



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO

RUIZ GALLO



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA E
INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

**Mejora del rendimiento de biodiesel a partir del aceite usado de cocina
mediante el aprovechamiento del subproducto de la transesterificación a
distintas condiciones de agitación, relación masa y acidez**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO QUÍMICO**

AUTOR:

Bach. Adderly Orlando Diaz Tapia

ASESORA:

Dra. Ada Patricia Barturén Quispe

ORCID: 0000-0003-4566-1868

Lambayeque – Perú

2025



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO

RUIZ GALLO



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA E
INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

**Mejora del rendimiento de biodiesel a partir del aceite usado de cocina
mediante el aprovechamiento del subproducto de la transesterificación a
distintas condiciones de agitación, relación masa y acidez**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO QUÍMICO**

APROBADO POR EL SIGUIENTE JURADO:

Dr. Pedro Pablo Ángeles Chero
Presidente

M.Sc. Rodolfo Pastor Tineo Huancas
Secretario

M.Sc. Julio Humberto Tirado Vásquez
Vocal

Dra. Ada Patricia Barturen Quispe
Asesora



ACTA DE SUSTENTACIÓN 2025-FIQIA-UINV-VIRTUAL

Siendo la 10:30 am del lunes 24 de noviembre del 2025, se reunieron via plataforma virtual <https://meet.google.com/kgp-mgnm-qak> los miembros del jurado evaluador de la Tesis Titulado: **Mejora del rendimiento de biodiesel a partir del aceite usado de cocina mediante el aprovechamiento del subproducto de la transesterificación a distintas condiciones de agitación, relación masa y acidez**, designados por Res. N°445-2024-D-FIQIA de fecha 23 de setiembre del 2024 y aprobado con Res. N°189-2025-D-FIQIA de fecha 23 de mayo del 2025, con la finalidad de Evaluar y Calificar la sustentación de la Tesis antes mencionada, conformados por los siguientes docentes:

- Dr. Pedro Pablo Angeles Chero – Presidente
- M.Sc. Rodolfo Pastor Tineo Huancas - Secretario
- M.Sc. Julio Humberto Tirado Vásquez – Vocal.

La Tesis fue asesorada por la Dra. Ada Patricia Barturen Quispe, nombrada por Res. N°313-2024-D-FIQIA de fecha 21 de junio del 2024. El acto de sustentación es autorizado mediante Res. N°565-2025-D-FIQIA de fecha 17 de noviembre del 2025.


La Tesis fue presentada y sustentada por el Bachiller: **ADDERLY ORLANDO DIAZ TAPIA**; y tuvo una duración de **60** minutos.

Después de la sustentación, y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado; se procedió a la calificación respectiva, otorgándole el calificativo de **18** (Dieciocho) en la escala vigesimal, mención **Muy bueno**

Por lo que queda APTO para obtener el Título Profesional de **INGENIERO QUIMICO** de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ingeniería Química e Industrias Alimentarias y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las **11:30** se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto, con la firma de los miembros del jurado.

Firmas

.....


Dr. PEDRO PABLO ANGELES CHERO

.....

Vocal

M.Sc. JULIO HUMBERTO TIRADO VASQUEZ

.....

Secretario

M.Sc. RODOLFO PASTOR TINEO HUANCAS

.....

Asesora

Dra. ADA PATRICIA BARTUREN QUISPE

CONSTANCIA DE VERIFICACION DE ORIGINALIDAD

Yo ADA PATRICIA BARTUREN QUISPE usuario revisor de Tesis



Trabajo de Suficiencia Profesional y/o Trabajo Académico

Titulado: Mejora del Rendimiento de Biodiesel a Partir del Aceite Usado de Cocina Mediante el Aprovechamiento del Subproducto de la Transesterificación a Distintas Condiciones de Agitación, Relación Masa y Acidez.

Cuyo autor es: Adderly Orlando Diaz Tapia; con DNI N° 70773020; declaro que la evaluación realizada por el Programa informático ha arrojado un porcentaje de similitud 12 %, verificables en el Resumen del Reporte automatizado de similitudes que se acompaña.

El suscrito (a) analizó reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas dentro del porcentaje de similitud permitido no constituyen plagio y que el documento cumple con la integridad científica y con las normas para el uso de citas y referencias establecidas en los protocolos respectivos,

Se cumple con adjuntar el Recibo Digital a efectos de la trazabilidad respectiva del proceso.

Lambayeque, 06...de diciembre del 2025



.....
Firma (Asesor)

Nombres y Apellidos: Ada Patricia Barturén Quispe

DNI...16721885.....

Defina la modalidad con (X)

Adjunta:

Resumen de Reporte automatizado de similitudes

Recibo digital



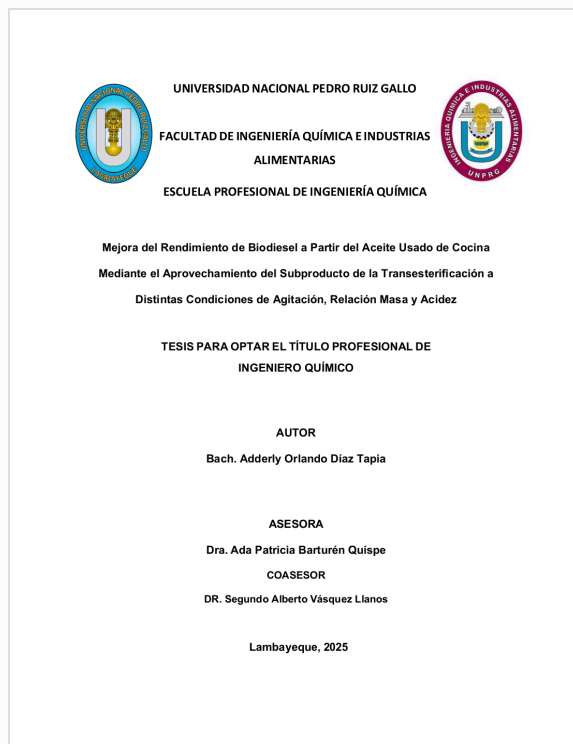
Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Ada Patricia Barturen Quispe
Título del ejercicio: Adderly Orlando Diaz Tapia
Título de la entrega: Tesis Biodiesel
Nombre del archivo: Tesi_Aderly_Diaz.pdf
Tamaño del archivo: 2.27M
Total páginas: 69
Total de palabras: 13,895
Total de caracteres: 75,432
Fecha de entrega: 06-dic-2025 03:46p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2837912437

Dra. Ada Patricia Barturen Quispe
Asesora
N° DNI 16721885



Tesis Biodiesel

INFORME DE ORIGINALIDAD

12%

INDICE DE SIMILITUD

12%

FUENTES DE INTERNET

5%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
2	repositorio.unprg.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	network.bepress.com Fuente de Internet	1%
4	repositorio.unal.edu.co Fuente de Internet	1%
5	es.scribd.com Fuente de Internet	1%
6	patents.google.com Fuente de Internet	1%
7	www.coursehero.com Fuente de Internet	1%
8	Molina Mayo, Carlos. "Estudio de la composición y estabilidad de biodiesel obtenido a partir de aceites vegetales limpios y procedentes de aceites de fritura", Universidad de La Laguna (Canary Islands, Spain), 2021 Publicación	<1%
9	www.clubensayos.com Fuente de Internet	<1%
10	Submitted to Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo Trabajo del estudiante	<1%

Dra. Ada P. Barturen Quispe
Asesora
N° DNI 16721885



11	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1 %
12	repositorio.uladech.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
13	Submitted to ucb Trabajo del estudiante	<1 %
14	repositorio.cepal.org Fuente de Internet	<1 %
15	Submitted to Colegio Nueva York Trabajo del estudiante	<1 %
16	tesis.pucp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
17	www.maximaformacion.es Fuente de Internet	<1 %
18	Submitted to Universidad de Córdoba Trabajo del estudiante	<1 %
19	repository.unab.edu.co Fuente de Internet	<1 %
20	Submitted to Universidad de Piura Trabajo del estudiante	<1 %
21	qdoc.tips Fuente de Internet	<1 %
22	Rodrigo Aliaga, Maria Dolores. "Scientific basis to establish the pulsed electric fields (PEF) processing conditions of fresh blended orange and carrot juices", Proquest, 20111109 Publicación	<1 %
23	Submitted to Tecsup Trabajo del estudiante	<1 %
24	gredos.usal.es Fuente de Internet	<1 %



Dra. Ada P. Barturen Quispe
Asesora
N° DNI 16721885

25 mediambient.gencat.net <1 %
Fuente de Internet

26 ruja.ujaen.es <1 %
Fuente de Internet

27 sistema.editoraartemis.com.br <1 %
Fuente de Internet

28 www.revistas.unal.edu.co <1 %
Fuente de Internet

29 cia.uagraria.edu.ec <1 %
Fuente de Internet

30 Submitted to ITESM: Instituto Tecnológico y
de Estudios Superiores de Monterrey <1 %
Trabajo del estudiante

31 idoc.pub <1 %
Fuente de Internet

32 nanopdf.com <1 %
Fuente de Internet

33 revistas.utm.edu.ec <1 %
Fuente de Internet

34 www.dspace.uce.edu.ec:8080 <1 %
Fuente de Internet



Dra. Ada P. Barturen Quispe
Asesora
N° DNI 16721885

Excluir citas Activo Excluir coincidencias < 15 words
Excluir bibliografía Activo

DEDICATORIA

A Dios por hacer posible la realización de esta meta, a mis padres, cuyo amor y dedicación han sido nuestra mayor inspiración y fortaleza.

