizando racimos esterilizados de fruta fresca, seguido de la separación de los frutos. Luego, los frutos pasan por un proceso de digestión para extraer su aceite, que se clarifica y se reduce la humedad (12). El segundo proceso se centra en el refinado del aceite obtenido, que incluye filtración, blanqueo y desodorización. Finalmente, el aceite refinado está listo para transformarse en biodiésel mediante transesterificación.

Este estudio comparativo amplía el conocimiento científico sobre biocombustibles, promoviendo la diversificación de las fuentes de materias primas y el desarrollo de combustibles renovables sostenibles. También proporciona información valiosa para la industria colombiana del biodiésel, impulsando su crecimiento y reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles para disminuir la contaminación ambiental. Se analizan las características fisicoquímicas de los aceites amazónicos *Attalea Maripa*, *Andiroba*, *Sejé* y *Sacha Inchi*, junto con su disponibilidad en el mercado, lo que permite su transesterificación para determinar los más adecuados para la síntesis de biodiésel.

Materiales y métodos

La metodología aplicada considera cinco etapas: primero, la caracterización teórica de las materias primas; segundo, su disponibilidad comercial en Colombia; en la tercera fase, la composición de ácidos grasos de los aceites disponibles en el mercado se determina mediante el método estandarizado por la EN 14103 utilizando un cromatógrafo de gases 6890N con un detector selectivo de masa 5973 de Agilent Technologies (R). Al pasar las muestras sobre una columna de polietileno glicol de 30 metros de longitud, diámetro interno de 0,32 μm y tamaño de película de 0,25 μm , el programa de temperatura utilizado permitió la separación efectiva que determinaba las FAME presentes y la mayoría en las muestras; en cuarto lugar, para obtener biodiésel, se realiza la transesterificación de aceites sin refinar *Sejé*, *Sacha Inchi* y *Andiroba* utilizando hidróxido de sodio reactivo de pureza al 96% como catalizador y metanol de grado analítico, lo que permite ver que se requiere una esterificación previa para reducir impurezas, además del proceso de refinado que incluye tres pasos: desempastado, neutralización y limpieza usando ácido fosfórico, agua destilada, centrifugación y temperatura, tras lo cual se obtiene biocombustible a partir de *Sacha inchi* y aceite *Seje*; para comparar finalmente su rendimiento y el contenido de FAME mediante cromatografía, lo que permite seleccionar el aceite más adecuado para la producción de biodiésel.

En la primera fase, se identifican en la literatura cuatro aceites amazónicos que teóricamente cumplen las características fundamentales para servir como materia prima para la transesterificación que permite la producción de biodiésel. La caracterización implica consultar y analizar diferentes parámetros, obtenidos mediante pruebas fisicoquímicas: a) Densidad relativa del aceite, siguiendo las especificaciones de la norma CODEX Stan 33-1981, que establece un rango de 0,910-0,916., b) Índice de refracción (RI) que se utiliza para controlar la pureza y la calidad, tanto a nivel de laboratorio como industrial; Este índice está relacionado con el grado medio de insaturación y también es útil para monitorizar el progreso de reacciones como la

hidrogenación e isomerización (13), c) número de ácidos estrechamente relacionado con la calidad de los aceites vegetales, el grado de refinado y los cambios durante el almacenamiento (14), y d) el número de yodo, que es una propiedad directamente relacionada con la insaturación, índice de refracción y densidad (15).

El diseño del experimento para obtener biodiésel a partir de aceites disponibles comercialmente se resume en la Tabla 1.

Tabla 1. Diseño experimental para obtener biodiésel

Tipo de aceite	Andiroba	Sancha Inchi	Sejé
Test 1	Transesterificación del petróleo crudo		
Refinado	Degoma con ácido fosfórico, agua, centrifugación y temperatura		
	Neutralización para eliminar sustancias saponificables		
	Lavado con agua y eliminación de humedad		
Refinado	Con resina de intercambio iónico		
Test 2	La transesterificación del aceite refinado con hidróxido de sodio, un reactivo analítico de alta pureza, como catalizador elevando la temperatura a 60°C y aumentando la velocidad de agitación.		
Determinación de métricas	Cálculo del rendimiento porcentual de biodiésel obtenido del petróleo		
	Determinación de las FAME mediante cromatografía		

Resultados

Características teóricas de las materias primas de los aceites

Andiroba, un árbol de la familia de la caoba, posee propiedades valiosas, incluyendo antipalúdicas, antifúngicas, antiinflamatorias y repelentes, y su alto contenido en aceites esenciales la hace popular en cosméticos (16). El aceite de Andiroba cumple con estándares de calidad aceptables y tiene una alta capacidad repelente contra los gorgullos (17). Triterpenos como el gedunin, así como lípidos, flavononas, flavonoides, triterpenos y cumarinas, se aíslan del aceite de andiroba (18). En (19) estudiaron sus características que se presentan en la Tabla 2.

Attalea maripa, una palmera del género Attalea, es una planta común en el Amazonas, con alrededor de 40 especies de la familia Aracaceae. Se encuentra en hábitats que van desde sabanas hasta bosques vírgenes. Su copa está formada por entre 10 y 22 hojas, con pecíolos de hasta 2 metros de longitud y hojas de hasta 10 metros. Produce frutos ovoides de 5 a 6 cm con un epicarpo fibroso y coriáceo de color naranja-amarillo y sabor ligeramente dulce, y un endocarpo

grueso y duro que contiene de una a tres semillas (20). La calidad del aceite esencial de *Attalea maripa* fue analizada por (21, 22). La proporción entre las absorbancias en 232 nm y 270 nm es mayor que 8, resultados que coinciden con los valores reportados para el aceite de oliva y el de almendra en las farmacopeas de referencia (21). Las características del aceite de *Attalea Maripa* sugieren su idoneidad para la síntesis de biodiésel, correlacionándose con otros aceites vírgenes.

