

**CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE TRES ACEITES DE COCINA USADOS PARA
FREÍR DIFERENTES ALIMENTOS Y LOS RESPECTIVOS BIODIESEL OBTENIDOS POR
TRANSESTERIFICACIÓN EN LA CIUDAD SANTIAGO DE CALI, COLOMBIA.**

**Lina Alexandra Guerra Cuaran
Luis Fernando Bonilla Ramírez**

**Director
Ricardo Andres Tusso
Director
Yesid Fabián Zambrano Salgado**

**Universidad Santiago de Cali
Facultad de Ciencias Básicas
Programa de Química
Cali, Colombia
2024**

CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE TRES ACEITES DE COCINA USADOS PARA FREÍR DIFERENTES ALIMENTOS Y LOS RESPECTIVOS BIODIESEL OBTENIDOS POR TRANSESTERIFICACIÓN EN LA CIUDAD SANTIAGO DE CALI, COLOMBIA.

**Lina Alexandra Guerra Cuaran
Luis Fernando Bonilla Ramírez**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Químico**

**Director
Ricardo Andres Tusso
Director
Yesid Fabián Zambrano Salgado**

**Línea de Investigación:
GIEMA
Grupo de Investigación:
Solución a problemas ambientales**

**Universidad Santiago de Cali
Facultad de Ciencias Básicas
Programa de Química
Ciudad, Colombia
2024**

IMPACTOS

Relacione el (los) impacto(s) que presentó el Trabajo de Grado

IMPACTO	PRODUCTO	BENEFICIARIO(S)
Económico	Aprovechamiento de residuos	Restaurantes/ Panaderías
Responsabilidad social	Solución ambiental	Población general
Científico	Síntesis de biocombustibles	Combustible económico
Indicadores de Gestión	N/A	N/A
Tecnológico	N/A	N/A
Técnico	Biodiesel	Reducción costos de combustibles
Ambiental	Disposición adecuada de residuos	Disminución de contaminantes
Social	N/A	N/A
Cultural	N/A	N/A

CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE TRES ACEITES DE COCINA USADOS PARA FREÍR DIFERENTES ALIMENTOS Y LOS RESPECTIVOS BIODIESEL OBTENIDOS POR TRANSESTERIFICACIÓN EN LA CIUDAD SANTIAGO DE CALI, COLOMBIA.

Lina Alexandra Guerra Cuaran¹, Luis Fernando Bonilla²

Tecnólogos Químicos, estudiantes de Química de la Facultad de Ciencias Básicas, línea de investigación GIEMA y grupo de Solución a Problemas Ambientales de la Universidad Santiago de Cali. Campus Pampalinda Calle 5 # 62-00. Santiago de Cali. Colombia.

RESUMEN

El incremento en la demanda global de energía y la preocupación ambiental relacionada al uso de combustibles fósiles crea la necesidad de encontrar alternativas más sostenibles, destacando la relevancia de los biocombustibles para disminuir la dependencia del petróleo. Este estudio se enfoca en obtener tres tipos de biodiesel a partir de Aceites de Cocina Usados (ACU), provenientes de la fritura de empanadas, buñuelos, pollo apanado y un biodiesel de aceite de palma nuevo utilizado como referencia.

Se realizaron pruebas fisicoquímicas para caracterizar los aceites y biodiesel obtenidos para evaluar su potencial como biocombustible. Se determinó su rendimiento y se obtuvo 93,1 % del aceite proveniente de la fritura de buñuelos, 87,5% de empanadas y 90,6% de pollo apanado. Con base a los resultados de la caracterización y su rendimiento, se logró determinar que el biodiesel proveniente del ACU pollo apanado, tiene mayor potencial como biocombustible y el biodiesel de ACU empanadas demostró ser el menos apto para dicho uso.

Palabras clave: Biocombustibles; biodiesel; aceite de cocina usado; aceite de palma.

Physicochemical characterization of three cooking oils used to fry different foods and the respective biodiesel obtained by transesterification in the city of Santiago de Cali, Colombia.

ABSTRACT

The increase in global energy demand and the environmental concerns related to the use of fossil fuels, creates the need to find more sustainable alternatives, highlighting the relevance of biofuels to reduce dependence on oil. This study focuses on obtaining three types of biodiesel from Used Cooking Oils (UCO), from the frying of empanadas, fritters, breaded chicken and a new palm oil biodiesel used as a reference.

Physicochemical tests were carried out to characterize the oils and biodiesel obtained to evaluate their potential as biofuel. Their yield was determined and 93.1% fritters, 87.5% empanadas and 90.6% breaded chicken were obtained. Based on the results of the characterization and their yield, it was determined that the biodiesel from the breaded chicken ACU has the greatest potential as biofuel and the biodiesel from the breaded chicken ACU proved to be the least suitable for such use.

Keywords: Biofuels; biodiesel; used cooking oil; palm oil.

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) en su “Informe regional aceite de cocina usado” de 2022, en Colombia el 70% de los aceites de cocina usados (ACU), se descartan por las alcantarillas o desagües de casas o negocios de comidas. Según el mismo informe, anualmente se consumen 1702 millones de litros de aceite en el país [1]. Los ACU liberan productos de oxidación al medio ambiente, lo que puede ser perjudicial para los organismos acuáticos y, en última instancia, para los seres humanos a través de la cadena alimenticia [1]. Además, la creciente demanda de energía en el mundo industrializado ha exacerbado los problemas ambientales debido al uso intensivo de combustibles fósiles como el gas natural, el carbón y el petróleo. Esta situación ha llevado a problemas como el efecto invernadero y el calentamiento global [2]. Por lo anterior, se propone el uso de biocombustibles como el biodiesel, producido a partir de materias primas orgánicas como los ACU. Los ACU son una fuente valiosa para la producción de biocombustibles debido a su adecuada combustión y su composición no tóxica y limpia. Se estima que se producen alrededor de 16,54 millones de toneladas de ACU anualmente en el mundo, lo que podría contribuir significativamente a abordar la crisis energética y los problemas ambientales [3].

El biodiesel se produce mediante un proceso llamado transesterificación, que implica la reacción de los triglicéridos en los ACU con un alcohol en presencia de un catalizador. Este proceso genera ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME), que son los componentes principales del biodiesel, y glicerol como subproducto [4]. Aunque el biodiesel presenta ventajas en términos de biodegradabilidad y baja toxicidad, enfrenta desafíos como la escasez de materia prima adecuada y las críticas por el uso de alimentos en su producción. La evaluación del ciclo de vida y la huella de carbono son aspectos importantes que considerar en la producción y uso de biodiesel, ya que permiten evaluar su impacto ambiental y su sostenibilidad. Además, es crucial reducir el desperdicio de alimentos para cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU y mitigar los impactos económicos, sociales y ambientales [5]. También, los ACU se valorizan a través de enfoques de economía circular, donde se transforman en productos químicos, materiales y combustibles mediante biorrefinerías. Esto no solo ayuda a reducir el impacto ambiental de los ACU, sino que también crea oportunidades económicas y promueve la sostenibilidad en la industria de alimentos y aceites [5].

Por otra parte, en la producción de biodiesel, es importante considerar la composición de las materias primas, los parámetros del proceso y la calidad del producto final. La elección del catalizador, la relación molar alcohol/aceite, la temperatura de reacción y la velocidad de agitación son aspectos clave que deben optimizarse para obtener un rendimiento óptimo durante la transesterificación [6].

Los ACU representan una fuente importante para la producción de biodiesel, que puede contribuir a abordar la crisis energética y los problemas ambientales asociados con el uso de combustibles fósiles. Sin embargo, es crucial implementar prácticas de manejo adecuadas y optimizar los procesos de producción para garantizar la sostenibilidad y la eficiencia del biodiesel como alternativa ecológica y renovable. El objetivo de esta investigación, es establecer el potencial termodinámico de los biodiesel obtenidos a partir de tres aceites de cocina usados para freír buñuelos, empanadas y pollo apanado, determinando cuál de ellos tiene las características más favorables para ser un potencial biocombustible de alta eficiencia.

El estudio realizado comprende las siguientes etapas de la investigación:

- 🚩 Sección 2: Describe los materiales y métodos utilizados para la caracterización fisicoquímica de los aceites y biodiesel obtenidos.
- 🚩 Sección 3: Presentación de los resultados obtenidos para cada prueba realizada a los ACU y biodiesel.
- 🚩 Sección 4: Discusión de los resultados obtenidos, su correlación e impacto en el potencial de los biodiesel para su uso como biocombustibles.
- 🚩 Sección 5: Conclusiones y establecimiento del biodiesel con mejores características para uso como biocombustible.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Esta sección describe el procedimiento utilizado para cada una de las fases de la etapa experimental de la investigación realizada:

- ✚ Sección 2.1.: Alistamiento de las muestras de ACU a caracterizar.
- ✚ Sección 2.2.: Descripción de la metodología de análisis a realizar para cada uno de los ACU.
- ✚ Sección 2.3.: Método para la síntesis de transesterificación alcalina que permite la obtención de los biodiesel provenientes de los ACU.
- ✚ Sección 2.4.: Explicación de los métodos usados para la caracterización de los biodiesel obtenidos.

La etapa experimental de la investigación fue planteada para tres muestras de aceites usados de origen vegetal (aceite de palma), cada muestra recolectada en un sitio diferente (2 L por muestra) y cada tipo de aceite se utilizó para freír un alimento diferente (pollo apanado, buñuelos y empanadas). Adicionalmente, el mismo tratamiento se realizó sobre una muestra de aceite de palma nuevo, como punto de referencia para el análisis de resultados.

2.1. Alistamiento de muestras

Se realizó un filtrado de los aceites de cocina usados (ACU) para retirarle los sólidos en suspensión, remanentes de los alimentos freídos en él. Posteriormente, se realizó un calentamiento previo de los aceites a aproximadamente 50°C para facilitar el filtrado. Como se tenía descrito se hizo la filtración en malla # 18 (1 mm), pero pasaban muchas partículas sólidas, entonces se decidió filtrar por una malla de poro más pequeña # 25 (0,71 mm), logrando remover una mayor cantidad de sólidos suspendidos.

Se transfirió cada una de las muestras ya filtradas a recipientes limpios y secos (Anexo 1. Figura 1). Por supuesto, en el caso del aceite que se iba a usar de referencia (aceite nuevo) no hubo necesidad de esta filtración.