A mis profesores y mentores, cuya sabiduría y orientación han iluminado el arduo camino hacia este logro. A mis amigos y a todos aquellos que han compartido este viaje conmigo, por su ánimo y apoyo brindado para hacer posible esta meta. Este trabajo está dedicado a ustedes, con profunda gratitud y afecto.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi asesora de tesis por su invaluable guía y apoyo. A los miembros del jurado de tesis, por sus observaciones y recomendaciones que enriquecieron este trabajo. Agradezco a mi familia, por el apoyo incondicional han sido la base de todos mis logros.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	10
ABSTRACT	11
1. Introducción.....	12
2. Diseño teórico	15
2.1. Antecedentes.....	15
2.2. Base teórica.....	17
2.2.1. Aceite usado de cocina	17
2.2.2. Biodiesel (UCOME).....	18
2.2.3. Rendimiento	18
2.2.4. Transesterificación	18
2.2.5. Pretratamiento.....	20
2.2.6. Glicerol crudo	20
2.2.7. Reacción de neutralización del aceite usado de cocina con glicerol crudo	21
2.2.8. Relación másica glicerol crudo/aceite usado de cocina.....	21
2.2.9. Agitación	21
2.2.10. Proceso de refinación de biodiesel.....	21
2.3. Definición y operacionalización de variables.....	22
3. DISEÑO METODOLÓGICO	24
3.1. Diseño de contrastación de hipótesis.....	24
3.2. Población y muestra	24
3.3. Técnicas, instrumentos, equipos y materiales	26

3.3.1. Las técnicas	26
3.3.2. Equipos e instrumentos empleados en la recolección de datos.....	40
3.3.3. Técnica y procedimiento de análisis de datos	41
4. Resultados	44
4.1. Caracterización del aceite usado de cocina	44
4.2. Secado del aceite usado de cocina.....	45
4.3. Cálculo de la relación másica teórica	45
4.4. Fase 1: Neutralización con glicerol crudo - método propuesto	46
4.4.1. Análisis estadístico ANOVA- variable dependiente acidez final.....	48
4.4.2. Análisis estadístico ANOVA- variable dependiente rendimiento pretratamiento.	53
4.5. Fase 2: Producción de biodiesel a partir de aceite usado de cocina	56
4.5.1. Efecto de la acidez inicial en el rendimiento del pretratamiento.....	57
4.5.2. Efecto de la acidez inicial en el rendimiento del biodiesel.....	58
4.6. Calidad del biodiesel producido	59
5. Discusión.....	62
6. Conclusiones.....	65
7. Recomendaciones.....	66
8. Referencias	67
9. anexos	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables	23
Tabla 2 Niveles de las variables independientes	25
Tabla 3 Propiedades del aceite usado de cocina y métodos/ instrumentos empleados	28
Tabla 4 Propiedades del aceite usado de cocina y métodos/ instrumentos de determinación ..	35
Tabla 5 Propiedades del biodiesel y métodos/instrumentos empleados	39
Tabla 6 Resultados de la caracterización del aceite usado de cocina empleado.	44
Tabla 7 Resultados de humedad luego de secar la materia prima.....	45
Tabla 8 Resultados de acidez del aceite usado de cocina y alcalinidad del glicerol crudo	46
Tabla 9 Resumen de los resultados de rendimiento y caracterización del aceite usado de cocina pretratado para los 6 tratamientos con sus 3 réplicas	47
Tabla 10 Resultados del análisis ANOVA para las variables independientes agitación y relación másica, y la variable dependiente acidez final.....	49
Tabla 11 Resultados de la prueba Tukey HSD para los niveles de la variable relación másica y su efecto en la acidez final, en condiciones de agitación de 600 rpm.....	51
Tabla 12 Resultados del análisis ANOVA para las variables independientes agitación y relación másica, y la variable dependiente rendimiento del pretratamiento.	53
Tabla 13 Resultados del análisis ANOVA para la variable independiente relación másica y la variable dependiente rendimiento del pretratamiento.	55
Tabla 14 Resumen de los resultados de rendimiento para las etapas de pretratamiento (pre), transesterificación - refinación (trans- ref) y rendimiento de biodiesel.	56
Tabla 15 Resultados del análisis ANOVA para la variable independiente acidez inicial y la variable dependiente rendimiento del pretratamiento.	57
Tabla 16 Resultados del análisis ANOVA para la variable independiente acidez inicial y la variable dependiente rendimiento de biodiesel.....	58

Tabla 17 <i>Caracterización del biodiesel obtenido</i>	60
Tabla 18 <i>Relación entre los intervalos de temperaturas mínimas promedios ambientales (°C) en el Perú y los contenidos máximos de monoglicéridos saturados del</i>	69
Tabla 19 <i>Resultado de todo el proceso productivo de la fase 2, producción de biodiesel</i>	1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ecuación química general para la obtención de biodiesel	19
Figura 2 Recolección de muestra de aceite usado de cocina	26
Figura 3 Algoritmo empleado en la recolección de datos en la parte experimental.....	27
Figura 4 Secado del aceite usado de cocina entre 110 y 120°C.....	29
Figura 5 Determinación de la acidez del aceite usado de cocina	29
Figura 6 Determinación de la alcalinidad del glicerol crudo	30
Figura 7 Diagrama de pretratamiento del aceite usado de cocina con glicerol crudo	33
Figura 8 Proceso de pretratamiento del aceite usado de cocina con glicerol crudo.....	34
Figura 9 Proceso de transesterificación del aceite usado de cocina.....	36
Figura 10 Diagrama de transesterificación y refinación de biodiesel	38
Figura 11 Refinación del biodiesel.....	38
Figura 12 Gráfico de interacción acidez final promedio (Oleico %m/m) vs relación másica y agitación (rpm).....	50
Figura 13 Distribución de la acidez final vs la relación másica, tratamientos realizados a 600 rpm.	52
Figura 14 Gráfico de interacción rendimiento del pretratamiento (%) vs relación másica y agitación (rpm)	54
Figura 15 Biodiesel producido 3 réplicas por cada nivel de acidez inicial	57

RESUMEN

El alto contenido de ácidos grasos libres en el aceite usado de cocina dificulta su uso en la etapa de transesterificación para producir biodiesel, por tal motivo existe una etapa de pretratamiento, que a menudo eleva el costo de producción. Con el fin de desarrollar un método más simple y económico que permita obtener rendimientos superiores al 90% de biodiesel a partir de esta materia prima, se propone emplear el subproducto de la transesterificación, glicerol crudo, para reducir la acidez de este aceite reciclado. Para ello en una primera fase se estudia el pretratamiento del aceite usado de cocina con glicerol crudo, con el objetivo de encontrar las mejores condiciones de agitación y relación másica (glicerol / aceite usado de cocina) que favorezcan la reducción de la acidez y el rendimiento del aceite pretratado. Los resultados muestran que trabajar con una agitación de 600 rpm y una relación másica mayor igual a 0.7, para una relación teórica de 0.6, permite reducir la acidez por debajo de 0.1% o 0.2 mgKOH/g con un rendimiento promedio de 94.07% en un tiempo de 15 min. Con el conocimiento de las mejores condiciones para pretratar el aceite usado de cocina con glicerol crudo; en una segunda fase se estudia todo el proceso productivo del biodiesel: pretratamiento, transesterificación y refinación. La finalidad de esta fase es conocer como la acidez inicial de la materia prima influye en el rendimiento del biodiesel producido. Los resultados muestran que es posible producir biodiesel a partir de aceite usado de cocina con rendimientos promedio del 95.48% y 91.05% para materia primas con acidez inicial 1.55 y 5.48%, respectivamente. Como era de esperar a un mayor valor de acidez corresponde un rendimiento menor y viceversa. Además, se determinó la calidad de biodiesel producido, obteniendo resultados que cumplen la norma técnica peruana NTP 321.125:2019.

Palabras claves: Aceite usado de cocina, biodiesel, rendimiento, glicerol crudo, acidez.

ABSTRACT

The high content of free fatty acids in used cooking oil makes it difficult to use in the transesterification process to produce biodiesel. Therefore, a pretreatment step is required, which often increases production costs. In order to develop a simpler and more economical method that allows for biodiesel yields of over 90% from this raw material, we propose using the transesterification byproduct, crude glycerol, to reduce the acidity of this recycled oil. To this end, the pretreatment of used cooking oil with crude glycerol is initially studied, with the goal of finding the optimal agitation conditions and mass ratio (glycerol/used cooking oil) that favor acidity reduction and the yield of the pretreated oil. The results show that working with an agitation of 600 rpm and a mass ratio greater than 0.7, for a theoretical ratio of 0.6, allows reducing the acidity below 0.1% or 0.2 mgKOH/g with an average yield of 94.07% in a time of 15 min. With the knowledge of the best conditions to pretreat used cooking oil with crude glycerol; in a second phase, the entire biodiesel production process is studied, this includes pretreatment, transesterification and refining stages. The purpose of this phase is to understand how the initial acidity of the raw material influences the yield of the biodiesel produced. The results show that it is possible to produce biodiesel from used cooking oil with average yields of 95.48% and 91.05% for raw materials with initial acidities of 1.55 and 5.48%, respectively. As expected, a higher acidity value corresponds to a lower yield and vice versa. In addition, the quality of the biodiesel produced was determined, obtaining results that comply with Peruvian technical standard NTP 321.125:2019.

Keywords: Used cooking oil, biodiesel, yield, crude glycerol, acidity.

1. INTRODUCCIÓN

La producción de biodiesel a partir de aceite usado de cocina es una actividad económica que nos permite sumar esfuerzos en las áreas de adaptación y mitigación al cambio climático, economía circular, seguridad alimentaria y energías renovables.

En la actualidad, la producción de biodiesel a partir de aceite usado de cocina se considera compleja debido a su elevado contenido de ácidos grasos libres, con valores de acidez superiores a 2 mgKOH/g de muestra (Elgharbawy et al., 2021). Esta característica exige una etapa de pretratamiento para reducir la acidez antes de la transesterificación. En general, la obtención de biodiesel comercial a partir de aceite usado de cocina involucra tres etapas principales: el pretratamiento, la transesterificación y la refinación del biodiesel.

A escala industrial, la transesterificación de catálisis alcalina homogénea es el método más empleado para transformar el aceite en biodiesel (Elgharbawy et al., 2021; Heidari & Wood, 2023). Pero tiene algunas limitaciones, la presencia de agua y ácidos grasos libres (>2mgKOH/g) en la materia prima, perjudican el rendimiento de la reacción (Elgharbawy et al., 2021). Por las razones anteriores, existe la etapa de pretratamiento para reducir la humedad y los ácidos grasos libres de la materia prima. (Suzihaque et al., 2022)

La humedad se elimina calentando la materia prima por encima del punto de ebullición del agua. Por otro lado, remover los ácidos grasos libres del aceite usado de cocina, requiere de un proceso más complejo.