La planta *Sacha Inchi* ha despertado interés debido a su alto contenido en ácidos grasos esenciales, especialmente ácido linolénico (omega-3) y ácido linoleico (omega-6), también ácido oleico (omega-9), reconocidos por sus beneficios para la salud, ya que contribuyen a mantener un equilibrio lipídico adecuado y están asociados con la reducción del riesgo de enfermedades cardiovasculares. Además, el *sacha inchi* se considera una planta cultivada de forma sostenible, ya que no requiere grandes cantidades de agua ni el uso de pesticidas y fertilizantes. Esto lo convierte en una opción prometedora para obtener aceites esenciales con aplicaciones diversas, incluida la producción de biodiésel. El análisis fisicoquímico realizado por (7), resumido en la Tabla 1, no solo permite determinar su idoneidad para la producción de biodiésel, sino que también puede revelar otros usos y aplicaciones potenciales, como en las industrias cosmética y alimentaria. Se observó que el contenido de agua del aceite supera el límite máximo permitido según la norma ASTM D6751:2002, lo que indica la necesidad de reprocesar para reducir este parámetro. Otro parámetro analizado es el índice de saponificación, que revela las insaturaciones presentes en los ácidos grasos del aceite. Esto indica la presencia de una mayor cantidad de ácidos grasos insaturados en los triglicéridos del aceite. El uso integral de esta planta podría contribuir a su valorización y promover prácticas de producción sostenibles.

Tabla 2. Características fisicoquímicas de las materias primas iniciales frente al aceite de palma colombiano

Aceite	Andiroba	Attalea	Sacha Inchi	Sejé	Palma
Índice de refracción	1,5	1,45 ± 0,002	1,48	1,46	1,4561
Densidad relativa	0,91	0,93 ± 0,011	0,92	0,9	0,9
Índice de saponificación	161,67	65,63 ± 2,83	185,2	193,55	189,3
Índice de acidez	1,84	2,47 ± 0,002	0,11	0,58	-
Índice de Peróxido	-	16,50 ± 0,98	-	3.7	-
Índice de yodo	48,41	18,29 ± 1,97	168,9	97,68	53
Solubilidad	Soluble en cloroformo, inmiscible en agua	Soluble en éter petrolífero, parcialmente soluble en etanol e inmiscible en agua.	Parcialmente soluble en agua.	Parcialmente soluble en agua y metanol.	Insoluble en agua, soluble en etanol, éter, cloroformo y disulfuro de carbono.

Características organolépticas	Líquido viscoso, transparente amarillo claro	Líquido viscoso, blanco translúcido cuando se solidifica	Líquido viscoso, amarillo pálido	Líquido viscoso, amarillo	Semisólido a temperatura ambiente, amarillo rojizo
% de insaturación	70,45	-	91.6	82	53
Espectro UV	-	0,2 a 270nm	365 millas náuticas	-	-
Relación de absorbancia	-	>8 a 232nm y 270nm	-	-	-

Nota: Autores de: Andiroba: (19); Attalea: (20, 21); Sacha Inchi: (7); Sejé: (24); Palma (25).

El sejé es una palmera que puede alcanzar entre 12 y 15 metros de altura, con un tallo sencillo de 15 a 25 cm de diámetro, sus hojas están dispuestas en espiral y producen frutos durante todo el año de color violeta o negro; se considera una fuente de proteínas, además de tener cantidades aceptables de lípidos y vitaminas. El contenido medio de aceite en Sejé es aproximadamente del 7,4%, siendo comparable en calidad con el aceite de oliva; para extraer el aceite es necesario utilizar el mesocarpo y el pericarpo del fruto (22). En estudios realizados por (23, 24) se han determinado características fisicoquímicas del aceite Seje. En el aceite Sejé predomina el ácido oleico. Las moléculas de ácido oleico están vinculadas en forma de trioleína en un 45% (22). El petróleo de Sejé muestra potencial como materia prima para la síntesis de biodiésel, que podría beneficiarse desde una perspectiva ecológica y energética.

El análisis comparativo permite examinar teóricamente las características de los aceites de las cuatro materias primas estudiadas. Observando las características presentadas en la Tabla 2 se pueden identificar algunas similitudes; en el caso del índice de refracción, el valor mínimo se encuentra en el aceite de Attalea (1,45) y el máximo en el aceite de andiroba (1,50), con valores cercanos al aceite de palma; las densidades relativas también son muy cercanas, con una media de 0,91, muy cerca de la densidad del aceite de palma, Los índices de acidez muestran valores comparables entre andiroba - Atalea y Sacha inchi - Sejé. Se observa una variación significativa en los índices de saponificación y yodo; el aceite de Attalea tiene el índice de saponificación más bajo y destaca el alto valor de Sacha Inchi en el índice de yodo, que triplica el del aceite de palma. El menor porcentaje de insaturación lo representa el aceite de palma. Estos resultados indican que, aunque los aceites presentan características similares en ciertos aspectos, existen diferencias en los valores de saponificación y yodo. Estas variaciones pueden ser relevantes al considerar su uso en la producción de biodiésel.

Disponibilidad comercial de aceites

Obtener los aceites de Andiroba, Sacha Inchi y Sejé fue factible. Sin embargo, la obtención de petróleo de Attalea Maripa se vio dificultada por su limitada disponibilidad comercial debido a la deforestación y el cambio climático. Esto afecta a la producción, impidiendo una caracterización exhaustiva y un análisis cromatográfico para evaluar su potencial.

Composición de ácidos grasos de los aceites

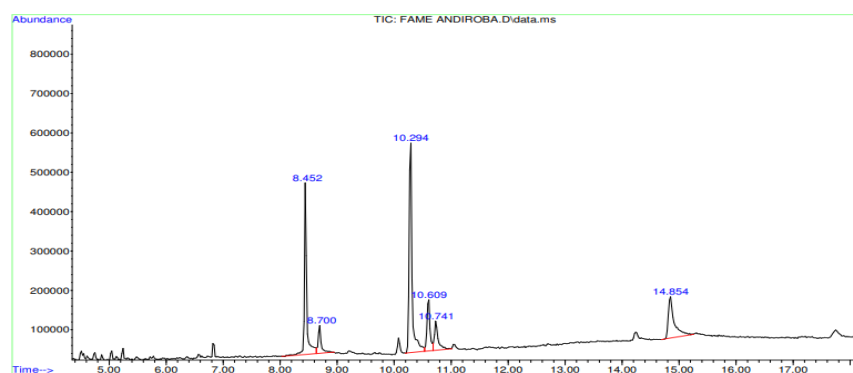
La composición de los FAME es crucial para la calidad del biodiésel: los ácidos grasos saturados ofrecen mayor estabilidad. La evaluación de ácidos grasos es crucial para determinar el uso de aceites obtenidos de diversas materias primas; La cromatografía de gases identifica ésteres de ácidos grasos, determinando su predominio y cantidad. El aceite debe tener un bajo contenido de ácidos grasos libres, ya que la contaminación por el catalizador puede producirse durante la catálisis (26). Por lo tanto, este parámetro debe controlarse cuidadosamente.