2.2. Análisis de aceites

Los análisis de aceites usados y aceite de referencia nuevo, se determinaron de acuerdo con los siguientes métodos:

2.2.1. Materia volátil (perdida por secado)

Se secaron 5 gramos de cada muestra en pesa sustancias, durante 3 horas en estufa a 103 °C.

2.2.2. Contenido de agua (Método Karl Fischer)

El contenido de agua se realizó en un equipo Metrohm 848 Titrino plus. Agregando aproximadamente 0,8 gramos de cada muestra.

2.2.3. Índice de acidez

Esta prueba se realizó basados en la NTC 218 para la determinación de índice de acidez para grasas y aceites vegetales y animales, usado como diluyente etanol previamente neutralizado y titulando con KOH 0,085 N. Se pesaron 5 gramos de cada aceite.

2.2.4. Índice de peróxidos

Para esta prueba se siguió la NTC 236 para la determinación del índice de peróxidos para grasas y aceites vegetales y animales, tomando 5 gramos de cada uno de los aceites y titulando con tiosulfato 0,058 N, preparada y estandarizado previamente.

2.2.5. Índice de saponificación

Se realizó siguiendo la NTC 335 para la determinación del índice de saponificación para grasas y aceites animales y vegetales. Se tomaron 1 g de muestra de cada aceite y se valoró con HCl 0,551N

2.2.6. Densidad a 25 °C

Se hizo según la NTC 336 para la determinación de densidad en aceites animales y vegetales. Se midió a 25°C usando picnómetro de 25 mL.

2.2.7. Viscosidad

La viscosidad de los aceites se cuantificó en un viscosímetro Brookfield Fungilab, a 25°C, a 100 rpm y con la aguja T1 del equipo.

2.2.8. Perfil de ácidos grasos (FAME)

Se determinó en un cromatógrafo gaseoso Shimadzu Nexis GC-2030 con detector de masas cuadrupolo (GC-MS). Se tomó 0,5 g de aceite, se le agregó 8 mL de NaOH metanólico 0,5 molar, y se sometió a reflujo por 10 minutos en baño maría con agitación constante. Transcurrido esto, se le adicionaron 7,5 mL de complejo al 20% de BF₃ metanólico y se continuó el reflujo por 2 minutos más. Luego se le adicionaron 5 mL de hexano y se dejó un minuto más en el reflujo agitando la mezcla. Por último, se enfrió el matraz en un baño frío y se transfirió la mezcla a un tubo falcón de 50 mL que contenía 25 mL de NaCl saturado. Se tapó el tubo y se agitó. Se dejó en reposo 5 minutos hasta la separación de fases. Se transfirió 1 mL del sobrenadante a un tubo de ensayo de 10 mL que contenía 2 gramos de sulfato de sodio anhidro (desecante) y 3 mL de hexano, se agitó la mezcla y se transfirió una porción del sobrenadante a un vial de inyección del cromatógrafo [25].

Se inyectó en modo Split 1 µL de muestra, la temperatura del horno de la columna fue de 80°C, el inyector estaba a 230°C, el gas de arrastre usado era helio y la tabla 1 muestra el gradiente de elución:

Tabla 1. Gradiente de elución

Rata	Temperatura	Tiempo (min)
-	80	1,0
5,0	80	2,0
15,0	120	5,0
20,0	220	7,0
30,0	220	12,0

2.3. Elaboración de Biodiesel

El biodiesel a partir de los aceites de cocina usados y nuevo, se obtuvo por medio del método:

2.3.1. Transesterificación alcalina

Se preparó metóxido al 2,4% de hidróxido de sodio (catalizador) en metanol grado reactivo. Se mezclaron 1280 mL de cada aceite con 320 mL de metóxido de sodio. Se calentó a 55°C durante 1 hora mezclando permanentemente. Se dejó en reposo por 48 horas. Se transfirieron porciones de aproximadamente 300 mL del sobrenadante a un embudo de separación de 500 mL y se procedió con el lavado del catalizador agregando agua porciones de 100 mL de agua desionizada hasta que el pH de los lavados estuviera cerca a neutro. Finalmente se realizó un secado por filtración por gravedad del biodiésel con ayuda de sulfato de sodio anhidro [6].

2.4. Análisis de biodiesel

El biodiesel fue analizado bajo las metodologías descritas a continuación:

2.4.1. Poder calorífico superior

Se cuantifico en bomba calorimétrica según el método ASTM D5865.

2.4.2. Cenizas sulfatadas

Se realizó aplicando según el método ASTM D874.

2.4.3. Punto de ignición

Se realizó aplicando el método ASTM D93.

2.4.4. Densidad a 15 °C

Se determino por picnometría a 15°C usando un picnómetro de vidrio de 25 mL.

2.4.5. Contenido de agua (Método Karl Fischer)

El contenido de agua de los biocombustibles se determinó en un equipo Metrohm 848 Titrino plus. Agregando aproximadamente 0,8 gramos de cada muestra. y en base a la norma ASTM D6751.

2.4.6. Índice de Yodo

Se uso el método EN 14111:2022: Derivados de grasas y aceites - Ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME), utilizando 0,1 gramos de muestra.

2.4.7. Índice de cetano

Este parámetro de cuantifico usando el método ASTM D976.

2.4.8. Viscosidad cinemática

La prueba de viscosidad cinemática, usualmente se mide a través del método clásico de viscosímetro de Ostwald, utilizando un tubo capilar calibrado y bajo la norma ASTM D456. Sin embargo, esta investigación plantea una alternativa de análisis para la medición de viscosidad cinemática de forma indirecta, ya que, en la mecánica de fluidos, dicha viscosidad es equivalente al cociente obtenido entre la viscosidad dinámica del fluido, medida según el método ASTM D445 y su densidad determinada por picnometría a volumen de 25mL. Los análisis se realizaron en igual condición de temperatura y de acuerdo al método (40°C) [18] [19]. Los resultados se calcularon mediante la ecuación (1)

:

$$v = \frac{\eta \times 1000}{\rho} \quad (1)$$

v : Viscosidad cinemática (cSt: Centistoke)

η : Viscosidad dinámica (cP: Centipoise)

ρ : Densidad (kg/ m³)

3. RESULTADOS

3.1. Análisis de aceites

Los ACU recolectados y el aceite de referencia nuevo, usados para la fase experimental, fueron tratados y analizados para obtener cada uno de los resultados descritos a continuación:

➤ **Materia volátil (pérdida por secado)**

Los resultados obtenidos en la tabla 2, mostraron que el ACU - Empanadas representa el menor contenido de materia volátil (0,00%) y el más alto es ACU - Pollo apanado (0,13%) siendo < 2,00% e indicando una menor probabilidad de afectación negativa en la calidad del biodiesel y su rendimiento [7].

Tabla 2. Pérdida por secado de aceites usados y nuevo.

Muestras de aceites	Pérdida de materia volátil (%)
ACU - Buñuelos	0,03
ACU - Empanadas	0,00
ACU - Pollo apanado	0,13
Aceite nuevo	0,10

➤ **Contenido de agua (Método Karl Fischer)**

La pérdida de contenido de agua en ACU de la tabla 3, demostró una variación entre 1,00 – 5,00 % según la naturaleza de la muestra. El ACU - Pollo apanado fue el de mayor contenido (0,17%) sin superar el porcentaje esperado y redujo la probabilidad de obtener emulsiones o bajo rendimiento del biodiesel [8].

Tabla 3. Contenido de agua (Karl Fischer) de aceites usados y nuevo.

Muestras de aceites	Contenido de agua (%)
ACU - Buñuelos	0,09
ACU - Empanadas	0,07
ACU - Pollo apanado	0,17
Aceite nuevo	0,08

➤ **Índice de acidez**

Los índices de acidez obtenidos en la tabla 4, muestra que los ACU - Buñuelos y ACU - Pollo apanado son > 2,00 mg KOH/g de muestra, superando el resultado esperado (0,50 – 2,00 mg KOH/g de muestra) y esto indicó la presencia de ácidos grasos libres en las muestras [8]. La presencia de altos niveles de acidez puede perjudicar la síntesis del biodiesel por transesterificación alcalina, puesto que esa acidez consume parte del catalizador usado (NaOH), disminuyendo el rendimiento.

Tabla 4. Índice de acidez de aceites usados y nuevo.

Muestras de aceites	mg KOH/g de muestra
ACU - Buñuelos	2,94
ACU - Empanadas	1,68
ACU - Pollo apanado	4,66
Aceite nuevo	0,19

➤ **Índice de peróxidos**

Los ACU de la tabla 5, mostraron índice de peróxidos $>10,00$ meq O_2 /kg de muestra indicando la presencia de peróxidos y compuestos de degradación en las muestras a excepción del aceite de cocina nuevo [8]. Los altos niveles de peróxidos pueden generar inestabilidad en los biodiesel produciendo reacciones secundarias hasta la formación de polímeros de pesos moleculares altos [26].

Tabla 5. Índice de peróxidos de aceites usados y nuevo.

Muestras de aceites	meq O_2 /kg de muestra
ACU - Buñuelos	20,82
ACU - Empanadas	10,43
ACU - Pollo apanado	17,32
Aceite nuevo	2,30

➤ **Índice de saponificación**

El índice de saponificación esperado para los ACU es 180 - 200 mg KOH/g de muestra y acorde a los resultados obtenidos en la tabla 6, los ACU buñuelos y empanadas están por fuera del valor de referencia esperado, mostrando la presencia de impurezas en las muestras [8].

Tabla 6. Índice saponificación de aceites usados y nuevo.

Muestras de aceites	mg KOH/g de muestra
ACU - Buñuelos	201
ACU - Empanadas	205
ACU - Pollo apanado	196
Aceite nuevo	196

➤ **Densidad a 25 °C**

La densidad de los ACU puede variar entre 880 – 930 Kg/ m³ para lo cual se obtuvieron resultados de la tabla 7, acordes a lo esperado, lo que favorece la decantación del biodiesel durante su esterificación [8].

Tabla 7. Densidad 25°C de aceites usados y nuevo.

Muestras de aceites	Densidad (Kg/ m ³)
ACU - Buñuelos	919
ACU - Empanadas	913
ACU - Pollo apanado	912
Aceite nuevo	909

➤ **Perfil de ácidos grasos (FAME)**

El análisis de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas [anexo 1], mostró un cromatograma con picos pronunciados para los grupos característicos del Hexano utilizado como blanco y para el aceite nuevo, siendo las referencias para el análisis de los cromatogramas de los ACU de buñuelos, empanadas y pollo apanado que muestran distintos picos característicos de cada muestra.