Entonces, el problema radica en la etapa de pretratamiento, ¿cómo reducir la concentración de ácidos grasos libres en el aceite usado de cocina?, la respuesta a esta pregunta a nivel industrial es la esterificación ácida (Suzihaque et al., 2022) y/o también la neutralización con una base fuerte. Algunos inconvenientes con la esterificación ácida es que genera corrosión en los equipos (Kerras et al., 2023, p. 20; Zulqarnain et al., 2021) y emplea metanol de elevada pureza, convirtiéndose en un proceso de pretratamiento costoso. Por otro lado, para materias

primas con acidez moderadamente elevada, menor a 6 mgKOH/g. Se puede optar por una neutralización, con una solución acuosa de hidróxido de sodio (soda). Dicho proceso genera una merma considerable, consume una elevada cantidad de agua para eliminar los jabones y una cantidad significativa de energía para secar el aceite usado de cocina.

Este estudio propone un nuevo método para reducir los ácidos grasos libres en el aceite usado de cocina mediante glicerol crudo, subproducto de la transesterificación. Este compuesto neutraliza los ácidos grasos libres, transformándolos en jabones que luego se separan del aceite debido a la capacidad del glicerol para arrastrarlos. Así se obtiene un aceite usado de cocina con muy baja acidez y además durante esta etapa de neutralización no se aporta humedad al aceite. Este nuevo proceso busca minimizar la saponificación de los triglicéridos para reducir la merma, buscando así obtener rendimientos mayores al 90% para materias primas de acidez inicial de 3 y 10 mg KOH/g.

Se puede resumir toda esta problemática planteando el problema de investigación: ¿Es posible obtener un rendimiento mayor al 90% de biodiesel a partir del aceite usado de cocina mediante el aprovechamiento del subproducto de la transesterificación, empleando las mejores condiciones de agitación (rpm) y relación masa de glicerol crudo por masa de aceite usado de cocina, a partir de materias primas con valores de acidez inicial de 3 y 10 mg KOH/g.?

Para responder a esta pregunta se divide la investigación en 2 fases, la prime busca determinar las mejores condiciones de agitación y relación másica para pretratar el aceite y en una segunda fase se busca determinar el rendimiento de biodiesel a partir de aceite usado de cocina con una acidez inicial de 3 y 10 mg KOH/g. Para ello se plantea el objetivo general de este estudio, el cuál es obtener un rendimiento superior al 90% de biodiesel a partir del aceite usado de cocina mediante el aprovechamiento del subproducto de la transesterificación, empleando las mejores condiciones encontradas de agitación (rpm) y relación masa de glicerol crudo / masa de aceite usado de cocina, a partir de materias primas con valores de acidez inicial de 3 y 10 mgKOH/g.

Para ello se plantean los objetivos específicos:

El primer objetivo específico es evaluar dos parámetros: la agitación y la relación másica, masa glicerol crudo por masa de aceite usado de cocina. Se busca identificar los valores de estas variables, que favorezcan el rendimiento y la neutralización de la materia prima, manteniendo la acidez inicial como un parámetro constante en todos los experimentos.

El segundo objetivo específico es determinar el rendimiento de la etapa de pretratamiento para el aceite usado de cocina, luego de ser tratado con las mejores condiciones encontradas de agitación y relación masa de glicerol crudo / masa de aceite usado de cocina, pero ahora a partir de materias primas de distinto valor de acidez inicial (3 y 10 mgKOH/g).

Finalmente, se determina el rendimiento global en la producción de biodiesel a partir de aceite usado de cocina con diferentes niveles de acidez inicial de 3 y 10 mgKOH/g.

2. DISEÑO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Investigadores que han buscado mejorar el rendimiento de la producción de biodiesel a partir del aceite usado de cocina, han explorado distintas técnicas de reducción de la acidez para mejorar el rendimiento. Como es el caso de Haq et al. (2021), su estudio comparó dos métodos de pretratamiento para reducir la alta acidez del aceite usado de cocina: glicerólisis catalizada por metal y esterificación ácida. Los parámetros óptimos para la glicerólisis (6 horas, 160 °C, 5% de glicerol y 0,5% de polvo de zinc) redujeron la acidez de 9,01 a 2,18 mgKOH/g, mientras que la esterificación ácida (90 min, 65 °C, 1% w/v de ácido sulfúrico) logró disminuirla a 0,48 mgKOH/g. En la transesterificación, se evaluaron dos catalizadores: el catalizador alcalino obtuvo un rendimiento del 96,91% (90 min, 55 °C, relación molar 6, 1% en peso de KOH) y las lipasas alcanzaron un rendimiento del 89,64% (72 h, 40 °C, relación molar 4, 4% en masa de lipasas). Se concluye que los parámetros de reacción tienen una fuerte influencia en el rendimiento del biodiesel.

En el estudio de Hadiyanto et al. (2020) se comparó biodiesel obtenido de diferentes materias primas (aceite de soja, palma, usado de cocina, castor y *Callophylum inophyllum*). Se estableció que cuando la acidez supera el 2% en peso es necesario realizar un pretratamiento. El aceite de palma presentó el mejor rendimiento 90,87% en la producción de biodiesel, mientras que el aceite usado de cocina obtuvo un rendimiento de 90,29% pero con propiedades fuera de especificación. Se reafirma la importancia de reducir la acidez en la etapa previa para asegurar un mayor rendimiento de la transesterificación y mejor calidad del producto obtenido.

Un estudio realizado por Ahmad (2023) se centró en la optimización de las condiciones de reacción en la transesterificación para maximizar el rendimiento de la producción de biodiesel a partir de aceite usado de cocina. Para determinar las condiciones óptimas, el autor empleó una metodología que combinó modelos predictivos de machine learning, entrenado con 30 resultados

experimentales. Esta aproximación identificó las condiciones óptimas de transesterificación como: relación molar metanol-aceite de 7.62:1, concentración de catalizador del 0.5% masa, temperatura de 65°C y tiempo de reacción de 105 minutos, proyectando un rendimiento teórico del 98.98% en peso. Posteriormente, se realizó una validación experimental utilizando estas condiciones. Partiendo de aceite usado de cocina con una acidez inicial de 5.0 mgKOH/g, se aplicó un pretratamiento de esterificación (empleando 20% metanol y 0.5% ácido P-Tolueno Sulfónico a 60°C) para reducir la acidez a 2.6 mgKOH/g, seguido del secado. La reacción de transesterificación bajo las condiciones óptimas predichas por los modelos arrojó un rendimiento experimental de biodiesel del 96.83% en masa, ligeramente inferior (en un 2.15%) al valor predicho teóricamente.

En un estudio reciente, Bajwa et al. (2024) investigaron la optimización de la producción de biodiesel utilizando una mezcla de aceite usado de cocina y aceite de sésamo como materia prima. Emplearon una metodología combinada de superficie de respuesta (RSM) y redes neuronales artificiales (ANN) para evaluar el impacto de variables como la relación molar, la velocidad de agitación, la concentración del catalizador y el tiempo de reacción sobre el rendimiento de la transesterificación.

Debido a la acidez inicial del aceite usado de cocina (3.8 mgKOH/g), se aplicó un pretratamiento de esterificación con ácido sulfúrico previo a la reacción principal. Posteriormente, llevaron a cabo una transesterificación asistida por microondas. Los resultados de la optimización arrojaron las siguientes condiciones óptimas: agitación de 350 rpm, tiempo de reacción de 3 minutos, concentración de catalizador del 1.05% w/w y una relación metanol/aceite de 10:1. Bajo estas condiciones, se logró un rendimiento máximo del 94% en masa de biodiesel, basado en la masa total de la mezcla de aceites alimentada.

Los antecedentes anteriormente citados presentan rendimientos superiores a 90% en masa, 3 de ellos emplean esterificación ácida para pretratar el aceite usado de cocina, con el fin de reducir la acidez. Hadiyanto et al. (2020) no empleó ninguna etapa de pretratamiento, este

hecho significó que obtenga el menor rendimiento de los 4 antecedentes anteriormente citados, además de que las características del biodiesel obtenido estén fuera de especificación. Estos estudios evidencian la importancia de pretratar el aceite usado de cocina y su impacto en el rendimiento de la producción de biodiesel a partir de aceite usado de cocina.

Ahora se revisan algunos aspectos teóricos para comprender mejor la investigación actual.

2.2. Base teórica

2.2.1. Aceite usado de cocina

El aceite usado de cocina es producido en industrias que procesan alimentos, en restaurantes y hogares. (Van Grinsven et al., 2020). El aceite usado de cocina está compuesto principalmente por triglicéridos (Elgharbawy et al., 2021) y contiene concentraciones menores de ácidos grasos libres (Haq et al., 2021)

Usar directamente aceite usado de cocina en un motor no es viable, ya que posee una elevada viscosidad (Haq et al., 2021). Mediante la reacción de transesterificación, el aceite usado de cocina se transforma a biodiesel, combustible de viscosidad aceptable, que se puede usar como combustible en motores diésel sin modificación alguna. (Haq et al., 2021). El uso de aceite usado de cocina como materia prima puede reducir los costos de producción hasta en un 70% (Suherman et al., 2023; Outili et al., 2023). Además, producir biodiesel a partir de aceite usado de cocina tiene muchas ventajas como el hecho de ser una fuente limpia de energía, permite avanzar hacia una economía circular, reduce los desechos y la contaminación ambiental, y disminuye la demanda de aceite vegetal virgen en la elaboración de biodiesel (Zhao et al., 2021)

Un obstáculo en su conversión a biodiesel es su elevado contenido de ácidos grasos libres, que perjudica la reacción de transesterificación (Kerras et al., 2023), por ello necesita de una etapa de pretratamiento (Elgharbawy et al., 2021)

2.2.2. Biodiesel (UCOME)

El biodiesel producido de aceite usado de cocina conocido como UCOME del inglés using cooking oil methyl esters, químicamente está compuesto por ésteres alquílicos de ácidos grasos de cadena larga, con una concentración mayor al 96,5% en peso de estos ésteres según la norma técnica EN 14214:2019 (Haq et al., 2021). El biodiesel puede ser usado de manera pura (B100) o en mezclas con diésel proveniente del petróleo, como combustible (Elgharbawy et al., 2021) debido a que las propiedades de estos dos combustibles son muy similares. Este combustible renovable es limpio; su combustión reduce la generación de monóxido de carbono, dióxido de carbono, la emisión de material particulado y no contiene aromáticos (Elgharbawy et al., 2021) y tiene un buen desempeño como lubricante (Elgharbawy et al., 2021; Haq et al., 2021), estas son algunas ventajas que no posee el diesel proveniente del petróleo (Elgharbawy et al., 2021).

Se produce a partir de materias primas renovables que contienen gran cantidad de triglicéridos (Elgharbawy et al., 2021) y concentraciones menores de ácidos grasos libres (Haq et al., 2021).