La cromatografía de gases, siguiendo la EN 14103, separa los ésteres según la longitud de su cadena y el número de enlaces dobles, indicando la pureza del biodiésel. El biodiésel de calidad debe tener al menos un 96,5% de ésteres metilígenos en peso y peso cuando es puro (27). Un bajo contenido de ésteres metílicos puede indicar reacciones desfavorables o la presencia de contaminantes como alcohol, glicéridos, glicerol, metales y otros componentes.

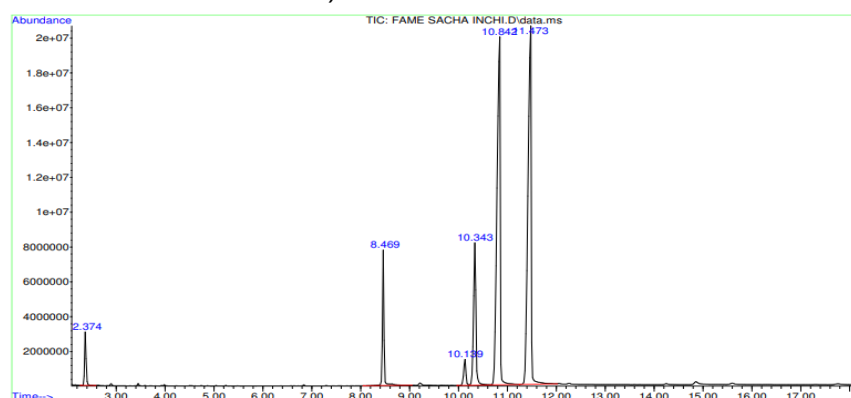
El ácido linoleico, esencial para la salud y la prevención de enfermedades, debe obtenerse de fuentes vegetales ya que los mamíferos no pueden sintetizarlo (28).

El ácido palmítico, un ácido graso saturado de 16 carbonos, es común en la dieta humana y contribuye a la estabilidad oxidativa del biodiésel, aunque puede afectar sus propiedades a bajas temperaturas (29).

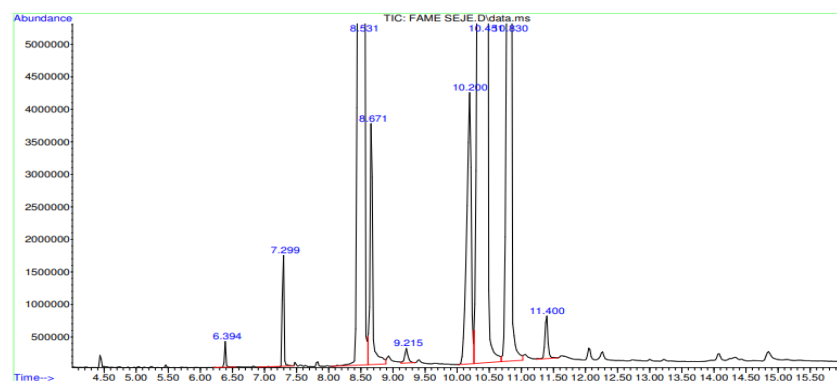
Se realizó análisis cromatográfico (Figura 1) de aceites andiroba, sachá inchi y sejé para identificar los FAME presentes. La figura 1a muestra el cromatograma del aceite de Andróba, que revela tres ácidos grasos principales: el ácido oleico es el más abundante, constituyendo el 45,62% de las FAME identificadas, seguido del ácido palmítico con un 12,14% y el ácido linoleico con un 11,52%. La Figura 1b presenta el análisis del aceite de Sachá Inchi, donde se pueden identificar 4 ácidos: la mayoría del ácido linónico con un valor del 58,17%, el ácido linoleico del 15,4%, y los ácidos palmítico y oleico con un 10,25%. Los ácidos presentes en el aceite y en el biodiésel muestran similitudes en los ácidos palmítico, oleico, esteárico y linoleico. Este hallazgo sugiere que el petróleo tiene potencial como materia prima para la producción de biodiésel, apoyando su viabilidad y promoviendo una opción sostenible en el sector energético. La Figura 1c presenta la cromatografía de gases del aceite de Sejé con 8 FAMEs: predominó el ácido oleico con un 72,15%, seguido de los ácidos palmítico (11,45%) y esteárico (6,80%); Se detectaron otros ácidos en proporciones más pequeñas que son consistentes entre sí. Sejé destaca como materia prima para el biodiésel debido a su abundante contenido en ácidos grasos, satisfaciendo la creciente demanda de fuentes de energía sostenibles. Esta composición facilita el proceso de transesterificación, que es crucial en la conversión a biodiésel.



a) Aceite de andiroba



b) Aceite de Sacha Inchi



c) Aceite de sejé

Figura 1. Cromatografías de análisis de FAME por GCMS

Proceso de transesterificación de aceites

Se determinaron condiciones equivalentes para realizar la reacción de transesterificación utilizando un catalizador homogéneo. La primera prueba se realizó sin limpiar el aceite. Bajo estas condiciones analíticas, ninguno de los aceites reaccionó; no se formaron ni glicerina ni biodiésel. Esto se puede atribuir a la presencia de humedad en el aceite y a la falta de refinado. Los aceites utilizados eran crudos, por lo que no es posible reaccionar directamente, y es necesario limpiarlos para eliminar humedad, impurezas, mucilago, proteínas y ácidos grasos libres. Si se añade hidróxido al crudo durante el proceso de transesterificación, se formará un jabón que inhibirá la reacción. Por lo tanto, este jabón se genera durante el refinado para eliminar estas impurezas. La Figura 2 muestra los aceites crudos sometidos a la reacción de transesterificación. De los tres, solo el aceite de Sacha Inchi es líquido; Los otros dos son sólidos a temperatura ambiente.

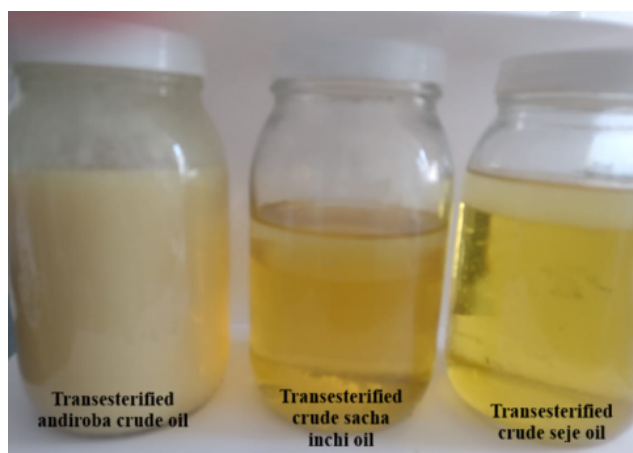


Figura 2. Resultados de transesterificación del crudo.