3.2. Análisis de biodiesel

Una vez elaborados los biodiesel provenientes de los ACU y aceite nuevo, se procedió a su análisis a través de distintas pruebas que permitieron la caracterización del producto obtenido y su comparación frente a las especificaciones dadas por la normativa colombiana para biocombustibles NTC 5444.

➤ **Poder calorífico superior**

El poder calorífico medido para los biodiesel con especificación 17000 - 19000 BTU/lb, de acuerdo a los resultados de la tabla 8, se encuentran por debajo de especificaciones, sin embargo, se encuentran entre 16540 – 16997 BTU/lb lo que indica alta eficiencia energética del biodiesel.

Tabla 8. Poder calorífico superior del Biodiesel.

Muestras de biodiesel	BTU/lb
Buñuelos	16540
Empanadas	16807
Pollo apanado	16880
Nuevo	16997

➤ **Cenizas sulfatadas**

Los valores de cenizas sulfatadas con especificación máx. 0,02% masa, demostró para todos los resultados de biodiesel de la tabla 9, valores >0,02% masa indicando contaminación por metales alcalinos o alcalinotérreos y minerales.

Tabla 9. Cenizas sulfatadas del Biodiesel.

Muestras de biodiesel	% masa
Buñuelos	0,07
Empanadas	0,09
Pollo apanado	0,08
Nuevo	0,08

➤ **Punto de ignición**

El punto de ignición o inflamación de los biodiesel tienen especificación de mínimo 120 °C. Los biodiesel obtenidos como lo muestra la tabla 10, cumplen las especificaciones de alta calidad para un biodiesel con potencial para su uso como combustible, siendo menos inflamable y más seguro.

Tabla 10. Punto de ignición del Biodiesel.

Muestras de biodiesel	Temperatura (°C)
Buñuelos	134,9
Empanadas	134,6
Pollo apanado	136,6
Nuevo	139,4

➤ **Densidad a 15 °C**

La densidad de los biodiesel se obtuvo por picnometría y sus especificaciones son 860 - 900 Kg/ m³. En la tabla 11, se demostró valores superiores a la especificación y evidenció la presencia de ácidos grasos saturados en las muestras, así como una mayor longitud de las cadenas de carbono presentes.

Tabla 11. Densidad 15°C del Biodiesel.

Muestras de biodiesel	Densidad (Kg/ m ³)
Buñuelos	915
Empanadas	917
Pollo apanado	917
Nuevo	909

➤ **Contenido de agua (Método Karl Fischer)**

El contenido de agua de los biodiesel en su especificación debe ser 0,05 % y según los resultados de la tabla 12, son mayores a lo indicado, lo que puede afectar el rendimiento del combustible, así como promover su degradación por crecimiento microbiano.

Tabla 12. Contenido de agua (Karl Fischer) del Biodiesel.

Muestras de biodiesel	Contenido de agua (%)
Buñuelos	0,12
Empanadas	0,11
Pollo apanado	0,13
Nuevo	0,14

➤ **Índice de Yodo**

El índice de yodo con especificación de máximo 120 g I₂/100 g de muestra y de acuerdo con la tabla 13, mostró que todos los biodiesel cumplieron especificaciones, lo que garantiza un rendimiento y combustión adecuados.

Tabla 13. Índice de Yodo del Biodiesel.

Muestras de biodiesel	g I ₂ /100 g de muestra
Buñuelos	33
Empanadas	36
Pollo apanado	38
Nuevo	40

➤ **Índice de cetano**

El índice de cetano con especificación mínimo 47 y según lo obtenido en la tabla 14, se infiere que las muestras de biodiesel de pollo apanado y buñuelos, se encuentran por debajo de lo especificado, lo que puede afectar el arranque y combustión del biodiesel.

Tabla 14. Índice de cetano del Biodiesel.

Muestras de biodiesel	Índice de cetano
Buñuelos	46
Empanadas	48
Pollo apanado	46
Nuevo	47

➤ Viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática de los biodiesel de especificación 1,9 - 6,0 cSt y cuyos resultados de la tabla 15, permite observar que los biodiesel están entre 22,9 y 28,0 cSt, siendo muy altos para el valor especificado por la normativa, lo que podrá afectar el proceso de combustión y arranque.

Tabla 15. Viscosidad cinemática del Biodiesel.

Muestras de biodiesel	Centistokes (cSt)
Buñuelos	22,9
Empanadas	24,5
Pollo apanado	27,1
Nuevo	28,0

3.3. Rendimiento biodiesel

El rendimiento de los biodiesel obtenidos se observa en la tabla 16.

Tabla 16. Rendimiento biodiesel.

Muestras de biodiesel	Porcentaje (%)
Buñuelos	93
Empanadas	88
Pollo apanado	91
Nuevo	100

El rendimiento más bajo fue para el biodiesel empanadas con 93% y el más alto es de buñuelos de 88%, cercano al biodiesel de referencia.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados de análisis de los aceites usados y nuevo, fueron evaluados para evidenciar la relación entre su calidad y la de los biodiesel obtenidos, como se discutirá en esta sección.

4.1. Análisis de resultados de aceites de cocina usados y nuevo versus los valores esperados de acuerdo con la literatura:

4.1.1. Índice de peróxidos

Los ACU son aceites usados para freír alimentos en ellos, y, por tanto, no se les exige cumplir las especificaciones de un aceite sin uso. Es así como en parámetros como el índice de peróxido que para un aceite de palma sin uso debe ser menor a 1 meq de O₂/kg, para el ACU de empanadas dio 10,4, el de pollo apanado 17,3 y para el de buñuelos fue de 20,8. El índice de peróxido es una medición de la cantidad de oxígeno enlazado químicamente al aceite (NTC 236), este proceso sucede cuando los ácidos grasos insaturados reaccionan con el oxígeno en el aire produciendo "rancidez" (mal olor). Este enranciamiento oxidativo, se produce por la oxidación de los dobles enlaces de los ácidos grasos insaturados formando peróxidos o hidroperóxidos, los cuales posteriormente se polimerizan y se descomponen formando aldehídos, cetonas y ácidos de menor tamaño [24], este proceso es

catalizado por la luz, el calor o los metales, parámetros a los cuales los ACU están expuestos en el momento de freír alimentos en ellos, por eso es de esperarse estos valores.

4.1.2. Humedad, material volátil y contenido de agua

La humedad en los aceites comestibles no es recomendable debido a que promueve la degradación por hidrólisis [9] produciendo rancidez o crecimiento microbiano, en el caso de la producción de biocombustibles, se debe evitar puesto que en el proceso de la transesterificación puede producir la saponificación de la grasa obteniendo bajos rendimientos del biocombustible. Este parámetro se cuantificó inicialmente mediante pérdida por secado (NTC 287) en donde el ACU de empanadas no tuvo pérdidas por este método, el de buñuelos tenía solo 0,03% el de pollo apanado mostro la mayor humedad con 0,129%. Al calentar los ACU a estas temperaturas, puede suceder que una ganancia de masa por peroxidación [11], por ello se determinó el contenido de agua mediante el método Karl Fischer, específico para cuantificarlo. Estos datos, igual que los de pérdida por secado, muestran al ACU de pollo apanado con el contenido de agua más alto con 0,17%, mientras que el ACU de buñuelos y empanadas muestran un contenido de aproximadamente la mitad (0,09 y 0,07% respectivamente). Esto puede deberse a una mayor liberación de agua al aceite al freír los pollos y durante el calentamiento una menor tasa de evaporación.

4.1.3. Índice de saponificación

El índice de saponificación mide la cantidad de base necesaria para saponificar cierta cantidad de ácidos grasos. En el caso de los ACU, por acción del calor sometido en la fritura, el contacto con el agua de los alimentos que se fríen en él y la acción del oxígeno sucede un aumento de la oxidación e hidrólisis de los triglicéridos con su posterior aumento de este índice, así vemos que, en el caso del aceite sin usar, aceite nuevo, el índice de saponificación es de 196 mg KOH/g. En el ACU de pollo apanado también es de 196 y se observa como para los ACU de empanas y buñuelos es más alto (205 y 201 mg KOH/g), es probable que al freír las porciones de pollo apanado que son de mayor tamaño, el aceite no se caliente tanto. Por ende, para los ACU de buñuelos y empanadas, hay una mayor producción de ácidos grasos libres [10], que consumen más KOH en la reacción.

4.1.4. Índice de acidez

En el índice de acidez se ven marcadas las diferencias entre los ACU y el aceite sin usar. El aceite nuevo solo registro una acidez de 0,19 mg de KOH/g mientras que los ACU de buñuelos, empanadas y pollo apanado marcaron un 2,94, 1,68 y 4,66 mg de KOH/g respectivamente. Este parámetro igual que la saponificación, es afectado por el calentamiento y la oxidación del aceite en el proceso de cocción, produciendo la hidrólisis de los triglicéridos a ácidos grasos libres que aumentan el consumo de álcali en el momento de la valoración [10].

4.1.5. Densidad a 25 °C

Aunque puede existir alguna disminución por evaporación de volátiles después del calentamiento, es probable que el aumento que se observa en los ACU, se deba a oxidación catalizada por el calentamiento, produciendo peroxidación y con ello un incremento del peso por ingreso del oxígeno, con su consecuente aumento de densidad comparado con el aceite sin uso. Los sólidos remanentes de las frituras que no quedaron retenidos en la filtración inicial de los ACU [11] pueden aumentar la densidad.

4.1.6. Perfil de ácidos grasos (FAME)

En los aceites de palma es característica la presencia de ácidos grasos oleico, palmítico y en menores proporciones ácidos grasos esteárico y linoleico [21] [22]. En el aceite nuevo se detectó la presencia de una pequeña cantidad de ácido linoleico (0,3%), que no se encontró en los ACU, es probable que haya sufrido degradación por el calentamiento y por eso no se detectó en los aceites usados [23]. En el ACU de pollo apanado, se encontró un porcentaje de palmitoleico anormalmente alto en comparación con los demás, posiblemente por la procedencia o mezclas de aceites del sitio de comidas. En la tabla 17 se muestran los diferentes porcentajes de ácidos grasos presentes en los biodiesel originados a partir de los aceites en estudio, tomados de la altura de los picos en los cromatogramas [anexo 1] obtenidos por Cromatografía de Gases-Masas (GC-MS).