2.2.3. Rendimiento

El rendimiento del proceso de obtención de biodiesel se define como la cantidad de masa de biodiesel obtenido por cantidad de masa de aceite usado de cocina alimentado.

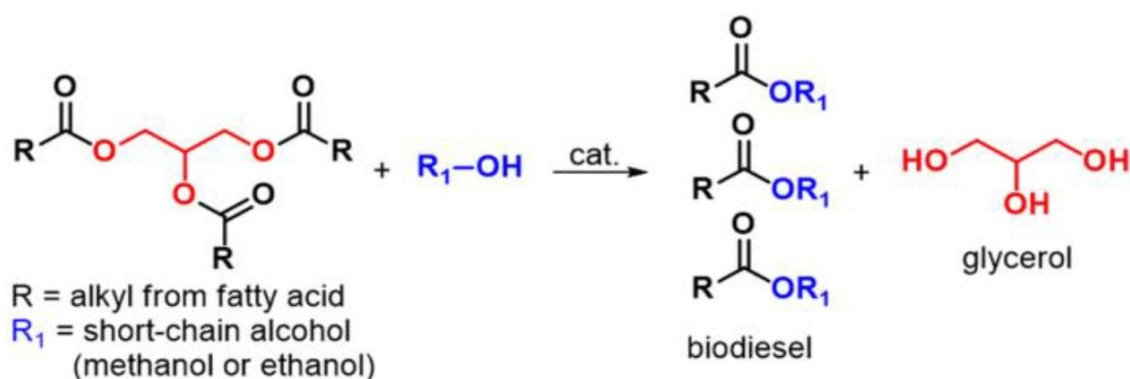
2.2.4. Transesterificación

La reacción química de transesterificación, de catálisis homogénea alcalina, es una reacción química endotérmica (Zulqarnain et al., 2021), entre glicéridos y alcohol (por lo general se emplea metanol, más barato y ampliamente disponible), en presencia de una base fuerte (catalizador), para producir ésteres alquílicos de ácidos grasos (biodiesel) y glicerol como subproducto. (Elgharbawy et al., 2021;Maheshwari et al., 2022).Ver Figura 1.

Algunas de las bondades de la reacción de transesterificación con catálisis homogénea alcalina son: tiene una velocidad de reacción rápida, alto rendimiento, las condiciones de reacción son moderadas, de bajo costo, bajo corrosión en los equipos y baja toxicidad (Elgharbawy et al., 2021). Sin embargo, a pesar de estos beneficios, la transesterificación alcalina homogénea es altamente sensible a la presencia de ácidos grasos libres y agua en la materia prima, lo que puede afectar la eficiencia del proceso (Elgharbawy et al., 2021).

Figura 1

Ecuación química general para la obtención de biodiesel



Nota. El catalizador (cat.) más empleado a nivel industrial es el hidróxido de sodio y también el metilato de sodio. Fuente: Zulqarnain et al., (2021).

Las variables que afectan a la velocidad y rendimiento de la reacción son las siguientes:

- Pertenecientes al proceso: Temperatura, proporción molar alcohol/aceite, cantidad de catalizador, tiempo de reacción, velocidad de agitación. (Elgharbawy et al., 2021)
- Pertenecientes a la materia prima: Contenido de humedad y ácidos grasos libres. (Elgharbawy et al., 2021)

Los ácidos grasos libres presentes en la materia prima reaccionan con el catalizador alcalino (consumiéndolo) para formar jabones y agua, en la etapa de transesterificación, afectando así la velocidad de reacción y el rendimiento (Elgharbawy et al., 2021), debido a que disminuye la cantidad de catalizador. La presencia de jabones aumenta la viscosidad de la

mezcla y dificulta la separación del biodiesel y el glicerol (Elgharbawy et al., 2021). Por esta razón las materias primas con un contenido de ácidos grasos libres mayor al 1% en peso deben ser previamente tratadas. (Elgharbawy et al., 2021)

2.2.5. Pretratamiento

Debido a que la humedad y los ácidos grasos libres presentes en la materia prima impactan de manera negativa en el rendimiento de la producción de biodiesel. Es necesario realizar un pretratamiento al aceite usado de cocina con el fin de eliminar o reducir la humedad y los ácidos grasos libres.

La materia prima con concentraciones mayores a 1% masa de ácidos grasos libres y 0.3% masa de agua, requieren una etapa de pretratamiento. (Mathew et al., 2021)

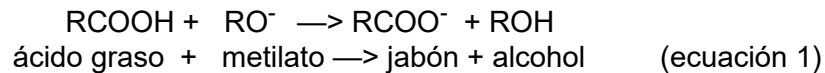
El agua se elimina por evaporación, calentando el aceite usado de cocina por encima de 100°C. Por otro lado, reducir la concentración de ácidos grasos libres presentes en el aceite usado de cocina, es más complejo. Las técnicas empleadas para abordar este problema a nivel industrial es la esterificación ácida (Suzihaque et al., 2022) y/o también la neutralización con una base fuerte; la primera es costosa y genera corrosión en los equipos, la segunda es más económica, pero consume una gran cantidad de agua y rendimientos menores por causa de la reacción de saponificación. Con el fin de evaluar una alternativa distinta se propone estudiar al glicerol crudo (subproducto de la transesterificación) como agente para neutralizar los ácidos grasos libres presentes en el aceite usado de cocina.

2.2.6. Glicerol crudo

El glicerol crudo es un subproducto de la reacción de transesterificación, de naturaleza polar, contiene gran parte del catalizador alcalino, glicerol, metanol y jabones. (Elgharbawy et al., 2021). El glicerol empleado en esta investigación proviene de la reacción de transesterificación catalizada con metilato de sodio.

2.2.7. Reacción de neutralización del aceite usado de cocina con glicerol crudo

Los ácidos grasos libres presentes en el aceite usado de cocina son neutralizados específicamente con el catalizador presente en el glicerol crudo. Dicho catalizador es el metilato de sodio, la posible reacción a desarrollar entre los ácidos grasos libres y el metilato es la siguiente ecuación 1.



2.2.8. Relación másica glicerol crudo/aceite usado de cocina

Se define como los gramos de glicerol crudo empleados para tratar un gramo de aceite usado de cocina.

2.2.9. Agitación

El glicerol crudo y el aceite usado de cocina son líquidos inmiscibles que necesitan de agitación mecánica para aumentar la superficie de contacto entre estos y así facilitar la neutralización.

2.2.10. Proceso de refinación de biodiesel

Una vez transformado el aceite a biodiesel. Este último es sometido a distintos procesos que permiten remover los contaminantes, se adiciona un ácido, por lo general fosfórico, para neutralizar el catalizador. La mezcla neutralizada se dirige a una etapa de destilación donde se calienta hasta conseguir evaporar el metanol, para recuperar la mayor parte de este. Posteriormente, se lava el biodiesel para remover los remanentes de catalizador, sal, jabones, alcohol residual y glicerina libre (Elgharbawy et al., 2021). Luego, el biodiesel se calienta a 120 °C para remover el agua y finalmente se filtra para eliminar partículas.

2.3. Definición y operacionalización de variables

En una primera fase se pretende encontrar las mejores condiciones de agitación y relación masa (glicerol crudo /aceite usado de cocina) para neutralizar el aceite, que permitan maximizar el rendimiento y reducir la acidez del aceite en la etapa de pretratamiento. En una segunda fase, teniendo en cuenta las mejores condiciones de pretratamiento, se busca determinar el rendimiento global del biodiesel producido a partir de aceite usado de cocina con distintos valores de acidez inicial. Para este fin es necesario nombrar y definir nuestras variables de investigación, en la siguiente tabla 1.

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variable	Definición	Dimensión	Indicador	Índice	Técnica de recolección de datos.
Variables independientes					
Relación masa de glicerol crudo/masa de aceite usado de cocina	Cantidad de masa de Glicerol crudo empleado para neutralizar una unidad de masa de aceite usado de cocina	Cantidad de gramos de glicerol crudo / gramos de aceite	Eficiencia del proceso de Pretratamiento	fracción (masa/masa)	Cálculo según la ecuación 4
Agitación	Número de revoluciones del agitador para mezclar los fluidos inmiscibles	Número de revoluciones por minuto	Eficiencia del proceso de Pretratamiento	Rpm	Agitador magnético
Valor de acidez inicial*	Contenido de ácidos grasos libres en el aceite usado de cocina crudo	Masa de hidróxido de potasio para neutralizar un gramo de muestra	Calidad del aceite usado de cocina crudo	mgKOH/g	AOCS Ca 5a-40
Variables dependientes					
Valor de acidez final	Contenido de ácidos grasos libres	Masa de hidróxido de potasio para neutralizar un gramo de muestra	Calidad del aceite usado de cocina crudo	mgKOH/g	AOCS Ca 5a-40
Rendimiento pretratamiento	Cantidad de aceite de cocina refinado obtenido por cantidad de aceite de cocina crudo alimentado	Cantidad de gramos de producto por gramos de materia prima alimentada	Eficiencia del proceso de Pretratamiento	% en masa	Cálculo aritmético
Rendimiento global*	Cantidad de biodiesel obtenido por cantidad de aceite usado de cocina crudo alimentado.	Cantidad de gramos de producto por gramos de materia prima alimentada	Eficiencia del proceso de producción de biodiesel	% en masa	Cálculo aritmético

Nota. *Variables estudiadas en la segunda fase. Elaborado por el autor, 2025.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Diseño de contrastación de hipótesis

El tipo de investigación es experimental porque involucra la manipulación de las variables independientes (agitación, relación másica, acidez inicial) para observar y medir sus efectos sobre variables dependientes (acidez final, rendimiento del pretratamiento, rendimiento de biodiesel). El diseño se estructura en dos fases:

Fase 1: Corresponde a un diseño experimental factorial 2x3, donde se combinan los 2 niveles de agitación y los 3 niveles de relación másica. Cada prueba de las 6 se realizó por triplicado. Se recopilaron los valores de las variables dependientes acidez final y rendimiento del pretratamiento, para cada uno de los 18 tratamientos. Para el análisis se empleó ANOVA de doble vía.

Fase 2: Corresponde a un diseño experimental de un solo factor, donde la variable independiente es la acidez inicial, con 2 niveles, y la variable dependiente es el rendimiento del biodiesel. Se realizará 3 réplicas por cada nivel y se hará uso de las mejores condiciones de pretratamiento, encontradas en la fase 1, para cada tratamiento. Para el análisis se empleó ANOVA de una vía. revisar Tabla 2.