En la parte superior de la imagen de la Figura 2 se observa metanol, que no está presente en el caso del aceite de andiroba; por lo tanto, el catalizador se cambia por uno de alta pureza (hidróxido de sodio reactivo analítico) para comprobar su eficacia.

Para el refinado, los tres aceites se sometieron a un proceso de degomado para eliminar material soluble. Esto implicaba el uso de ácido fosfórico, agua destilada, centrifugación y calor. La mezcla se neutralizaba para eliminar sustancias saponificables, asegurando una alta pureza de triglicéridos y permitiendo que la reacción de transesterificación avanzara sin problemas. Finalmente, el aceite se lavó para eliminar la humedad, preparándolo para la síntesis de biodiésel.

La Figura 3 muestra el aceite de andiroba tras el proceso de refinado. La capa superior muestra aceite líquido a temperatura ambiente, la capa intermedia jabón y la capa inferior agua del lavado. Tras el refinamiento, la pérdida de aceite puede ser elevada. Por ello, para eliminar estos subproductos que dificultan la reacción, se llevó a cabo un proceso de saponificación utilizando una resina de intercambio iónico para reducir la pérdida. Durante la esterificación, tras dos horas, se forman una fase metanol y otra fase. Se eliminó el metanol y el aceite restante se transesterificó sin la formación de biodiésel. En este sentido, la esterificación con resina de intercambio iónico no mejora el proceso, y el aceite de andiroba no da resultados satisfactorios. No hay reacción, y por tanto no produce biodiésel, a partir del aceite tras el proceso de limpieza. Añadir una solución de hidróxido de sodio resulta en una saponificación completa, con la formación de grumos y emulsión.



Figura 3. Aceite de andiroba en el proceso de refinado

El aceite de Andiroba pasa por un proceso de refinado. Como se muestra en la Figura 3, la parte superior representa el aceite refinado, que es líquido a temperatura ambiente al final del proceso. La parte central es un jabón formado por la presencia de ácidos grasos libres, que inhiben la transesterificación. La parte inferior es el agua de la lavado. La pérdida de aceite puede ser significativa tras el refinado. Por ello, para eliminar estos subproductos que dificultan la reacción normal, se llevó a cabo un proceso de saponificación utilizando una resina de intercambio iónico para minimizar la pérdida de aceite. Durante la esterificación con la resina de intercambio iónico, tras dos horas se formó una fase metanol y otra fase. Se extrajo el metanol y este aceite se transesterificó, dando los mismos resultados pero sin la formación de biodiésel. En este sentido, la esterificación con resina de intercambio iónico no mejora el proceso; andiraba da resultados insatisfactorios, sin reacción y, por tanto, sin producción de biodiésel. En el caso del aceite de andiroba, se realiza un proceso de limpieza, se añade solución de hidróxido de sodio y se produce una saponificación completa, que resulta en la formación de grumos y una emulsión; por lo tanto, el refinamiento no tiene éxito.

El proceso de transesterificación se realiza con aceite de Sacha Inchi, cambiando el catalizador, elevando la temperatura a 60°C y aumentando la velocidad de agitación, lo que permitió que la reacción fuera eficaz para obtener biodiésel.

Se llevó a cabo la transesterificación del aceite Seje, replicando el proceso de transesterificación del aceite refinado de Sacha Inchi. Al final de la reacción, se obtuvo un biodiésel de color oscuro y la glicerina apareció opaca, lo que indicaba que el aceite debía ser degomado. También es posible producir el biodiésel y luego filtrarlo para su purificación y refinado. Se observó la separación de ésteres metílicos y glicerina, y la reacción obtuvo más del 90%, un valor altamente productivo en la síntesis de biodiésel. La coloración no afectó a la reacción, lo que indicaba que el porcentaje de ácidos grasos libres era bajo y, por tanto, no se lograba la saponificación. Estos resultados sugieren que es posible un proceso final de purificación para eliminar el color.

El biodiésel obtenido del aceite de Sacha Inchi es el resultado de una transesterificación exitosa, pero tiene un bajo rendimiento debido a la alta precipitación durante el lavado, resultando en un rendimiento de biodiésel de solo el 25%. La Figura 4 muestra el biodiésel producido a partir del aceite de Sacha Inchi en primer plano, con color amarillo, mientras que el biodiésel producido a partir del aceite Seje en el fondo tiene un color rojizo.



Figura 4. Biodiésel obtenido de los aceites Sacha Inchi (delantero) y Sejé (trasero)

El aceite de Sacha Inchi (Figura 5a) tiene un color amarillo dorado. Todo el proceso de transesterificación fue exitoso, pero los resultados muestran un rendimiento bajo. Durante el lavado, se produjo precipitación, lo que resultó en un rendimiento de biodiésel de solo el 25%. El aceite Sejé (Figura 5b) fue purificado. Para eliminar el color, debe procesarse con agentes blanqueadores; sin embargo, esto no afecta a las características del biodiésel Seje.



(a) Sacha Inchi oil product



(b) Sejé oil product

Figura 5. Biodiésel filtrado

Composición de ácidos grasos de los biocombustibles

La determinación de los FAME presentes en el biodiésel obtenido de los aceites Seje y Sacha Inchi se realizó mediante cromatografía de gases. Para la determinación, la muestra fue pretratada con hidróxido potásico metanol. Utilizando hexano, se observó la separación de dos fases, de las cuales se extrajo la fase orgánica para su análisis. Se ejecutó un cartucho en blanco, seguido de un estándar FAME. Posteriormente, se inyectaron las muestras de biodiésel de los aceites Seje y Sacha Inchi, con una tirada en blanco entre cada muestra.

El cromatograma (Figura 6a) muestra cuatro picos distintos, dos de los cuales (el primero y el tercero) corresponden al más abundante. Cada pico se integró utilizando un integrador ChemStation (Agilent) y, posteriormente, se extrajeron los espectros de masas de cada pico y se compararon con la biblioteca del NIST. Las figuras 6b, 6c y 6d presentan los espectros de masas de los ácidos grasos más representativos encontrados en la muestra de Seje. Se observaron tres ésteres metílicos de ácidos grasos, una reducción en comparación con los ocho identificados en el aceite virgen. Los más abundantes fueron ácido palmítico con una concentración del 7,35%, ácido oleico con un 50,14% y ácido mirístico con menos del 5%.