Tabla 17. Porcentaje de ácidos grasos en biodiesel obtenidos y cuantificados por GC-MS.

Nombre en cromatograma	Nombre común	Biodiesel buñuelos %	Biodiesel empanadas %	Biodiesel pollo apanado %	Biodiesel nuevo %
9-Hexadecenoic acid, methyl es	Éster metílico del ácido palmitoleico	2	2	18	2
Hexadecanoic acid, methyl ester	Éster metílico del ácido palmítico	26	28	21	33
9-Octadecenoic acid, methyl ester	Éster metílico del ácido oleico	40	42	33	49
Heptadecanoic acid, 16-methyl-	Estearato de metilo	17	17	16	11
9,12,15-Octadecatrienoic acid	Ester metílico del ácido linoleico	0	0	0	0,3

4.2. Análisis de resultados de los biodiesel obtenidos

Los resultados obtenidos de la caracterización de los biodiesel se evaluaron frente a la NTC 5444 “Biodiesel para uso en motores diésel. Especificaciones”.

4.2.1. Poder calorífico superior

Los resultados de poder calorífico, muestran valores cercanos a la especificación del límite inferior para un biocombustible, observándose una ligera diferencia entre los resultados, siendo más alta para el biodiesel de buñuelos y menor para el aceite de empanadas y nuevo. Un menor poder calorífico indica la presencia de ácidos grasos libres e insaturados de cadena corta en las muestras (Índice de acidez), compuestos degradantes (Índice de peróxidos), impurezas (índice de saponificación) y condiciones del proceso de transesterificación que dificultan la decantación para una óptima reacción (Densidad) [7] [8].

El biodiesel proveniente del ACU - Buñuelos mostró un valor de acidez de 2,94 mg KOH/g de muestra, el más alto índice de peróxidos de 20,82 meq O₂/kg de muestra, índice de saponificación de 201 mg KOH/g de muestra y una alta densidad que dificultó la decantación del biodiesel (919 Kg/ m³), estas condiciones afectaron directamente su eficiencia energética, siendo el más bajo poder calorífico de los biocombustibles.

Por otra parte, el poder calorífico del biodiesel de ACU – Pollo apanado es más cercano al valor de referencia del biodiesel proveniente del aceite Nuevo y a su vez, próximos a la especificación. El aceite usado de pollo apanado mostró acidez de 4,66 mg KOH/g de muestra, índice de peróxidos de 17,32 meq O₂/kg de muestra, índice de saponificación de 196 mg KOH/g de muestra y densidad de 912 Kg/ m³; estas tres últimas variables son más bajas que en el biodiesel de buñuelos, demostrando menos impurezas y debido a su porcentaje de pérdida de materia volátil de 0,1%. Este biodiesel contó con una menor probabilidad de afectación negativa en su calidad y rendimiento.

4.2.2. Cenizas sulfatadas

Las cenizas sulfatadas indican el contenido de residuos no combustibles que pueden ser abrasivos para el motor [12], estos residuos en los ACU pueden generarse por los mismos productos freídos en él, en la síntesis del biodiesel, o por minerales provenientes de aceites que no se pierden en la incineración. Los resultados para todos los aceites, incluido el aceite sin usar, están por encima de las especificaciones (<0,02%). No se le podría atribuir a residuos de las frituras, ni a contaminación en la síntesis, estos altos niveles de cenizas sulfatadas, puesto que no presentan alta variación con respecto a los resultados del aceite nuevo. Por lo cual se deduce que está relacionado a la calidad del aceite utilizado.

4.2.3. Punto de ignición

Los resultados obtenidos para el punto de ignición son >120 °C y cumplen lo establecido por la NTC 5444, demostrando ser biocombustibles de alta resistencia a la presión y estabilidad térmica. El biodiesel de empanadas con un valor de $134,6$ °C tiene el más bajo punto de inflamación, siendo $3,4\%$ menos que el biodiesel nuevo y el biodiesel de pollo apanado de $136,6$ C varía $2,0\%$ respecto al biodiesel de referencia.

La disminución del punto de ignición de los biodiesel provenientes de aceites de cocina usados versus el aceite de referencia nuevo, se debe a su tipo de uso, puesto que al ser designados para freír alimentos con alto contenido de proteínas o carbohidratos, se generan compuestos de degradación volátiles como ácidos grasos libres insaturados, aldehídos, cetonas, ésteres de bajo peso molecular y entre otros, favoreciendo la degradación térmica de los biodiesel obtenidos y esto se ve relacionado al índice de saponificación del ACU que proviene, como el de las empanadas, que al tener el índice más alto de los biocombustibles (205 KOH/g de muestra) evidencia mayor contenido de subproductos indeseados como ácidos grasos libres y monoglicéridos [14]. Por otro lado, el ACU pollo apanado con 196 KOH/g de muestra, mostró un menor contenido de los subproductos no deseados que afectan el punto de ignición de la muestra.

4.2.4. Densidad a 15 °C

La densidad de los biodiesel obtenidos mostró el resultado más bajo para el biocombustible proveniente del aceite nuevo (909 Kg/ m^3), seguido del biodiesel buñuelos (915 Kg/ m^3) y la más alta densidad de 917 Kg/ m^3 se observó para los biodiesel de ACU empanadas y pollo apanado. La densidad en los biocombustibles se hace mayor a medida que estos contienen más ácidos grasos saturados e indica menor presencia de ácidos grasos libres insaturados o compuesto de degradación, lo que determinó que los biodiesel presentan un alto contenido de compuestos de cadenas carbonadas de larga longitud y, por tanto, una alta estabilidad [13] [14].

4.2.5. Contenido de agua (Karl Fischer)

Los resultados del contenido de agua de Karl Fischer para todos los biodiesel obtenidos son superiores al $0,05\%$ especificado por la NTC 5444, siendo más alto para el biodiesel pollo apanado $0,13\%$ y el de referencia o nuevo $0,14\%$, por otro lado, el biodiesel de empanadas contiene el valor más bajo $0,11\%$, seguido del de buñuelos $0,12\%$.

Ahora bien, en comparación con el contenido de agua de los aceites de cocina de los cuales provienen los biodiesel, la humedad se incrementó después de la reacción de transesterificación, lo que puede indicar que después del proceso de lavado del catalizador de las muestras, el secado de los biodiesel con Sulfato de Sodio Anhidro por filtración de gravedad, no se realizó con alta eficiencia, por lo cual se podría evaluar a futuro una mejor alternativa para la metodología de deshidratación. Además, existe la posibilidad de separación incompleta de subproductos (glicerina) durante la transesterificación, aportando al aumento del contenido de agua, así como afecta directamente su calidad y rendimiento por la degradación del biodiesel [13].

4.2.6. Índice de Yodo

El índice de yodo es una medida de la cantidad de insaturaciones de ácidos grasos presentes en la muestra. La valoración calcula la cantidad de gramos de yodo que se consume en la reacción química de adición con los dobles enlaces presentes en los ácidos grasos insaturados [15]. En el caso del biodiesel, cuanto mayor sea el índice de yodo, mayor será la cantidad de ácidos grasos insaturados que tiene., esto puede afectar sus propiedades de resistencia y estabilidad a la oxidación; por tanto, en los biodiesel, se prefieren que este índice sea lo más bajo posible. En los ACU se obtuvo menor índice de yodo comparado con el aceite sin uso (nuevo), fenómeno que se puede explicar por el calentamiento al que se someten los ACU, el cual favorece la ruptura de los dobles enlaces [16]. En el momento de la valoración de este parámetro, los ácidos grasos de los aceites calentados han perdido dobles enlaces. La valoración muestra como el ACU de buñuelos tiene el menor índice con 33 $gI_2/100g$, seguido por el de empanadas con 36 y finalmente el de pollo apanado con 38 . Nuevamente se podría afirmar que, en el caso del pollo apanado, por su mayor tamaño, alcanzo menores temperaturas y esto evito mayores rupturas de insaturaciones.

4.2.7. Índice de cetano de los biodiesel

El índice de cetano depende de las características químicas del biodiesel, este parámetro es de suma importancia, debido a que mide la calidad de ignición del combustible. Cuanto más alto sea el índice del biodiesel, menor es el retraso en la ignición ayudando a un mejor arranque del motor, además de disminuir las emisiones de humo debido a la combustión más suave y completa [17]. La NTC 5444 para el índice de cetano tiene un mínimo de 47 para este parámetro, solo el ACU de empanadas con 48 cumple la especificación.

4.2.8. Viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática de los biocombustibles es un análisis crucial para la evaluación de la calidad del biodiesel, puesto que determina su comportamiento en el bombeo, atomización y combustión al interior del motor. Los resultados obtenidos con la metodología alternativa planteada en esta investigación, mostró para que el biodiesel buñuelos 22,9 cSt fu el valor más bajo, seguido de biodiesel empanadas 24,5 cSt, pollo apanado 27,1 cSt y biodiesel de referencia nuevo 28,0 cSt, siendo el más alto. El incremento en la viscosidad cinemática es proporcional con el alto contenido de ácidos grasos saturados y libres que aumentan la probabilidad de degradación del biocombustible, así mismo, la separación incompleta del biodiesel y los subproductos generados durante la transesterificación pudo dejar residuos de glicerina en el producto obtenido y haber incrementado la viscosidad del fluido, lo que es consecuente con los resultados de factores que afectaron la calidad del biocombustible, evidenciado a través de las pruebas de % del contenido de agua (Karl Fischer), densidad a 15°C, % masa de cenizas sulfatadas y poder calorífico superior que presentaron variaciones frente a las especificaciones dadas por la normativa [18] [19].

Finalmente, aunque la metodología utilizada como alternativa se basó en la relación entre la viscosidad dinámica y principios de la mecánica de fluidos, que ofrece una mayor versatilidad y análisis más rápido que los métodos clásicos, se debe tener en cuenta que su precisión es menor debido al comportamiento no newtoniano del biocombustible, puesto que su viscosidad no es constante y varía en función de la velocidad programada en el viscosímetro; además, su comportamiento puede deberse a la presencia de macromoléculas o compuestos carbonados de cadenas largas como polímeros, ceras o glicerina que pueden formar estructuras tridimensionales en el fluido, así como la posibilidad de emulsiones y micelas presentes que pudieron afectar los resultados obtenidos para la viscosidad cinemática [14] [20].