3.2. Población y muestra

Se recolectaron 18 kilogramos de muestra de 2 camiones cisterna cargados con aceite usado de cocina, Figura 2, que fueron adquiridos por una empresa peruana como materia prima para la producción de biodiesel. El muestreo de las cisternas se realizó con un muestreador zonal, tomando las muestras de 3 puntos diferentes, tope medio y fondo de la cisterna. Se vertieron las muestras en galoneras blancas de 3.75 Litros.

Tabla 2*Niveles de las variables independientes*

Variable	Nivel de estudio
Etapa 1: Pretratamiento del aceite de cocina	
Factor A: (variable independiente)	A1: 0.6
Relación másica (masa de glicerol crudo / masa de aceite usado de cocina)	A2: 0.65
	A3: 0.7
Factor B: (variable independiente)	B1: 200
Agitación (rpm)	B2: 600
Variables dependientes: acidez final y rendimiento del pretratamiento	
Etapa 2: Producción de biodiesel a partir de aceite usado de cocina	
Factor C (variable independiente)	C1: 3.3
Acidez inicial (mgKOH/g)	C2: 10.6
Variable dependiente: Rendimiento global	

Nota. Etapa pretratamiento: diseño Factorial 3 x 2, etapa producción de biodiesel: ANOVA de una sola vía.

Figura 2

Recolección de muestra de aceite usado de cocina



Nota. Las muestras se recolectaron en galoneras de 3.75L, con sello hermético. 12Kg corresponden al aceite de acidez elevada y 8 Kg es aceite de acidez leve, como se expone más adelante.

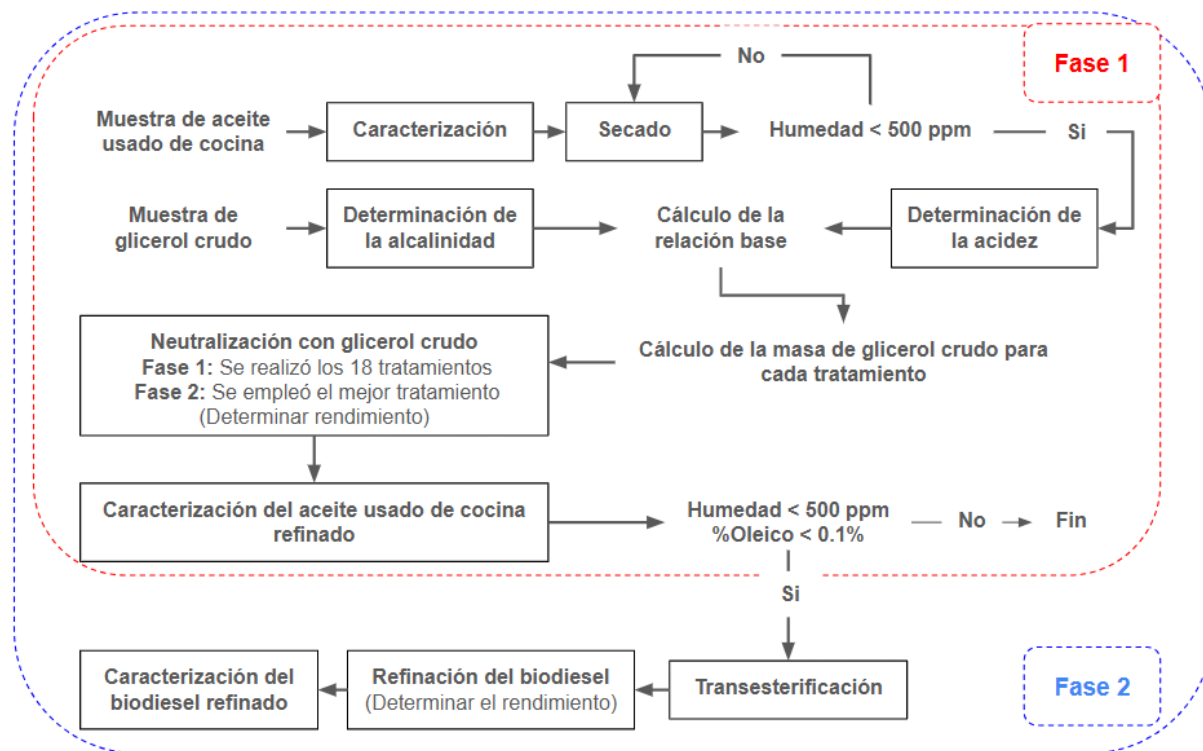
3.3. Técnicas, instrumentos, equipos y materiales

3.3.1. Las técnicas

En la figura 3, se muestra el paso a paso que se siguió para la recolección de datos en la parte experimental del proyecto.

Figura 3

Algoritmo empleado en la recolección de datos en la parte experimental



Nota. Gráfico resumen de las actividades involucradas para la fase 1 y la fase 2. Fuente:

Elaborado por el autor.

A continuación, se describe cada etapa de la figura 3.

3.3.1.1. Caracterización del aceite usado de cocina

En la siguiente tabla 3, se resumen las propiedades del aceite usado de cocina y el método utilizado para determinarlo.

Tabla 3*Propiedades del aceite usado de cocina y métodos/ instrumentos empleados*

Propiedad	Unidades	Método / instrumento
Densidad a 25 °C	Kg/m ³	ASTM D4052
Valor de acidez	mg KOH/g	ASTM D664
Ácidos grasos libres	% (oleico) en peso	AOCS Ca 5a-40
Contenido de Jabones	Ppm	AOCS Cc 17-95
Humedad	Ppm	ISO 12937
pH	0 -14	PANPEHA

Nota. Elaboración propia

3.3.1.2. Secado del aceite usado de cocina

En un vaso de precipitado de 1 L y una pastilla magnética se pesaron 800 g de aceite usado de cocina, figura 4. En la plancha calefactora con agitador magnético se calentó el aceite a 110-120°C por 30 min, con agitación constante de 600 rpm. El objetivo de este paso es reducir la humedad del aceite usado de cocina por debajo de 500 ppm.

3.3.1.3. Determinación de la acidez del aceite de cocina usado seco

Se tomó un matraz Erlenmeyer de 125 mL y se pesaron 8 g de aceite usado de cocina seco, luego se agregó 70 mL de etanol anhidro neutro. A continuación, se agregaron 3 gotas de fenolftaleína y se tituló con una solución de hidróxido de sodio 0,1 M (previamente estandarizado) hasta que se observó el viraje, figura 5. Se expresó la acidez en moles de ión hidronio por gramo de muestra, para ello se emplea la ecuación 2.

$$\text{Acidez del aceite usado de cocina (mol de H}^+\text{/g)} = \frac{0,1 \times F \times G}{1000 \times M} \quad (\text{ecuación 2})$$

Dónde, F: Factor de corrección de la solución de hidróxido de sodio 0,1 M, G: gasto de la solución de hidróxido de sodio (mL), M: Masa de la muestra de aceite usado de cocina (gramos).

Figura 4

Secado del aceite usado de cocina entre 110 y 120°C



Figura 5

Determinación de la acidez del aceite usado de cocina



3.3.1.4. Determinación de alcalinidad del glicerol crudo

Se tomó un matraz Erlenmeyer de 500mL y se pesaron 10 g de glicerol crudo, luego se agregó 100 mL de agua desionizada, a continuación, se adicionan 3 gotas de fenolftaleína y se tituló con ácido sulfúrico 1,0 M (previamente estandarizado), hasta que la solución cambió de rojo grosella a translúcido, figura 6. Se expresó la alcalinidad en moles de ión hidroxilo por gramo de muestra, para ello se utilizó la ecuación 3.

$$\text{Alcalinidad del glicerol} = \frac{1,0 \times F \times G \times 2}{1000 \times M} \quad (\text{Ecuación 3})$$

crudo (mol de OH⁻/g)

Dónde, F: Factor de corrección de la solución de ácido sulfúrico 1M, G: gasto de la solución de ácido sulfúrico (mL), M: Masa de la muestra de glicerol (gramos).

Figura 6

Determinación de la alcalinidad del glicerol crudo



3.3.1.5. Cálculo de la relación másica teórica (masa de glicerol / masa de aceite usado de cocina)

A partir de los resultados obtenidos en las ecuaciones 2 y 3, se determinó la relación másica teórica empleando la ecuación 4. Esta relación indica la cantidad de gramos de glicerol crudo necesarios para neutralizar un gramo de aceite usado de cocina.

$$\text{Relación másica teórica} = \frac{\text{Acidez del aceite usado de cocina}}{\text{Alcalinidad de glicerol crudo}} = \frac{\text{Número de moles de H}^+ \text{ gramo de UCO}}{\text{Número de moles de OH}^- \text{ gramo de Glicerol crudo}} = \frac{\text{Número de moles de H}^+ \text{ gramo de UCO}}{\text{Número de moles de OH}^- \text{ gramo de Glicerol crudo}}$$

$$\text{Relación másica teórica} = \frac{\text{gramos de glicerol crudo}}{\text{gramos de aceite usado de cocina}} \quad (\text{ecuación 4})$$

Sin embargo, en la práctica, además de la reacción de neutralización, también ocurren otras reacciones como la saponificación, la cual consume iones hidroxilo. Debido a esto, es necesario agregar un exceso de glicerol crudo para compensar dicha reacción. Por ejemplo, si la relación másica calculada es de 0.6, las pruebas de pretratamiento se realizan de manera independiente con proporciones másicas de 0.6, 0.65 y 0.7, siendo las dos últimas condiciones aquellas en las que se incorpora un exceso de glicerol.

3.3.1.6. Método propuesto: Neutralización con glicerol crudo (pretratamiento del aceite usado de cocina)

A continuación, se describe la técnica de neutralización con glicerol crudo empleada en el pretratamiento, este método es la novedad de este estudio, debido a que emplea el subproducto de la transesterificación para reducir la acidez elevada del aceite usado de cocina. En la Figura 7 se puede apreciar la simplicidad del método propuesto, que comprende el secado y la neutralización del aceite usado de cocina con glicerol crudo.

El rendimiento en la etapa de pretratamiento se calculó según la ecuación 5,

$$Rpt = \frac{Mpt}{Mi} \times 100\% \quad (\text{Ecuación 5})$$

Dónde, Rpt: rendimiento en la etapa de pretratamiento, Mpt: masa de aceite pretratada en gramos, Mi: Masa inicial de aceite en gramos.