En el caso de Sacha Inchi, la Figura 7a muestra el cromatograma obtenido de la muestra de biodiésel. Esto muestra dos picos característicos y bien definidos, correspondientes a los ésteres metílicos de ácidos grasos más representativos. Cada pico se integraba mediante un integrador ChemStation (Agilent) y, posteriormente, se extraía el espectro de cada pico, comparando los valores de masa correspondientes con la biblioteca del NIST. Las figuras 7b, 7c y 7d presentan los espectros de masas de los ácidos más representativos encontrados en la muestra de biodiésel obtenida de Sacha Inchi. Para el biocombustible obtenido de Sacha Inchi, se observan tres ésteres metílicos de ácidos grasos, una reducción en comparación con los ácidos iniciales del aceite virgen. Sin embargo, el más representativo es el ácido linoleico, con una concentración del 45,32%. ácido oleico con una concentración del 38,14% y ácido palmítico con una concentración inferior al 7%.

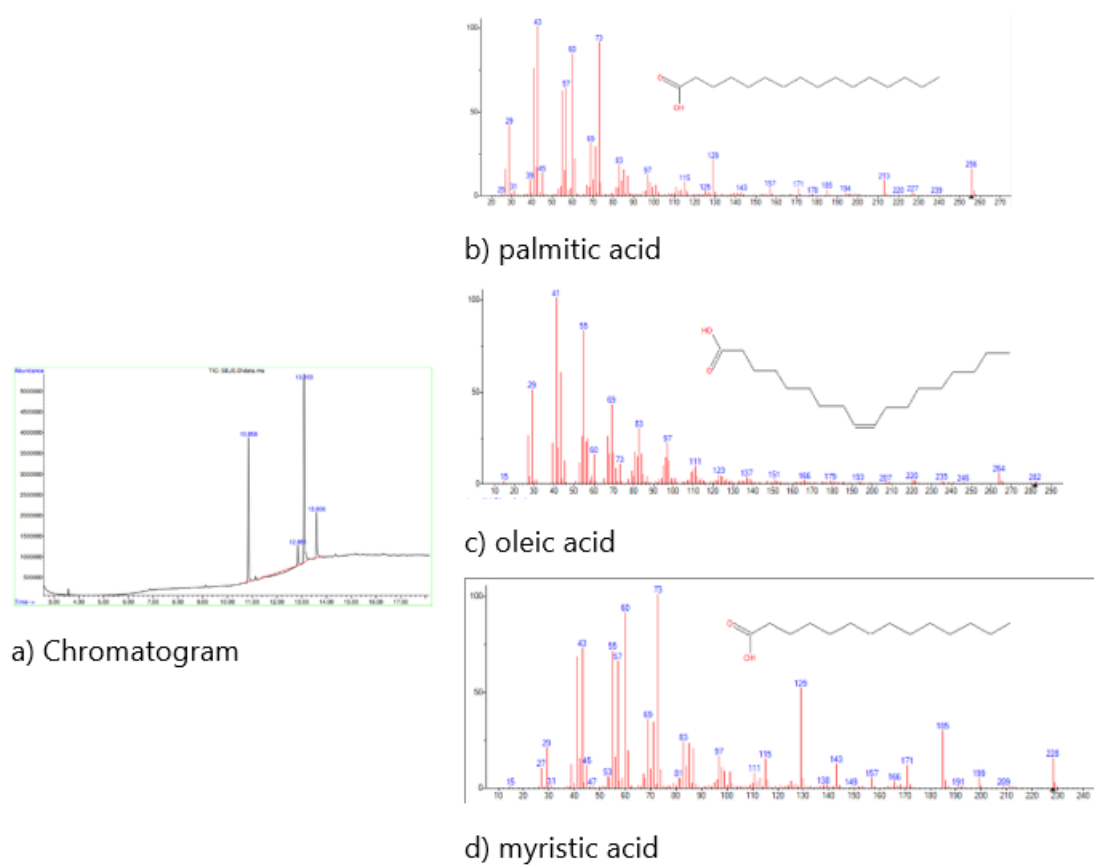


Figura 6. Cromatograma y espectro de masas de los ácidos más representativos del biodiésel obtenidos del aceite Seje.