5. CONCLUSIONES

La caracterización fisicoquímica exhaustiva de los tres aceites de cocina usados y la posterior producción de biodiésel por transesterificación, demostró que el biodiésel derivado del ACU - pollo apanado presenta las propiedades más favorables entre las muestras evaluadas con niveles más bajos de peróxidos, índice de saponificación y densidad, en comparación con los otros biodiéseles, siendo resultados más cercanos al biodiésel de referencia de aceite de palma sin usar. Además, el biodiésel de pollo apanado mostró un valor de poder calorífico y contenido de cenizas sulfatadas superiores y próximas al biodiesel de referencia, lo que indica su potencial de mayor eficiencia energética y menor cantidad de impurezas. Por otra parte, el biodiésel de empanadas mostró el punto de ignición más bajo, la más alta densidad, alto contenido de agua y yodo, sugiriendo una composición menos óptima en comparación con el biodiésel de pollo apanado. El análisis del índice de cetano y de viscosidad cinemática también evidenció la calidad superior del biodiésel procedente del ACU - pollo apanado.

En conclusión, el biodiésel derivado de pollo apanado se destacó como el biocombustible más adecuado en base a sus propiedades fisicoquímicas y alto rendimiento (91%). El proceso de producción de biodiésel puede incluir mejoras potenciales como la optimización de las condiciones de reacción de transesterificación para minimizar las impurezas y aumentar el rendimiento, aplicación de técnicas de medición más precisas, sistema de purificación más eficiente para reducir el contenido de humedad, y la exploración de materias primas alternativas para la producción de biodiésel mejorando la sostenibilidad ambiental y viabilidad económica.

6. AGRADECIMIENTOS

La investigación realizada se logró gracias a todos los involucrados que participaron en su planteamiento y desarrollo.

Extendiendo un cordial reconocimiento a la Universidad Santiago de Cali por la disposición de laboratorios y equipamiento necesario para los análisis realizados, la disponibilidad de plataformas de consulta bibliográfica en revistas, libros y artículos científicos, el personal calificado para el asesoramiento del proyecto a cargo del director principal Ricardo Andrés Tusso y segundo director Yesid Fabián Zambrano Salgado, así mismo se agradece a cada persona que apoyo de forma indirecta al crecimiento profesional e integral de los autores. Finalmente, se aclara que no existe conflicto de intereses entre los autores.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INFORME REGIONAL ACEITE DE COCINA USADO-ACU. (2022) <https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/2022-12/INFORME%20REGIONAL%20PB%202021%20ACEITE%20DE%20COCINA%20USADO.pdf>
- [2] Foteinis, Spyros, Efthalia Chatzisyneon, Alexandros Litinas, and Theocharis Tsoutsos. 2020. "Used-Cooking-Oil Biodiesel: Life Cycle Assessment and Comparison with First- and Third-Generation Biofuel." *Renewable Energy* 153: 588–600. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148120302081>.
- [3] Sharma, P et al. 2021. "Evaluation of Various Waste Cooking Oils for Biodiesel Production: A Comprehensive Analysis of Feedstock." *Waste Management* 136: 219–29. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85117731803&doi=10.1016%2Fj.wasman.2021.10.022&partnerID=40&md5=cc974a9d7fb114a65fff7838d48706f1>.
- [4] Maleki, Basir et al. 2023. "Transesterification of Waste Cooking Oil to Biodiesel by Walnut Shell/Sawdust as a Novel, Low-Cost and Green Heterogeneous Catalyst: Optimization via RSM and ANN." *Industrial Crops and Products* 193: 116261. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669023000250>.
- [5] Orjuela, Alvaro, and James Clark. 2020. "Green Chemicals from Used Cooking Oils: Trends, Challenges, and Opportunities." *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 26: 100369. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452223620300584>.
- [6] Vilas Bôas, Renata N., Marisa F. Mendes, Renata N. Vilas Bôas, and Marisa F. Mendes. 2022. "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." *Journal of the Chilean Chemical Society* 67(1): 5433–44. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-97072022000105433&lng=en&nrm=iso&tlng=en (October 10, 2023).
- [7] Khan, S. U., Sadr, M. H., & Hameed, B. (2019). A comprehensive review on biodiesel production from various feedstocks and catalytic techniques: A journey towards commercialization. *Fuel Processing Technology*, 188, 106188. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.03.006>
- [8] Acevedo, L. F., & Posso, C. E. (2019). Biodiesel preparado a partir de aceite residual de restaurantes. Una revisión sistemática 2009-2019. *Información Tecnológica*, 30(2), 141-153.
- [9] Ramírez, Juliana Cárdenas et al. 2022. "Deacidification of Used Cooking Oils by Solvent Extraction under Lab Scale and in a Falling Film Contactor." *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification* 181: 109089. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0255270122002987>.
- [10] Wazed MA, Yasmin S, Basak P, Hossain A, Rahman MM, Hasan MR, et al. Evaluation of physicochemical parameters of edible oils at room temperature and after heating at high temperature. *Food Res [Internet]*. 2023;7(4):91–100. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85169620264&doi=10.26656%2Ffr.2017.7%284%29.900&partnerID=40&md5=d437dde2939069dec72f8a20ddc3d89c>

- [11] Salguero, H. S., Morejón, F. B., & Carranza, C. C. (2019). Componentes presentes en el aceite de fritura usado y determinantes previos a su conversión en biodiésel. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 22(44), 33-38.
- [12] Castellanos Espitia, K. A., & Daza Hernández, L. A. (2020). Evaluación de la síntesis de biodiésel mediante el uso de residuos de Aguacate Hass (semilla) empleando el método de transesterificación.
- [13] Atadas, A. M., & Sakae, K. (2020). Effect of fatty acid composition on cloud point and pour point of biodiesel. *Fuel*, 269, 122166.
- [14] Verma, P., & Sharma, Y. P. (2019). Impact of free fatty acids on biodiesel production: A review. *Fuel*, 253, 113431.
- [15] BASTO-FLOREZ, L. E., MILLÁN-ALVARADO, S. A., MEDINA-CABALLERO, L. F., MORA-VERGARA, L. Z., & CABALLERO-HERNÁNDEZ, Y. T. (2022). Estudio del biodiésel obtenido a partir de aceite de Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* Linneo). *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 20(1), 41-53.
- [16] Santana-Alcántar, M. E., Mendívil-Morales, M., Félix-Ibarra, L. I., Ramírez-Murillo, M., & Cruz-Rosales, C. A. (2019). Composición química y calidad de la grasa contenida en frituras de maíz elaboradas y consumidas en Navojoa, estado de Sonora, México. *Perspectivas en Nutrición Humana*, 21(1), 17-26.
- [17] Cubillos, A. A. E., Tobón, A. E. D., & Vargas, S. A. C. (2019). Estimación teórica del efecto de la temperatura en la densidad, viscosidad, poder calorífico, capacidad calorífica y gravedad API de biocombustibles. *Scientia et Technica*, 24(2), 190-199.
- [18] Kuchling, H., & Kuchling, T. (2022). Taschenbuch der Physik. <https://doi.org/10.3139/9783446473645>
- [19] Hoyos, L. (2022, 6 julio). Poise-Stokes Converter. <https://www.calctool.org/fluid-mechanics/poise-stokes-converter>
- [20] Nogueira, M. C. L., Rocha, F. D. A., & Gonçalves, R. L. (2019). Biodiesel production using waste cooking oil: Optimization of reaction parameters using response surface methodology. *Journal of Cleaner Production*, 220, 628-636. [<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.064>]
- [21] Chaves Yela, J. A., Ortiz Tobar, D. P., Bahos Ordoñez, E. M., Ordoñez Forero, G. A., & Villota Padilla, D. C. (2020). Análisis del perfil de ácidos grasos y propiedades fisicoquímicas del aceite de palma de mil pesos (*Oenocarpus Bataua*). *Perspectivas en nutrición humana*, 22(2), 175-188.
- [22] Saad, M., Siyo, B., & Alrakkad, H. (2023). Preparation and characterization of biodiesel from waste cooking oils using heterogeneous Catalyst (Cat. TS-7) based on natural zeolite. *Heliyon*, 9(6).
- [23] Santana-Alcántar, M. E., Mendívil-Morales, M., Félix-Ibarra, L. I., Ramírez-Murillo, M., & Cruz-Rosales, C. A. (2019). Composición química y calidad de la grasa contenida en frituras de maíz elaboradas y consumidas en Navojoa, estado de Sonora, México. *Perspectivas en Nutrición Humana*, 21(1), 17-26.
- [24] Segurondo Loza, R., & Cortez Quisbert, V. (2020). Determinación de la rancidez en aceites usados en el proceso de frituras en establecimientos de expendio de comida rápida. *Revista Con-ciencia*, 8(2), 115-128.
- [25] Guachamín Zambrano, P. W. (2021). Cuantificación de ácidos grasos de aceites comestibles reutilizados en la elaboración de alimentos en la ciudad de Ambato por cromatografía de gases con detector de espectrometría de masas (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología. Carrera de Ingeniería Bioquímica).
- [26] Mero Benavides, M. B., & Barcia, A. (2022). Estudio cinético de secado de aceite reciclado de una empresa de alimentos para la producción de biodiésel (Doctoral dissertation, ESPOL. FCNM).