El procedimiento para la neutralizar el aceite usado de cocina con glicerol crudo, figura 8, es el siguiente:

En un vaso de precipitado de 1 L, se pesaron 500 g de aceite usado de cocina, mientras que en otro vaso se añadió la cantidad de glicerol crudo correspondiente a la relación másica empleada para cada tratamiento. Ambos vasos, con sus respectivos contenidos, se colocaron sobre una plancha calefactora con agitador magnético y se calentaron hasta alcanzar una temperatura de 55°C, manteniendo una agitación de 400 rpm. Figura

Una vez se alcanzó la temperatura establecida, se ajustó la velocidad de agitación en el vaso que contiene el aceite usado de cocina de acuerdo con los valores correspondientes para cada tratamiento. A continuación, se procedió a verter lentamente el glicerol crudo en el aceite, distribuyendo éste de manera uniforme. Una vez se completó la adición del glicerol, transcurre el tiempo de reacción dónde el tiempo de reacción para las pruebas a 200 rpm es de 60 min y para los tratamientos a 600 rpm es de 15 min.

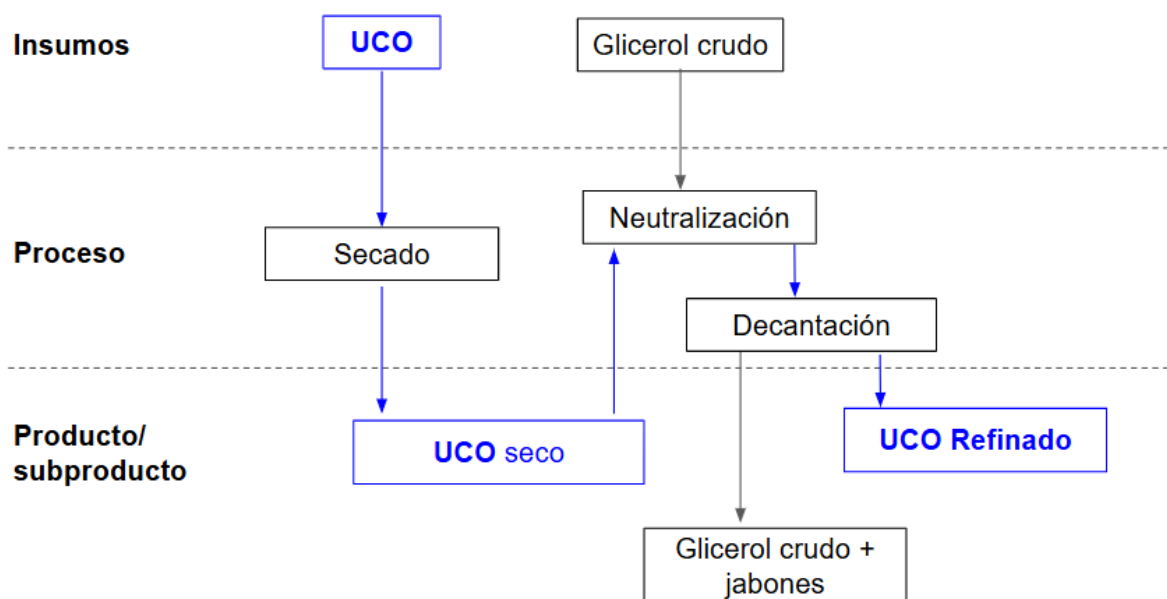
Transcurrido este periodo, se detuvo la reacción y la mezcla fue transferida a una pera de decantación y se dejó reposar por 30 min. Posteriormente, se separaron las fases obtenidas: la fase inferior, compuesta por glicerol crudo con jabones, y la fase superior, correspondiente al aceite usado de cocina refinado. Este último se pesó con el fin de calcular el rendimiento del pretratamiento.

Finalmente, se determinó la calidad del aceite refinado mediante la cuantificación de los siguientes parámetros: contenido de ácidos grasos libres (expresado como % m/m de ácido oleico), contenido de jabones y humedad. Si el aceite usado de cocina tratado tiene un contenido

de ácidos grasos libres inferior al 0,1% y la humedad menor a 500 ppm, entonces el aceite es apto para la reacción de transesterificación.

Figura 7

Diagrama de pretratamiento del aceite usado de cocina con glicerol crudo



Nota. En el gráfico el aceite usado de cocina se representa con las siglas “UCO” del inglés Used Cooking Oil. Las flechas azules señalan el flujo de la corriente de interés en el método propuesto.

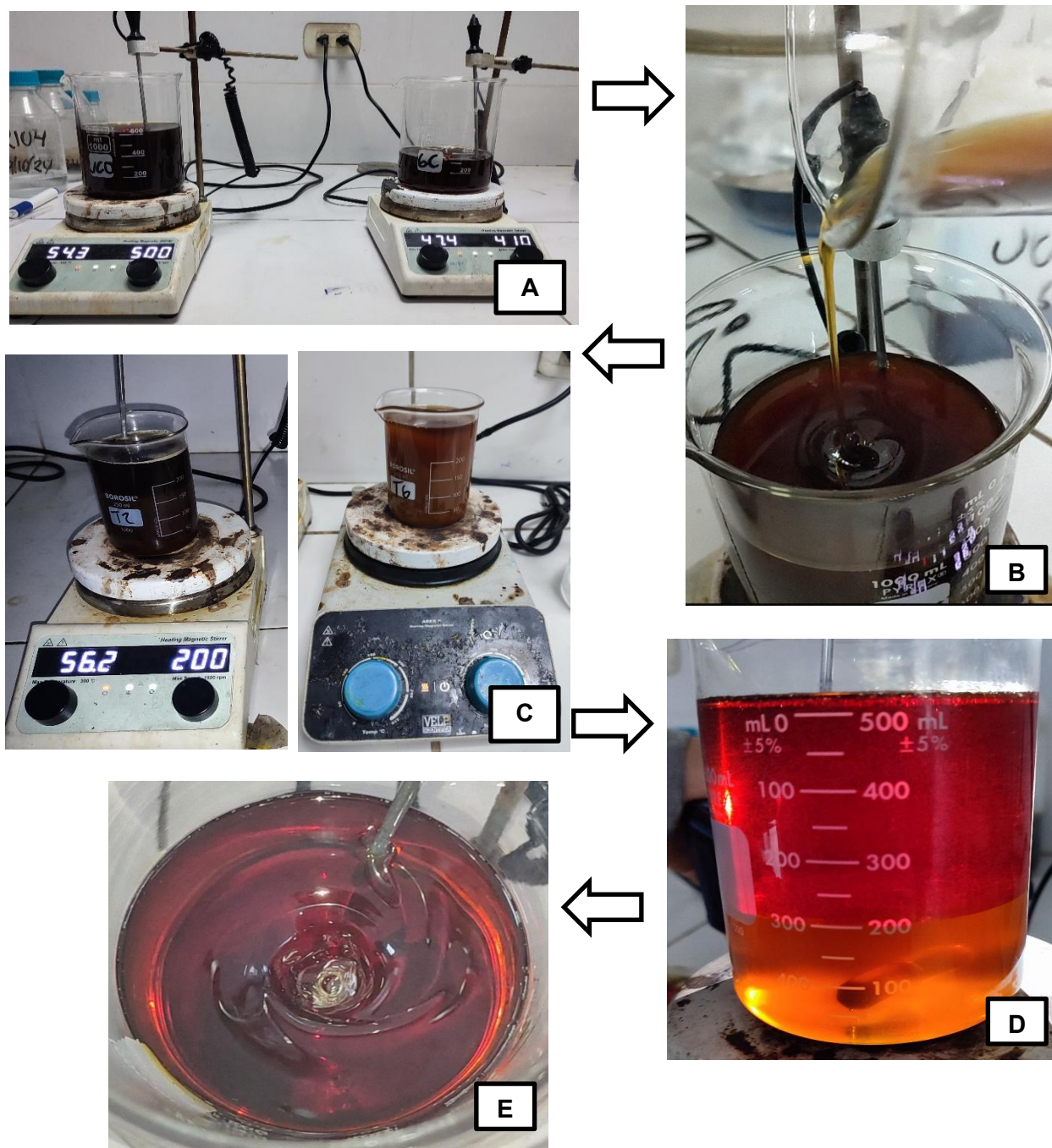
Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.7. Caracterización del aceite usado de cocina refinado

En la siguiente tabla 4 se resumen las propiedades del aceite usado de cocina refinado y el método que se empleó para determinarlo. Estos parámetros del aceite usado de cocina permiten conocer si el aceite es apto para transesterificar.

Figura 8

Proceso de pretratamiento del aceite usado de cocina con glicerol crudo



Nota. A. Calentamiento del aceite usado de cocina (izquierda) y glicerol crudo (derecha) hasta 55°C. B. Mezcla del glicerol y el aceite. C. Reacción de neutralización. D. Decantación y separación. E. Aceite refinado.

Tabla 4

Propiedades del aceite usado de cocina y métodos/ instrumentos de determinación

Propiedad	Unidades	Método / instrumento
Ácidos grasos libres	%en peso (oleico)	AOCS Ca 5a-40
Contenido de Jabones	Ppm	AOCS Cc 17-95
Humedad	Ppm	ISO 12937

Nota. Elaboración propia.

3.3.1.8. Método de Transesterificación de aceite usado de cocina con metanol empleando NaOH como catalizador

La cantidad de hidróxido de sodio utilizado en la reacción corresponde al 0,5% de la masa de aceite, mientras que la cantidad de metanol equivale al 20% en masa.

En un vaso de precipitado de 250 mL, se mezcló el metanol (pureza > 99.7%) y la soda en escamas, se agitó vigorosamente hasta que este último se disolvió por completo, esta solución se denomina premezcla, figura 9 y 10.