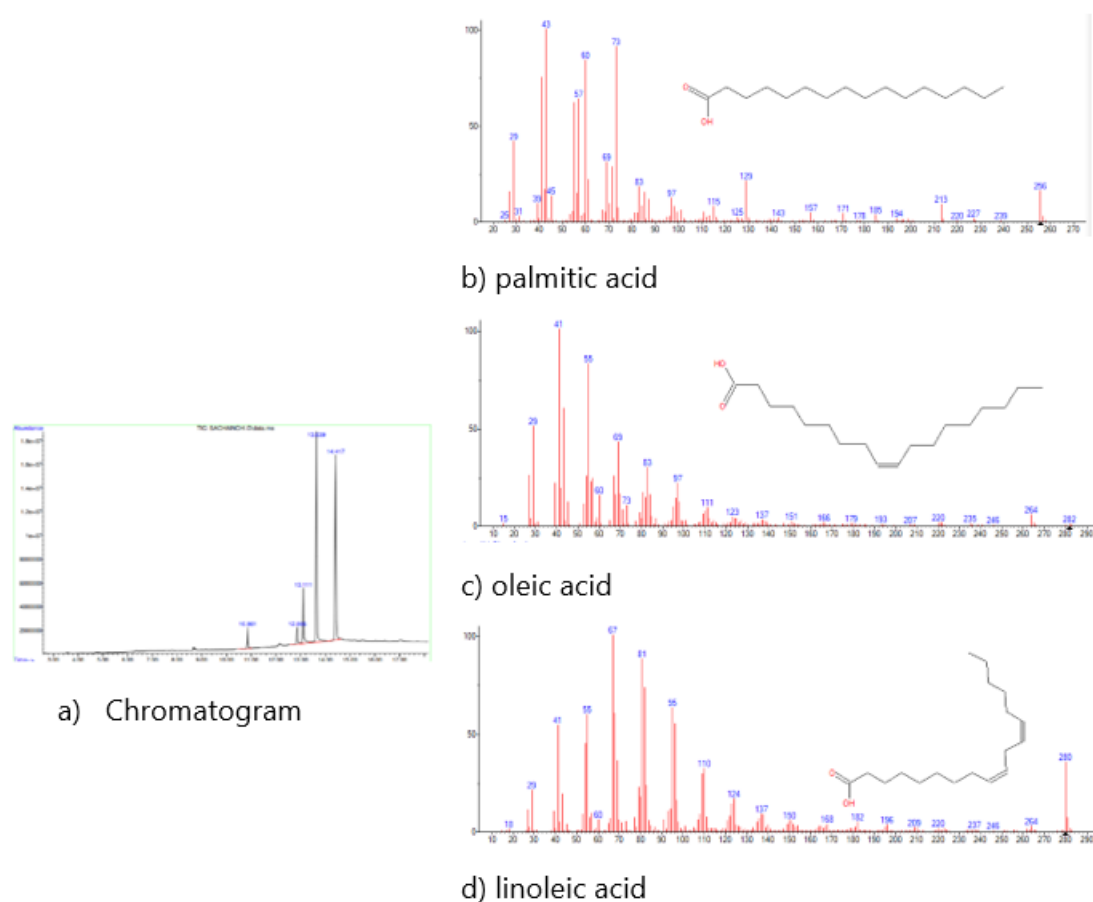


Figura 7. Cromatografía y espectro de masas de los ácidos más representativos del biodiésel obtenidos del aceite de Sacha inchi.

Discusion

La primera materia prima analizada es la andiroba, que contiene ácidos oleico, palmítico y linoleico, con un porcentaje de ácidos grasos insaturados del 69,28%. La segunda materia prima es el sachá inchi, que contiene ácidos palmítico, oleico, esteárico y linoleico, con un porcentaje de ácidos grasos insaturados del 83,82%. Finalmente, el aceite extraído del sejé contiene ácidos oleico, palmítico, esteárico, caprílico, láurico, mirístico y linoleico, con un porcentaje de ácidos grasos insaturados del 90,40%. Es importante señalar que algunas variaciones en los ácidos grasos presentes pueden estar relacionadas con las condiciones naturales y geográficas de origen de los aceites, como indican otros estudios (30-32).

El análisis cromatográfico nos permitió determinar no solo los ácidos grasos insaturados presentes en las muestras analizadas, sino también la proporción de cada uno. Se observó que la muestra de Sejé mostraba una alta proporción de ocho ácidos grasos diferentes, siendo los ácidos oleico y palmítico los más característicos. En contraste, las muestras de Sacha Inchi y Andiroba tenían un contenido ácido menor, pero sus proporciones eran adecuadas para la síntesis de biodiésel. Se

han realizado investigaciones para determinar el efecto de ésteres de ácidos grasos (FAEs) sobre el biodiésel resultante, influyendo en su calidad y rendimiento. Durante la transesterificación (uno de los principales procesos en la transformación del aceite en biodiésel), se ha observado que la composición de ácidos grasos no se ve afectada (33). Estos ésteres, que reaccionan con el alcohol, tendrán el mismo perfil de FAME que el aceite vegetal original (34).

Es importante señalar que los biodiésel que cumplen con normas y normativas establecidas, como ASTM D6751, EN 14214:2013 y NTC 1438:2013, son adecuados para su uso en motores diésel sin afectar su funcionamiento. La Tabla 3 resumió el contenido principal de estos estándares. NTC 5444:2020, la norma colombiana para combustibles diésel, incluye definiciones relacionadas.

Tabla 3. Tabla comparativa de las principales regulaciones relacionadas con los biocombustibles

Estándar	ASTM D 6751	EN 14214:2013	NTC 5444:2020
Contenido	Especificación para biodiésel (B100) como combustible o para mezclar hasta cierto nivel.	Estándar europeo para ésteres metílicos de ácidos grasos para su uso en motores diésel al 100% (B100) o como componente de mezclas.	Especificaciones para biodiésel para uso en motores diésel (B100) en Colombia.
Origen	Estados Unidos	Europa	Colombia
Viscosidad cinemática a 40°C	1,9-6,0 mm²/s	3,5-5,0 mm²/s	1,9-6,0 mm²/s
Punto de inflamabilidad	≥ 93 °C	> 120 °C	≥ 120 °C
Ceniza de sulfato	≤ 0,020% de masa	≤ 0,020% de masa	≤ 0,020% de masa
Agua y sedimentos	≤ 0,050 % vol	-	-
Contenido en metanol o etanol	≤ 0,20 % de masa	≤ 0,2 % de masa	≤ 0,2 % de masa
Número de cetano	≥ 47	≥ 51	≥ 47
Contenido de éster metilo	-	≥ 96,5 % m/m	≥ 96,5 % m/m
Densidad a 15°C	-	860-900 kg/m³	860-900 kg/m³
Contenido de azufre	S15: ≤ 15 mg/kg S500: ≤ 500 mg/kg	≤ 10 mg/kg	≤ 10 mg/kg
Valor de yodo	-	< 120 g I ₂ /100 g	< 120 g I ₂ /100 g
Contenido de agua	≤ 500 mg/kg	≤ 500 mg/kg	≤ 500 mg/kg
Contaminación total	-	≤ 24 mg/kg	≤ 24 mg/kg
Estabilidad a la oxidación	≥ 3 horas	≥ 6 horas	≥ 6 horas
Glicerina libre	≤ 0,020 % de masa	≤ 0,020 % de masa	≤ 0,020 % de masa
Glicerina total	≤ 0,240 % de masa	≤ 0,250 % de masa	≤ 0,240 % de masa
Fósforo	≤ 1,0 mg/kg	≤ 4,0 mg/kg	≤ 4,0 mg/kg

El estándar europeo es más estricto en algunos parámetros (número de cetano y viscosidad) en comparación con el estándar estadounidense; sin embargo, esta última tiene parámetros más específicos para glicerina, fósforo, etc., lo que la hace completa para la B100. En la mayoría de los casos, el estándar colombiano adopta los criterios del estándar europeo pero mantiene la viscosidad y el número de cetano del estándar estadounidense y es ligeramente más flexible que ambos estándares en cuanto al porcentaje total de glicerina.

Los biodiésel, con baja estabilidad a la oxidación y propiedades a baja temperatura, pueden requerir el uso de aditivos para mejorar su rendimiento y asegurar una combustión eficiente. Además, debe controlarse el contenido de ácido linónico en el biodiésel, ya que un exceso puede causar problemas de estabilidad oxidativa y depósitos de motores, como ocurre con el biocombustible derivado de Sacha Inchi. En general, es necesario cumplir con los límites establecidos en la Tabla 3 para garantizar un rendimiento óptimo y evitar la necesidad de mantenimiento frecuente.