ANEXO 1: Cromatogramas del perfil de ácidos grasos (FAME)

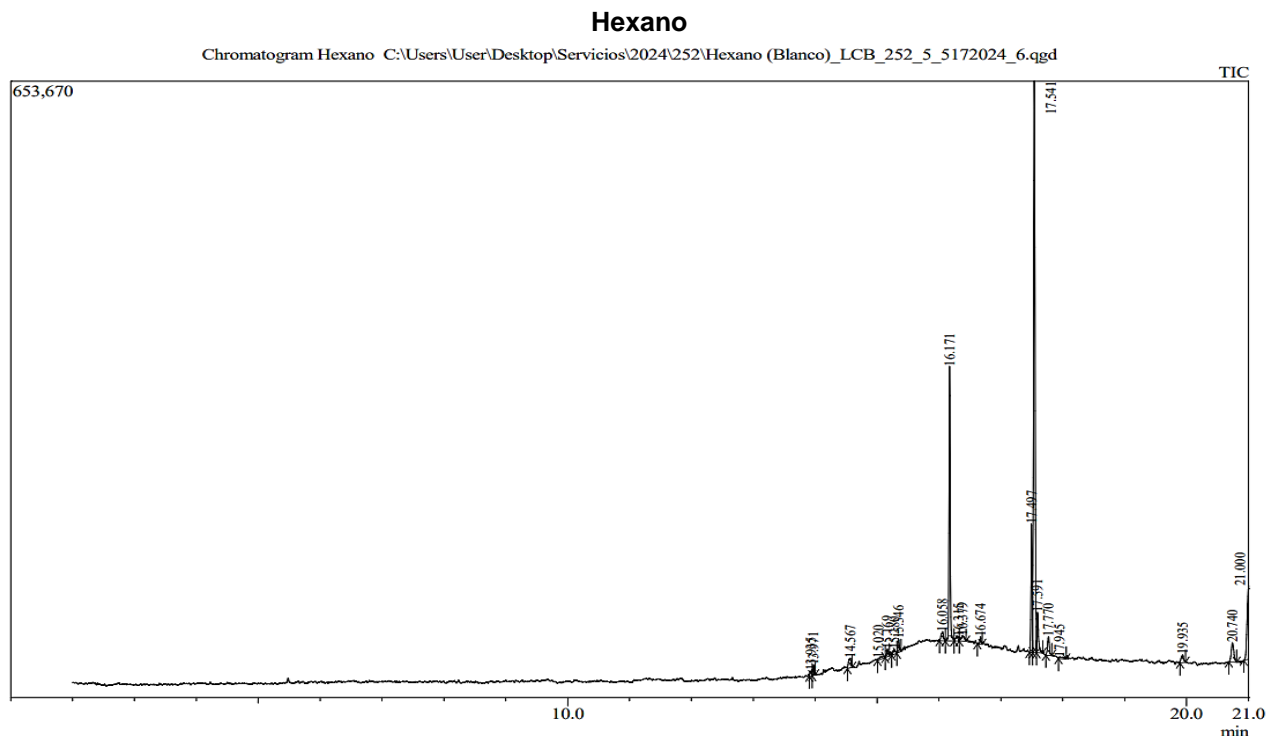


Gráfico 1. Cromatograma FAME – Hexano.

TABLA 18. Reporte de picos – Hexano.

Peak Report TIC										
Peak#	R.Time	I.Time	F.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Mark	Name
1	13.935	13.905	13.950	11408	0.51	5430	0.42	2.10	V	Cyclooctasiloxane, hexadecame
2	13.971	13.950	14.000	15204	0.68	11041	0.86	1.38	V	1,2-Benzenedicarboxylic acid, d
3	14.567	14.520	14.600	30206	1.35	10263	0.80	2.94	V	Benzene, 1,3,5-tri-tert-butyl-
4	15.020	15.005	15.130	13903	0.62	2127	0.16	6.54		Tetrapentacontane
5	15.169	15.130	15.200	19204	0.86	8159	0.63	2.35	V	Cyclododecasiloxane, tetracosar
6	15.280	15.235	15.320	11852	0.53	4983	0.39	2.38	V	Silicic acid, diethyl bis(trimethy
7	15.346	15.320	15.390	23985	1.07	14450	1.12	1.66		Phenol, 2-(1,1-dimethylethyl)-4-
8	16.058	16.010	16.105	24926	1.12	9817	0.76	2.54		Eicosyl isopropyl ether
9	16.171	16.105	16.245	379013	16.98	291392	22.58	1.30		Hexadecanoic acid, methyl ester
10	16.315	16.245	16.330	17936	0.80	4726	0.37	3.80	V	8-Chloro-8-methyl-cis-8-silabic
11	16.379	16.330	16.435	20918	0.94	5950	0.46	3.52	V	9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z
12	16.674	16.620	16.700	11516	0.52	8015	0.62	1.44	V	1,4-Benzenediol, 2,5-bis(1,1-dir
13	17.497	17.460	17.515	221209	9.91	136505	10.58	1.62		9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z
14	17.541	17.515	17.575	973278	43.61	606069	46.96	1.61	V	9-Octadecenoic acid (Z)-, methy
15	17.591	17.575	17.675	80511	3.61	42802	3.32	1.88	SV	9-Octadecenoic acid (Z)-, methy
16	17.770	17.725	17.820	38320	1.72	20044	1.55	1.91		Heptadecanoic acid, 16-methyl-
17	17.945	17.930	18.055	11601	0.52	1955	0.15	5.93		Atriplexinol
18	19.935	19.895	19.985	23438	1.05	8328	0.65	2.81	V	Glycidyl palmitate
19	20.740	20.685	20.810	59391	2.66	20528	1.59	2.89		7-Butyl-1-hexyl-1,2,3,4-tetrahy
20	21.000	20.925	21.070	243815	10.93	77977	6.04	3.13		1-(5,6,7,8-Tetrahydro-8,9,9(or 5
				2231634	100.00	1290561	100.00			

Biodiesel nuevo

Chromatogram Biodiesel Huevo C:\Users\User\Desktop\Servicios\2024\252\Biodiesel Huevo_LCB_252_1_5172024_1.ogd

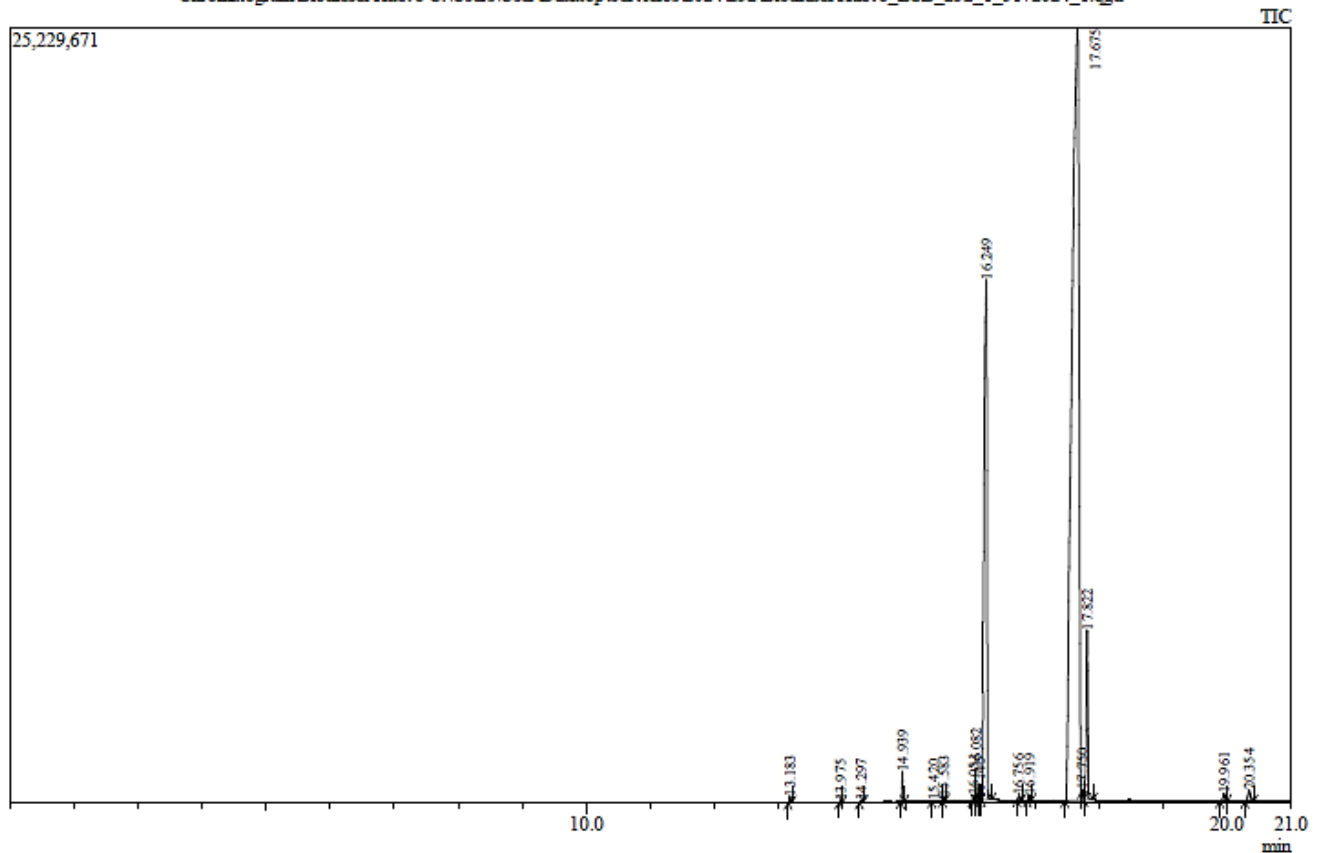


Gráfico 2. Cromatograma FAME – Biodiesel nuevo.

TABLA 19. Reporte de picos - Biodiesel nuevo.