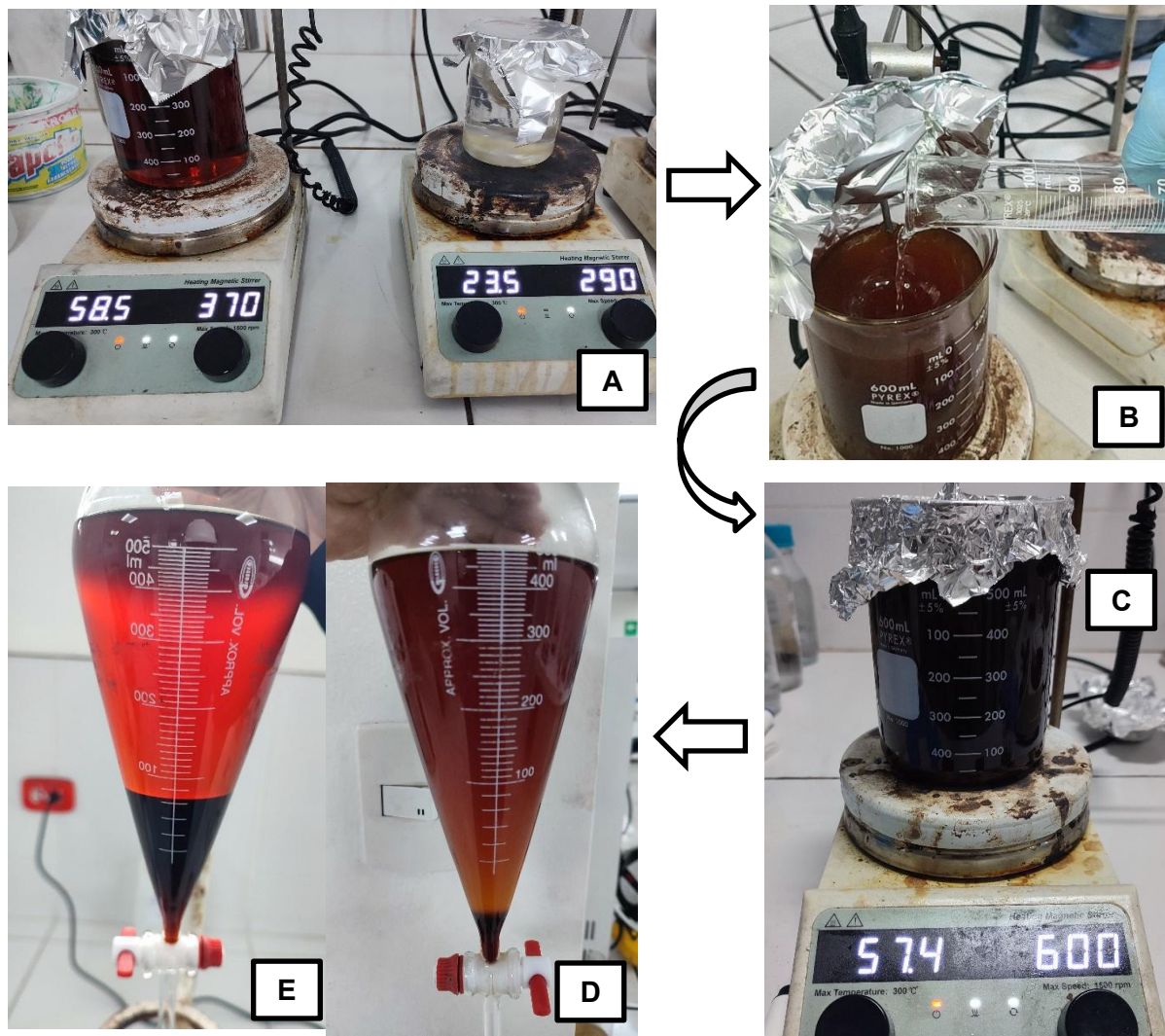
En un vaso de precipitado de 600 mL, se pesaron 400 g de aceite usado de cocina previamente pretratado y se calentó hasta 60 °C, manteniendo una agitación constante de 600 rpm. Una vez alcanzada la temperatura deseada, se realizó la reacción de transesterificación, la cual se lleva a cabo en dos etapas:

1. **Primera reacción:** Se agregó el 95% de la premezcla (equivalente a 78 g) mientras se mantiene la agitación constante, 600rpm. La reacción se desarrolló durante 1 hora. Transcurrido este periodo, la mezcla se dejó en reposo en una pera por 30 minutos para permitir la decantación del glicerol formado.

2. **Segunda reacción:** A la fase apolar obtenida, tras la primera decantación, se le agregó el 5% restante de la premezcla (4 g). La reacción se mantuvo por 1 hora adicional, seguida de otro proceso de decantación para separar el glicerol residual. Revisar la figura 9.

Figura 9

Proceso de transesterificación del aceite usado de cocina



Nota. A. Calentamiento del aceite usado de cocina (izquierda) hasta 60°C y premezcla (derecha). B. Mezcla del aceite con la premezcla. C. Reacción de transesterificación. D y E decantación y separación del glicerol crudo del biodiesel 1era y 2da reacción respectivamente.

3.3.1.9. Refinación del biodiesel

Una vez finalizada la reacción, la mezcla fue transferida a una pera de decantación para separar el biodiesel del subproducto glicerol crudo.

El biodiesel obtenido se sometió a un proceso de lavado para eliminar impurezas, jabones y trazas de glicerol. En un vaso de precipitado de 1 L se le agregó agua acidulada a pH 3 (se empleó ácido fosfórico) en una proporción de 1 parte de agua por cada 5 partes de biodiesel, se agita de manera suave y se deja decantar, se repite esta etapa 3 veces. En el tercer lavado la mezcla se sometió a una agitación de 600 rpm hasta alcanzar una temperatura de 90 °C. Luego, se deja decantar en una pera de decantación por 15 minutos, permitiendo así la separación de la fase acuosa del biodiesel. Durante este proceso, el agua elimina los jabones y las trazas de glicerol presentes en el biodiesel.

El biodiesel lavado fue secado a presión atmosférica a 120°C por 30 min, figura 10 y 11. Finalmente, se pesó la masa del biodiesel refinado, un dato fundamental para el cálculo del rendimiento de todo el proceso productivo de biodiesel.

Se calculó el rendimiento de las etapas de transesterificación y refinación mediante la ecuación 6.

$$Rt = \frac{Mb}{Mpt} \times 100\% \quad (\text{Ecuación 6})$$

Dónde, Rt: rendimiento en la etapa de transesterificación-refinación (%masa), Mpt: masa de aceite usado de cocina refinado (gramos) y Mb: Masa de biodiesel obtenido (gramos).

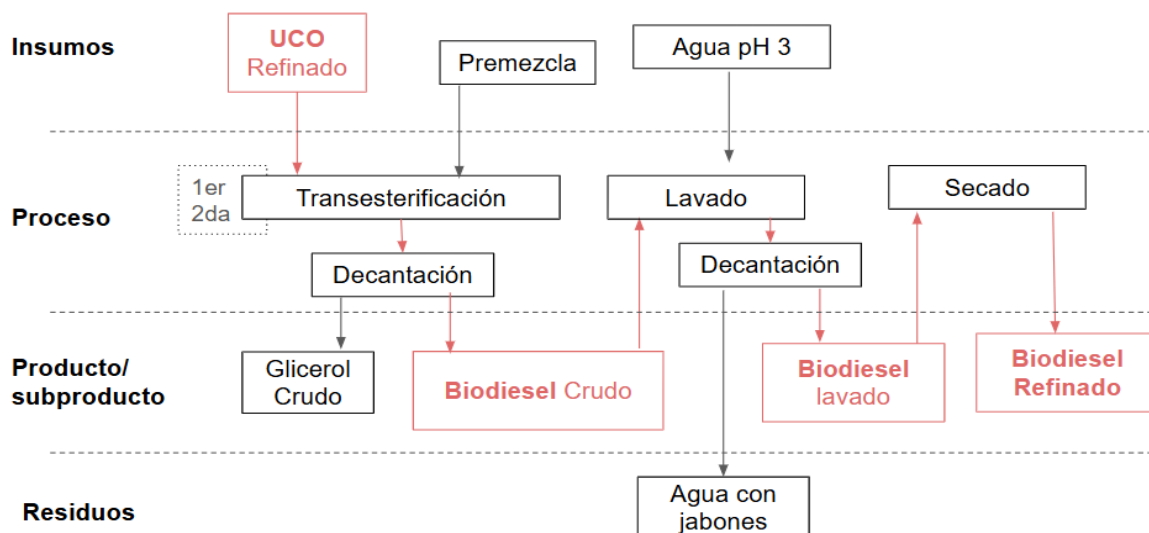
Para determinar el rendimiento global en la producción de biodiesel a partir de aceite usado de cocina, se empleó la ecuación 7.

$$Rg = Rt \times Rpt \times 100\% \quad (\text{ecuación 7})$$

Dónde, Rt: rendimiento en la etapa de transesterificación-refinación (en fracción masa), Rpt: rendimiento en la etapa de pretratamiento (en fracción masa) y Rg: rendimiento global (%masa).

Figura 10

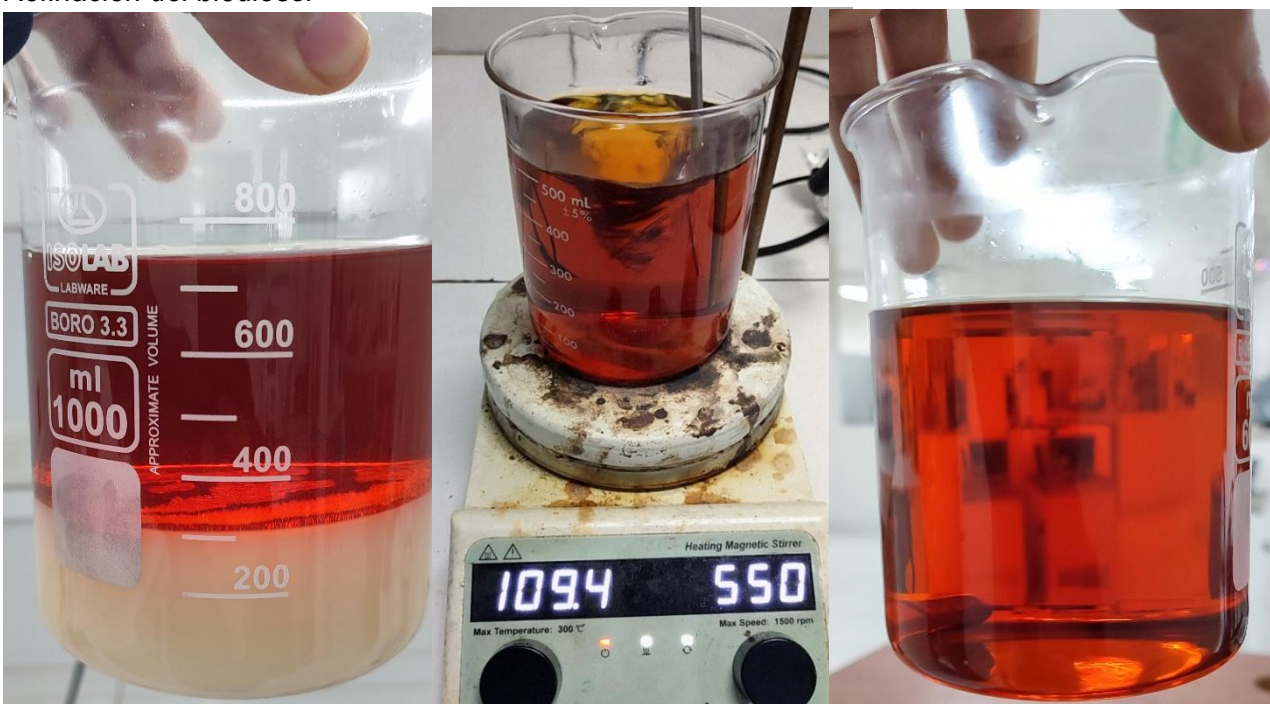
Diagrama de transesterificación y refinación de biodiesel



Nota. En el gráfico el aceite usado de cocina se representa con las siglas “UCO” del inglés Used Cooking Oil. Las flechas rojas señalan el flujo de la corriente de interés. Fuente: Elaboración propia.