Conclusiones

El estudio teórico de los aceites Seje, andiroba y Sacha Inchi revela su potencial como materia prima para la producción de biodiésel, mostrando propiedades similares en índice de refracción, densidad relativa y contenido de ácidos grasos. Estos hallazgos sugieren que son opciones viables para la síntesis de biodiésel. Sin embargo, se han observado variaciones significativas en la saponificación y los valores de yodo entre los diferentes aceites estudiados. Esto sugiere que estas diferencias deben tenerse en cuenta al seleccionar el aceite adecuado para la producción de biodiésel, ya que estos parámetros pueden afectar la calidad y las propiedades del combustible resultante.

La composición del aceite de Seje contiene una abundante cantidad de ácidos grasos, lo que lo convierte en el mejor aceite estudiado para su uso como materia prima en la producción de biodiésel. Esta cualidad distintiva no solo resalta su potencial, sino que también responde a la creciente demanda de fuentes de energía y combustible sostenibles. La presencia significativa de estos ácidos grasos también facilita el proceso de transesterificación en la conversión del aceite en biodiésel, como se demuestra en las pruebas.

Además, tras la experimentación, no fue posible obtener biocombustible del aceite de andiroba; la transesterificación del aceite Sacha Inchi muestra un rendimiento de solo el 25%, mientras que la del aceite Seje es del 90%, lo que lo confirma como la mejor opción para obtener un biodiésel de alta calidad, con propiedades adecuadas para su uso en motores diésel y contribuyendo así a la búsqueda de combustibles alternativos más limpios y sostenibles.

Reconocimientos

Producto derivado del proyecto de investigación INV-ING-3484 financiado por la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad Militar de Nueva Granada.

Declaración de contribución de autoría de CreditT

Conceptualización - Ideas: Anny A. Espitia-Cubillo, Miguel Á. Sánchez Moyano. **Curación de datos:** Anny A. Espitia-Cubillo, Miguel Á. Sánchez Moyano. **Investigación:** Anny A. Espitia Cubillo, Miguel Á. Sánchez Moyano. **Metodología:** JAnny A. Espitia-Cubillo, Miguel Á. Sánchez Moyano. **Dirección de Proyecto:** Anny A. Espitia-Cubillo, Miguel Á. Sánchez Moyano. **Supervisión:** Anny A. Espitia-Cubillo, Miguel Á. Sánchez Moyano. **Validación:** Anny A. Espitia-Cubillo, Miguel Á. Sánchez Moyano. **Recursos:** Anny A. Espitia-Cubillo, Miguel Á. Sánchez Moyano. **Software:** Anny A. Espitia-Cubillo, Miguel Á. Sánchez Moyano. **Redacción - Borrador original - Preparación:** Janny A. Espitia-Cubillo, Miguel Á. Sánchez-Moyano. **Redacción - Revisión y edición - Preparación:** Janny A. Espitia-Cubillo, Miguel Á. Sánchez-Moyano.

Financiación: No declara. Conflicto de intereses: No declara. Aspecto ético: No declara.

Referencias

1. Wan Osman WNA, Hakimi Rosli M, Athirah Mazli WN, Samsuri S. Comparative review of biodiesel production and purification. Carbon Capture Science & Technology. 2024; 13:100264. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100264>
2. Guerra Sánchez M, Assaf Montaña JC, Ascanio Mantilla NJ. Implementación de energías renovables como garantía al derecho fundamental a un ambiente sano en Colombia. Rev CES Derecho. 2021;12(2):87-106. doi: <https://doi.org/10.21615/cesder.6163>
3. Colmenares-Quintero RF, Rico-Cruz CJ, Stansfield KE, Colmenares-Quintero JC. Assessment of biofuels production in Colombia. Cogent Eng. 2020;7(1):1740041. doi: <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1740041>
4. Chidambaram PK, Lokhande DA, Ramachandran DM, Saravanan V, Prasanth V. A Review on Biodiesel Properties and Fatty acid composites. REST J Emerg Trends Modelling Manufact. 2021;7(3):87-93. <https://doi.org/10.46632/7/3/4>
5. Vega LP, Bautista KT, Campos H, Daza S, Vargas G. Biofuel production in Latin America: A review for Argentina, Brazil, Mexico, Chile, Costa Rica and Colombia. Energy Rep. 2024;11:28-38. doi: [10.1016/j.egy.2023.10.060](https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.060). <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.060>
6. Fedebiocombustibles. Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia. Boletín informativo. 2023 Ene;(165). Disponible en: <https://www.fedebiocombustibles.com/>