Peak Report TIC										
Peak#	R.Time	I.Time	F.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Mark	Name
1	13.183	13.150	13.215	266014	0.10	209848	0.41	1.27		Dodecanoic acid, methyl ester
2	13.975	13.945	14.005	78942	0.03	59619	0.12	1.32		1,2-Benzenedicarboxylic acid, d
3	14.297	14.265	14.330	80761	0.03	59834	0.12	1.35		Diphenylamine
4	14.939	14.905	14.975	1035643	0.40	989714	1.93	1.05		Myristic acid, methyl ester
5	15.420	15.400	15.565	26048	0.01	14302	0.03	1.82		4-(3H-Imidazo[4,5-b]pyridin-2-
6	15.583	15.565	15.610	139632	0.05	133861	0.26	1.04	V	Methyl 13-methyltetradecanoate
7	16.051	16.025	16.060	164194	0.06	143886	0.28	1.14		9-Hexadecenoic acid, methyl est
8	16.082	16.060	16.125	1330955	0.52	1020645	1.99	1.30	V	9-Hexadecenoic acid, methyl est
9	16.145	16.125	16.170	38241	0.01	29602	0.06	1.29	V	9-Hexadecenoic acid, methyl est
10	16.249	16.170	16.340	50129047	19.56	16935505	32.99	2.96		Hexadecanoic acid, methyl ester
11	16.756	16.725	16.810	228163	0.09	154381	0.30	1.48		(Z)-10-heptadecenoic acid meth
12	16.919	16.885	16.960	239449	0.09	175897	0.34	1.36		Hexadecanoic acid, 15-methyl-,
13	17.675	17.470	17.775	191182837	74.58	25131402	48.95	7.61	S	9-Octadecenoic acid, methyl est
14	17.750	17.735	17.775	160387	0.06	136169	0.27	1.18	T	9,12,15-Octadecatrienoic acid, r
15	17.822	17.775	17.920	9666068	3.77	5520775	10.75	1.75	V	Heptadecanoic acid, 16-methyl-,
16	19.961	19.895	20.015	630323	0.25	251898	0.49	2.50		11-Eicosenoic acid, methyl ester
17	20.354	20.285	20.430	949576	0.37	370628	0.72	2.56		Eicosanoic acid, methyl ester
				256346280	100.00	51337966	100.00			

Biodiesel buñuelos

Chromatogram Biodiesel Buñuelos C:\Users\User\Desktop\Servicios\2024\252\Biodiesel Buñuelos_LCB_252_3_5172024_3.qgd

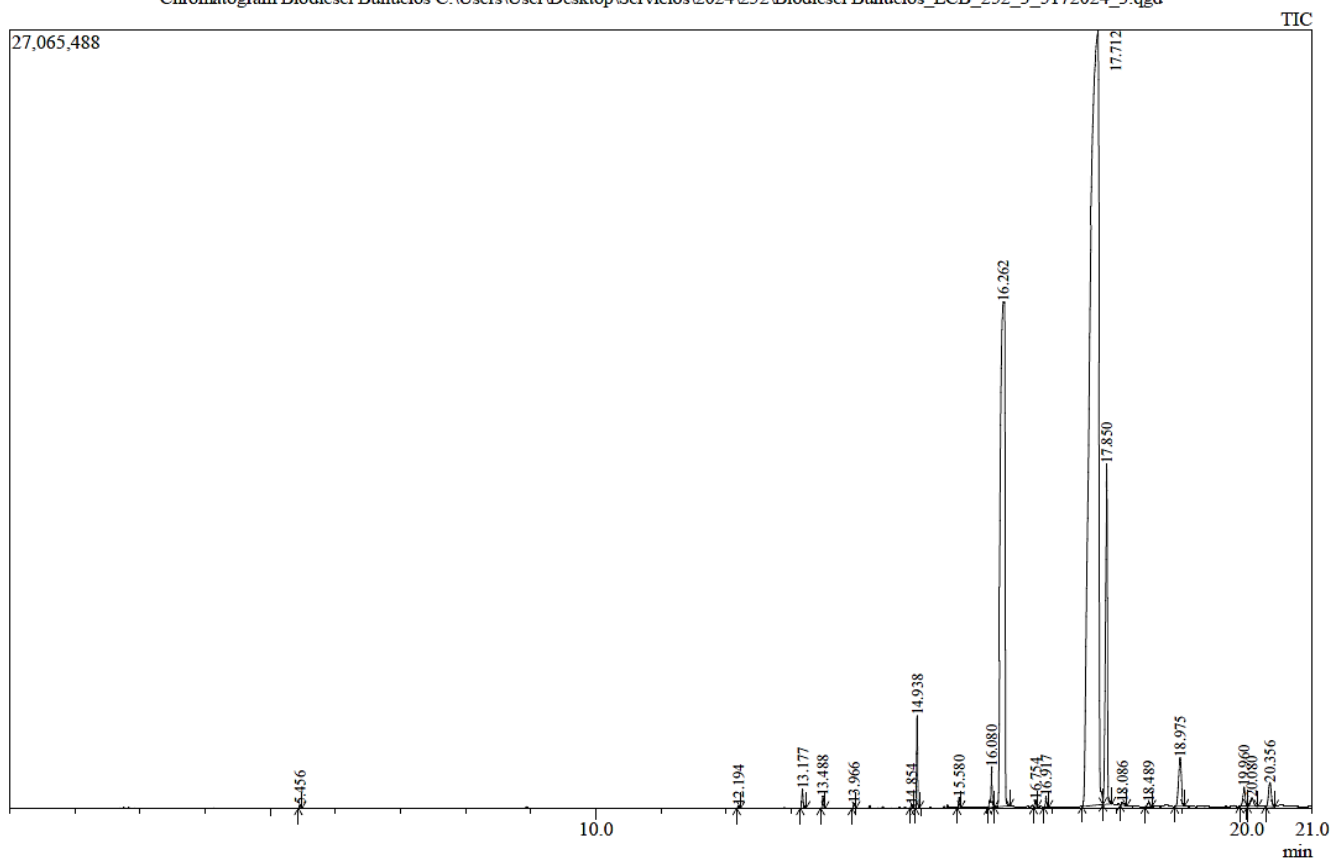


Gráfico 3. Cromatograma FAME – Biodiesel buñuelos.

TABLA 20. Reporte de picos - Biodiesel buñuelos.

Peak Report TIC										
Peak#	RTime	I.Time	FTime	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Mark	Name
1	5.456	5.430	5.490	134481	0.04	108130	0.16	1.24		Octanoic acid, ethyl ester
2	12.194	12.165	12.230	118629	0.03	75901	0.11	1.56		Octanedioic acid, dimethyl ester
3	13.177	13.140	13.230	861354	0.23	655083	0.97	1.31		Dodecanoic acid, methyl ester
4	13.488	13.455	13.525	513770	0.14	409863	0.61	1.25		Azelaic acid, dimethyl ester
5	13.966	13.935	14.000	223128	0.06	161594	0.24	1.38		Phthalic acid, ethyl 2-methoxyb
6	14.854	14.830	14.880	118517	0.03	109428	0.16	1.08		Myristoleic acid methyl ester
7	14.938	14.905	14.975	3545212	0.93	3208262	4.77	1.11		Myristic acid, methyl ester
8	15.580	15.550	15.610	364189	0.10	367514	0.55	0.99		Methyl 13-methyltetradecanoate
9	16.080	16.025	16.125	2186967	0.58	1407363	2.09	1.55		9-Hexadecenoic acid, methyl est
10	16.262	16.125	16.360	82448518	21.68	17553619	26.12	4.70	V	Hexadecanoic acid, methyl ester
11	16.754	16.725	16.790	381497	0.10	255034	0.38	1.50	V	(Z)-10-heptadecenoic acid meth
12	16.917	16.880	16.960	589082	0.15	387208	0.58	1.52		Hexadecanoic acid, 15-methyl-
13	17.712	17.470	17.790	252703375	66.44	26939564	40.09	9.38		9-Octadecenoic acid, methyl est
14	17.850	17.790	17.925	25592189	6.73	11837024	17.62	2.16	V	Heptadecanoic acid, 16-methyl-
15	18.086	18.055	18.155	298210	0.08	106269	0.16	2.81		Ethanol, 2-[2-(4-nonylphenoxy)
16	18.489	18.435	18.545	347115	0.09	140751	0.21	2.47		Methyl 9-cis,11-trans-octadecad
17	18.975	18.895	19.045	4853665	1.28	1689222	2.51	2.87		Fumaric acid, 3-methylbutyl trid
18	19.960	19.890	20.010	1685084	0.44	658872	0.98	2.56		11-Eicosenoic acid, methyl ester
19	20.080	20.010	20.170	1012632	0.27	290578	0.43	3.48	V	Methyl 13,16-docosadienoate
20	20.356	20.285	20.430	2356375	0.62	835365	1.24	2.82		Eicosanoic acid, methyl ester
				380333989	100.00	67196644	100.00			

Biodiesel empanadas

Chromatogram Biodiesel Empanadas C:\Users\User\Desktop\Servicios\2024\252\Biodiesel Empanadas_LCB_252_2_5172024_2.qgd

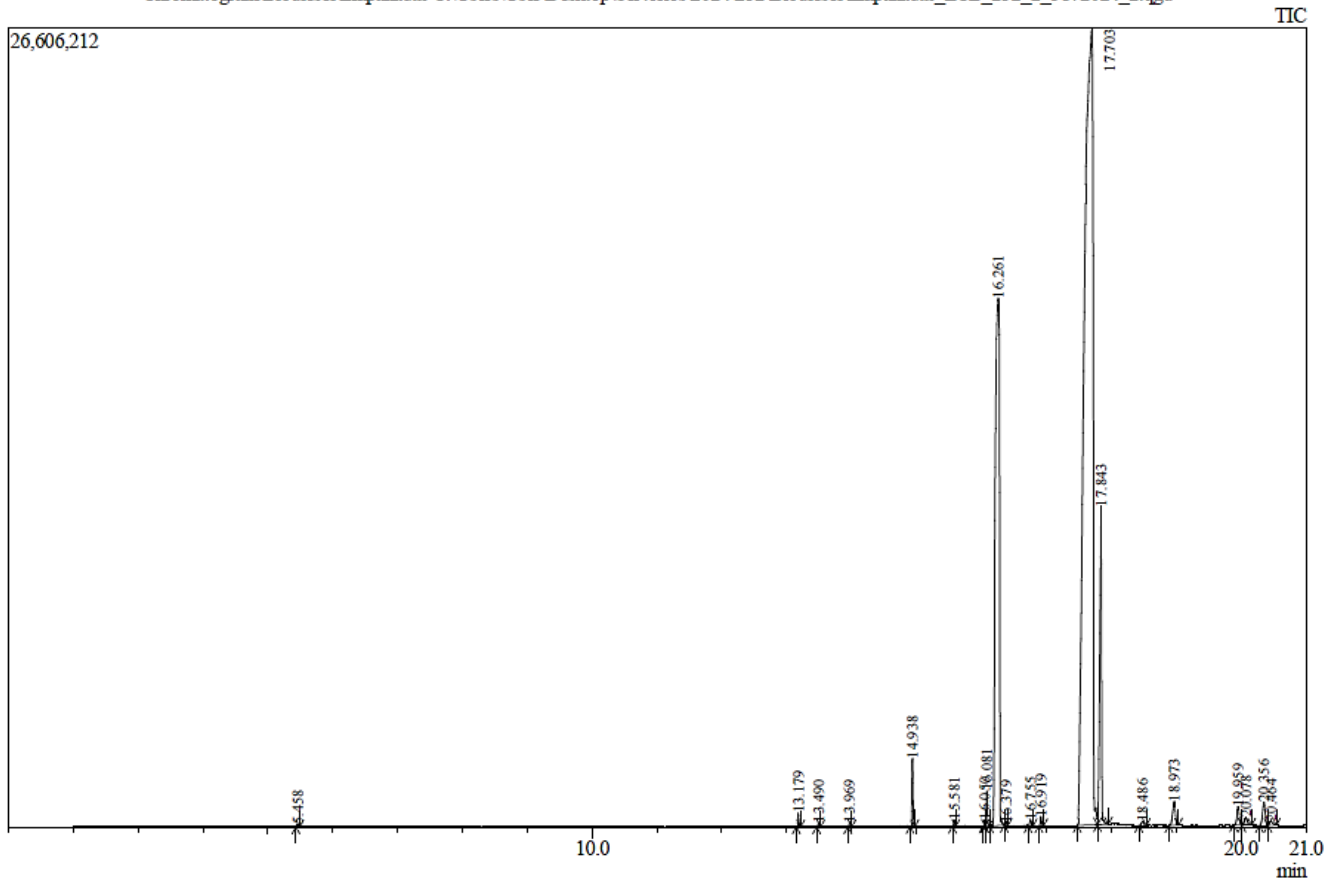


Gráfico 4. Cromatograma FAME – Biodiesel empanadas.