7. Basto-Florez LE, Millán-Alvarado SA, Medina-Caballero LF, Mora-Vergara LZ, Caballero-Hernández YT. Estudio del biodiesel obtenido a partir de aceite de Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* Linneo). *Biotec Sect Agropecu Agroind*. 2022;20(1):41-53. doi: <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v20.n1.2022.1585>
8. Chávez Parra EG. Huertos agroecológicos en fincas campesinas que trabajan con el Frente de Defensa de la Amazonía-FDA del cantón Lago Agrio y su contribución a la soberanía alimentaria de las familias [tesis maestría]. Quito, EC: Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador; 2024. <https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/9803/1/T4294-MEPAD-Chavez-Huertos.pdf>
9. Cañón Gaitán C. Análisis de nuevas tecnologías para la producción de biodiesel con fluidos supercríticos [tesis maestría]. Universidad Nacional de Colombia; 2021. <https://bffrepositorio.unal.edu.co/server/api/core/bitstreams/e380a21c-979c-44b2-8c2e-06b241ac6e07/content>
10. Acevedo ELB, Jurado JMV, Lombana J. Alternativas productivas para la industria de biodiésel en Colombia. *Cuad Lat Adm*. 2017;13(24):135-48. doi: <https://doi.org/10.18270/cuaderlam.v13i24.2159>
11. Hernández NS, Galvan A. Eficiencia y emisiones del motor de combustión interna de encendido por compresión impulsado por aceites vegetales. *ENERLAC Rev Energ Latinoam Caribe*. 2024;8(1). Disponible en: <https://enerlac.olade.org/index.php/ENERLAC/article/view/275>
12. Pérez-Bravo SG, Aguilera-Vázquez L, Castañeda-Chávez MDR, Gallardo-Rivas NV. Condiciones del proceso de transesterificación en la producción de biodiésel y sus distintos mecanismos de reacción. *TIP Rev Esp Ci Quím Biol*. 2022;25:e481. doi: <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.481>
13. Alviso D, Romano SD. Prediction of the refractive index and speed of sound of biodiesel from its composition and molecular structure. *Fuel*. 2021;304:120606. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120606>
14. Lourenço VA, Nadaleti WC, Vieira BM, Li H. Investigation of ethyl biodiesel via transesterification of rice bran oil: bioenergy from residual biomass in Pelotas, Rio Grande do Sul-Brazil. *Renew Sust Energ Rev*. 2021;144:111016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111016>
15. Huang Y, Li F, Bao G, Xiao Q, Wang H. Modeling the effects of biodiesel chemical composition on iodine value using novel machine learning algorithm. *Fuel*. 2022;316:123348. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123348>
16. Ferreira MR, Santiago RR, de Souza TP, Egito ES, Oliveira EE, Soares LA. Development and evaluation of emulsions from Carapa guianensis (Andiroba) oil. *AAPS PharmSciTech*. 2010;11:1383-90. doi:<https://doi.org/10.1208/s12249-010-9491-z>
17. De Brito Leal A, Dos Santos Hackbart HC, Macueia FBED, Rombaldi CV. Andiroba oil (Carapa guianensis): Descriptive analysis and applicability. *Ind Crops Prod*. 2023;202:117004. doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117004>
18. Farfán F. Árboles con potencial para ser incorporados en sistemas agroforestales con café. Chinchiná (Colombia): Cenicafé - Fondo Nacional del Café; 2012. <https://www.sidalc.net/search/Record/oai:publicaciones.cenicafe.org:article-3242/Description>
19. Da Silva EF, Montero IF, Melo Filho AA, Santos RC, Ribeiro PRE, Sangama DM, et al. Propiedades Físico-químicas por RMN de ¹H y Constituyentes en el Aceite de Carapa guianensis por ESI-MS. *Orbital Electron J Chem*. 2014;6(4):246-54. <http://hdl.handle.net/10662/25938>

20. Salazar de Marcano E, Douglas B, Marín G, Moreno H. Cinética de deterioro del aceite de la semilla de la palma coroba (*Attalea maripa*). *SABER Rev Multidiscip Cienc Univ Oriente*. 2007;19(2):172-82.
21. D'oca MG, Morón-Villarreyes JA, Lemões JS, Costa CS. Fatty acids composition in seeds of the South American glasswort *Sarcocornia ambigua*. *An Acad Bras Ciênc*. 2012;84:865-70. doi: <https://doi.org/10.1590/S0001-37652012005000044>
22. Ocampo-Duran Á, Fernández-Lavado AP, Castro-Lima F. Aceite de la palma de seje *Oenocarpus bataua* Mart. por su calidad nutricional puede contribuir a la conservación y uso sostenible de los bosques de galería en la Orinoquia Colombiana. *Orinoquia*. 2013;17(2):215-29. <https://doi.org/10.22579/20112629.20>
23. Pérez Muñoz N, Uribe Morón J. Determinación de las condiciones óptimas para la producción de biodiesel a partir de aceite de Higuera (*Ricinus Communis*) y aceite de Palma Mil Pesos (*Oenocarpus Bataua*) [tesis pregrado]. Ingeniería de Procesos; 2008.
24. Chaves-Yela JA, Ortiz-Tobar DP, Bahos-Ordoñez EM, Ordoñez-Forero GA, Villota-Padilla DC. Análisis del perfil de ácidos grasos y propiedades fisicoquímicas del aceite de palma de mil pesos (*Oenocarpus Bataua*). *Perspect Nutr Hum*. 2020;22(2):175-88. doi: <https://doi.org/10.17533/udea.penh.v22n2a05>
25. DelgadoW, Echeverry LF, Suárez SR. Caracterización fisicoquímica del aceite de palma crudo proveniente de diferentes materiales genéticos y de dos zonas geográficas de Colombia. *Palmas*. 2024;25(Especial-Tomo II):74-83. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1068>
26. Vilas Bôas RN, Mendes MF. A review of biodiesel production from non-edible raw materials using the transesterification process with a focus on influence of feedstock composition and free fatty acids. *J Chil Chem Soc*. 2022;67(1):5433-44. doi: <https://doi.org/10.4067/S0717-97072022000105433>
27. Delgado EEG, Nabarlatz DA, Vargas FAA. Obtención de biodiésel por transesterificación in situ a partir de semillas de *Jatropha curcas* L. *Rev UIS Ingenierías*. 2022;21(2):21-38. doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n2-2022003>
28. Puchades Murgadas A. Efecto y consecuencias del cambio climático en el contenido de omega 3 en el pescado. Análisis de la viabilidad de otras fuentes de omega 3 para la nutrición humana [tesis doctoral]. Universitat Politècnica de València; 2021. <https://riunet.upv.es/entities/publication/6a920c85-15f2-4b38-b7ca-c23eebf5eeb2>
29. Rozo JRV, Ávila JMR, Valencia JLR. Influencia de los ácidos grasos de aceites animales de cerdo y pollo en la producción de biodiésel. *Rev Ambient Agua Aire Suelo*. 2023;14(2):1-8. doi: <https://doi.org/10.24054/raaas.v14i2.2785>
30. Pereira E, Ferreira MC, Sampaio KA, Grimaldi R, de Almeida Meirelles AJ, Maximo GJ. Physical properties of Amazonian fats and oils and their blends. *Food Chem*. 2019;278:208-15. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.016>
31. Darnet SH, Da Silva LH, Rodrigues AM, Lins RT. Nutritional composition, fatty acid, and tocopherol contents of buriti (*Mauritia exuosa*) and patawa (*Oenocarpus bataua*) fruit pulp from the Amazon region. *Ciênc Tecnol Aliment*. 2011;31(2):488-91. doi: <https://doi.org/10.1590/S0101-20612011000200032>

32. Rendón WJ, Chavez G, Torrico D. Evaluación química del aceite de oenocarpus bataua "aceite de majo". Rev Boliv Quím. 2013;30(1):70-3.
33. Ramos MJ, Fernández CM, Casas A, Rodríguez L, Pérez Á. Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties. Bioresour Technol. 2009;100(1):261-8. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.06.039>
34. Knothe G. Some aspects of biodiesel oxidative stability. Fuel Process Technol. 2007;88(7):669-77. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.01.005>