TABLA 21. Reporte de picos - Biodiesel empanadas.

Peak#	R.Time	I.Time	F.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Mark	Name
1	5.458	5.430	5.490	103385	0.03	80713	0.13	1.28		Octanoic acid, ethyl ester
2	13.179	13.145	13.215	580662	0.16	456747	0.73	1.27		Dodecanoic acid, methyl ester
3	13.490	13.460	13.525	182275	0.05	149660	0.24	1.22		Azelaic acid, dimethyl ester
4	13.969	13.940	14.005	193379	0.05	145229	0.23	1.33		1,2-Benzenedicarboxylic acid, d
5	14.938	14.900	14.975	2548574	0.72	2266214	3.62	1.12		Myristic acid, methyl ester
6	15.581	15.555	15.605	223938	0.06	220751	0.35	1.01		Methyl 13-methyltetradecanoate
7	16.050	16.025	16.060	252159	0.07	212442	0.34	1.19		9-Hexadecenoic acid, methyl est
8	16.081	16.060	16.125	1540120	0.43	1166207	1.86	1.32	V	9-Hexadecenoic acid, methyl est
9	16.261	16.125	16.355	76138780	21.38	17567763	28.05	4.33	V	Hexadecanoic acid, methyl ester
10	16.379	16.355	16.410	112835	0.03	76350	0.12	1.48	V	5-Methyltricyclo[5.3.1.1(3,9)]d
11	16.755	16.720	16.800	298027	0.08	204563	0.33	1.46		(Z)-10-heptadecenoic acid meth
12	16.919	16.885	16.960	456214	0.13	305321	0.49	1.49		Hexadecanoic acid, 15-methyl-
13	17.703	17.475	17.790	244245986	68.59	26524790	42.35	9.21		9-Octadecenoic acid, methyl est
14	17.843	17.790	17.960	21857842	6.14	10584687	16.90	2.07	V	Heptadecanoic acid, 16-methyl-
15	18.486	18.430	18.540	332173	0.09	131518	0.21	2.53		Methyl 9-cis,11-trans-octadecad
16	18.973	18.895	19.040	2232987	0.63	790526	1.26	2.82		Fumaric acid, 3-methylbutyl trid
17	19.959	19.890	20.015	1552105	0.44	611723	0.98	2.54		11-Eicosenoic acid, methyl ester
18	20.078	20.015	20.165	812849	0.23	249820	0.40	3.25	V	Methyl 13,16-docosadienoate
19	20.356	20.285	20.415	2044306	0.57	774012	1.24	2.64		Eicosanoic acid, methyl ester
20	20.464	20.415	20.550	407851	0.11	118090	0.19	3.45	V	9-Hydroxypentadecanoic acid, r
				356116447	100.00	62637126	100.00			

Biodiesel pollo apanado

Chromatogram Biodiesel Pollo C:\Users\User\Desktop\Servicios\2024\252\Biodiesel Pollo_LCb_252_4_5172024_4.qgd

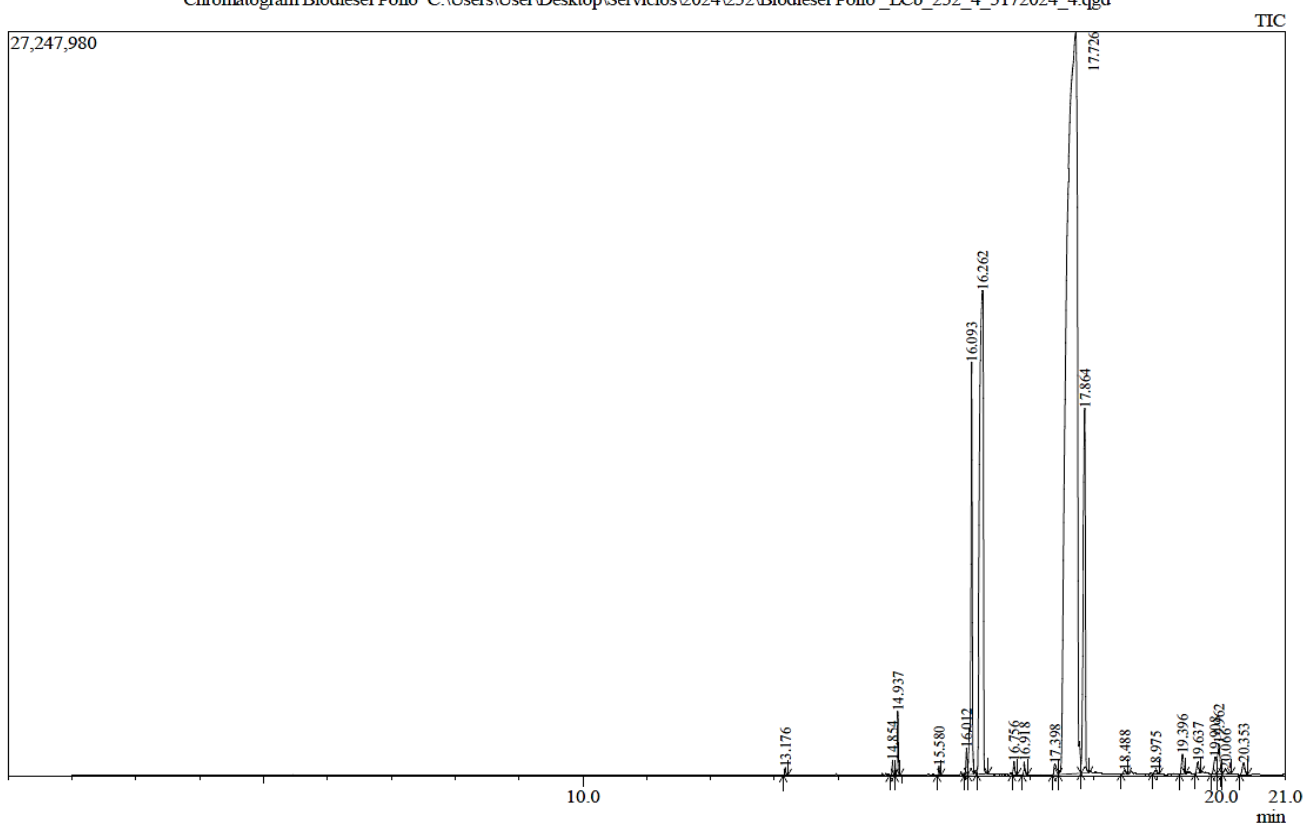


Gráfico 5. Cromatograma FAME – Biodiesel pollo apanado.

TABLA 22. Reporte de picos - Biodiesel pollo apanado.

Peak#	R.Time	I.Time	F.Time	Peak Report TIC				A/H	Mark	Name
				Area	Area%	Height	Height%			
1	13.176	13.140	13.210	374096	0.08	287827	0.35	1.30		Dodecanoic acid, methyl ester
2	14.854	14.810	14.885	587552	0.13	547967	0.66	1.07	V	Myristoleic acid methyl ester
3	14.937	14.885	14.970	2570316	0.57	2339508	2.82	1.10		Myristic acid, methyl ester
4	15.580	15.550	15.610	338503	0.07	329332	0.40	1.03		Methyl 13-methyltetradecanoate
5	16.012	15.985	16.030	1188207	0.26	972098	1.17	1.22	V	7,10-Hexadecadienoic acid, met
6	16.093	16.030	16.130	24962609	5.49	15087684	18.20	1.65	V	9-Hexadecenoic acid, methyl es
7	16.262	16.170	16.350	70481143	15.50	17692085	21.35	3.98		Hexadecanoic acid, methyl ester
8	16.756	16.725	16.810	736972	0.16	488795	0.59	1.51	V	(Z)-10-heptadecenoic acid meth
9	16.918	16.885	16.970	686027	0.15	456913	0.55	1.50		Hexadecanoic acid, 15-methyl-
10	17.398	17.355	17.450	1155179	0.25	385831	0.47	2.99		cis-7,10,13-Octadecatrienoic ac
11	17.726	17.450	17.805	310354277	68.25	27161049	32.77	11.43	V	9-Octadecenoic acid, methyl est
12	17.864	17.805	17.930	31630254	6.96	13362275	16.12	2.37	V	Heptadecanoic acid, 16-methyl-
13	18.488	18.435	18.535	345336	0.08	153724	0.19	2.25		Methyl 9-cis,11-trans-octadecad
14	18.975	18.925	19.030	305316	0.07	112884	0.14	2.70		Fumaric acid, 3-methylbutyl trid
15	19.396	19.345	19.440	1535761	0.34	729580	0.88	2.10		5,8,11,14-Eicosatetraenoic acid,
16	19.637	19.590	19.680	907307	0.20	402806	0.49	2.25		8,11,14-Eicosatrienoic acid, met
17	19.908	19.845	19.930	1717231	0.38	634382	0.77	2.71		cis-11,14-Eicosadienoic acid, m
18	19.962	19.930	20.015	3026561	0.67	1128766	1.36	2.68	V	11-Eicosenoic acid, methyl ester
19	20.066	20.015	20.155	702307	0.15	178533	0.22	3.93	V	13-Docosenoic acid, methyl este
20	20.353	20.290	20.420	1136005	0.25	426661	0.51	2.66		Eicosanoic acid, methyl ester
				454740959	100.00	82878700	100.00			