Figura 11

Refinación del biodiesel



Nota. Izquierda, lavado, fase inferior agua con jabones fase superior biodiesel lavado. Centro, secado 120°C por una hora. Derecha biodiesel refinado producto final.

3.3.1.10. Calidad del biodiesel producido

Los parámetros a evaluar del biodiesel se listan en la tabla 5.

Tabla 5

Propiedades del biodiesel y métodos/instrumentos empleados

Propiedad	Unidades	Método / instrumento
Número de acidez**	mg KOH/g	ASTM D664
Contenido de Jabones	Ppm	AOCS Cc 17-95
Contenido de agua (humedad)**	Ppm	UNE-EN ISO 1293
Viscosidad a 40 °C**	cSt	ASTM D445
Densidad @ 15 °C**	Kg/m ³	ASTM D4052
Gravedad API a 60 °F	API	ASTM D4052
Agua y sedimentos**	% volumen	ASTM D 2709
Flash Point**	°C	ASTM D93
Cloud Point **	°C	ASTM D2500
Pour Point**	°C	ASTM D97
Monoglicéridos saturados (MGS-B5)**	mg/L	NTP 321.125
Contenido de Monoglicéridos **	% m/m	ASTM D6584
Contenido de Diglicéridos **	% m/m	ASTM D6584
Contenido de Triglicéridos **	% m/m	ASTM D6584
Glicerina Libre**	% m/m	ASTM D6584
Glicerina Total **	% m/m	ASTM D6584

Nota. Las propiedades del biodiesel con ** se encuentran referenciadas en la NTP 321.125, versión 2019.

3.3.2. Equipos e instrumentos empleados en la recolección de datos

Insumos

- Aceite usado de Cocina
- Glicerol Crudo (subproducto de la reacción de transesterificación)
- Hidróxido de sodio en escamas
- Ácido fosfórico concentrado
- Metanol alta pureza >99,7% v/v
- Agua desionizada

Reactivos

- Solución de hidróxido de sodio 0,1 M, previamente estandarizado.
- Solución de ácido clorhídrico 0,01 M, previamente estandarizado.
- Solución de ácido sulfúrico 1,0 M, previamente estandarizado.
- Acetona grado analítico.
- Etanol anhidro.
- Indicadores fenolftaleína y azul de bromofenol.

Materiales

- 3 vasos de precipitado 1 Litro
- 2 vasos de precipitado 600 mL
- 1 vaso de de precipitado 350mL
- 2 planchas calentadores con agitador magnético
- 2 pastillas magnética
- 2 termómetros de 0 - 200°C
- 2 peras de decantación de 500 mL
- Probeta de 100 mL y 10 mL.

- Matraz de Erlenmeyer de 125 y 200 mL
- Pipeta de 10 mL
- Pipetas plásticas Pasteur
- 2 soportes universal.
- Papel indicador de pH.

Equipos

- Karl Fisher coulometry, marca Metrohm
- Balanza analítica y de precisión.
- Cromatógrafo de gases, marca Shimadzu, modelo GC-2010 plus.
- Densímetro Anton paar, modelo DMA 4500 M
- Equipo para punto nube y POFF, marca y modelo HK-1015A
- Equipo para flash point, marca y modelo HK-261
- Equipo para determinar la viscosidad, marca y modelo HK-1005A

3.3.3. Técnica y procedimiento de análisis de datos

Los datos experimentales recolectados en la fase 1 y 2, se someten al análisis estadístico, para luego dar respuesta a los objetivos de la investigación. El procedimiento se describe a continuación:

3.3.3.1. Organización de los datos

Los datos recolectados en el laboratorio para cada una de las réplicas experimentales se registraron en tablas, en hojas de cálculo de Google Sheets. Para luego someterse al análisis estadístico ANOVA, los cálculos estadísticos se realizaron en Google Colab mediante el código escrito Python.

3.3.3.2. Verificación de Supuestos Paramétricos:

Antes de realizar el análisis de varianza (ANOVA), se comprobaron los supuestos paramétricos como sigue: la normalidad de los datos dentro de cada grupo experimental mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas entre los grupos experimentales mediante la prueba de Levene. Con el fin de que ANOVA, proporcione resultados fiables.

3.3.3.3. Análisis Estadístico Inferencial (Prueba de Hipótesis):

Las pruebas específicas aplicadas para cada fase del estudio fueron:

- **Para la Fase 1: Pretratamiento del aceite usado de cocina**

Se aplicó un Análisis de Varianza (ANOVA) de doble vía o factorial. Esta técnica se utilizó para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en la acidez final y el rendimiento del pretratamiento que puedan ser atribuidas a los efectos principales de las variables independientes, agitación y relación másica, o a su interacción.

- **Para la Fase 2: Producción de biodiesel a partir de aceite usado de cocina**

Se empleó ANOVA de una vía o unifactorial, con el fin de evaluar si existe diferencia en el rendimiento de biodiesel, en los 2 niveles de la variable independiente (acidez inicial del aceite usado de cocina), para determinar si esta variable tiene un efecto significativo en el rendimiento de biodiesel.

3.3.3.4. Pruebas de Comparaciones Múltiples (Post-Hoc):

En los casos en que el resultado del ANOVA indicó una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos (para factores con tres o más niveles, como la relación másica y la acidez inicial), se procedió a realizar una prueba post-hoc de Tukey (HSD). Esta prueba permitió

identificar de manera específica qué pares de grupos presentaban diferencias significativas entre sí.

3.3.3.5. Nivel de Significancia:

Para todas las pruebas de hipótesis realizadas, se estableció un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Por lo tanto, un valor p inferior a 0.05 se consideró como evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula y concluir que existía un efecto o diferencia estadísticamente significativa.

4. RESULTADOS

4.1. Caracterización del aceite usado de cocina

Antes de empezar a realizar los distintos experimentos, se necesita conocer las principales características de nuestra materia prima. En la siguiente tabla 6 se resumen los resultados obtenidos de la caracterización de las 2 variedades del aceite usado de cocina empleadas en este proyecto, para diferenciarlas se les denomina acidez leve y elevada, según su contenido de ácidos grasos libres.

Tabla 6

Resultados de la caracterización del aceite usado de cocina empleado.

Propiedad	Unidades	Método / instrumento	Acidez leve	Acidez elevada
Valor de acidez	mgKOH/g	ASTM D664	3,04	10,55
Ácidos grasos libres	Oleico (%m/m)	AOCS Ca 5a-40	1,53	5,3
Densidad a 25 °C	Kg/m ³	ASTM D4052	917,25	915,69
Contenido de Jabones	ppm	AOCS Cc 17-95	217	170
Humedad	ppm	ISO 12937	2310	3177
pH	0 -14	PANPEHA	5	4.5

Nota. Elaboración propia

Para poder realizar la reacción de transesterificación es necesario que la materia prima tenga valores de contenido de ácidos grasos libres y agua no mayor a 1% masa y 0.3% masa, respectivamente. (Mathew et al. 2021)

Para este trabajo los valores aceptables para poder realizar la transesterificación son: menor a 0.1%masa de acidez y 500 ppm de humedad. Como era de esperarse, los 2 tipos de materias primas tienen contenido de humedad y ácidos grasos libres fuera del límite máximo

permitido. Por tal motivo las 2 materias primas requieren una etapa de pretratamiento; ver la figura 7.

4.2. Secado del aceite usado de cocina

Reducir la humedad en la materia prima se logra a condiciones de entre 110 y 120°C, 30 min y agitación 600 rpm. Los resultados se muestran en la tabla 7.

Tabla 7

Resultados de humedad luego de secar la materia prima

Propiedad	Unidades	Método / instrumento	Fase1	Fase 2	
			Acidez elevada	Acidez leve	Acidez elevada
Humedad	ppm	ISO 12937	296	402	351

Nota. Elaborado por el autor

Como se puede visualizar en la tabla 7 el contenido de humedad para todas las materias primas se encuentra por debajo de 500 ppm, después de la etapa de secado.

4.3. Cálculo de la relación másica teórica.

La siguiente etapa es reducir el contenido de ácidos grasos libres en el aceite; para este fin se calcula la cantidad de masa de glicerol crudo que neutraliza una unidad de masa de aceite usado de cocina, este valor se denomina relación másica teórica.

Para calcular la relación másica teórica, primero se determina la acidez del aceite y alcalinidad del glicerol crudo, según lo establecido en el inciso 3.3.1.3 y 3.3.1.4, respectivamente.

Con los valores obtenidos se calcula la relación másica teórica, según la ecuación 4 del inciso 3.3.1.5. Posteriormente, con el valor encontrado se establecen la relación másica de trabajo para cada tratamiento. Los resultados se resumen en la tabla 8.

Tabla 8

Resultados de acidez del aceite usado de cocina y alcalinidad del glicerol crudo

Insumo	Propiedad	Fase1	Fase 2	
		Acidez elevada	Acidez leve	Acidez elevada
Aceite usado de cocina	Acidez Oleico(%m/m)	5.27	1.55	5.48
	mol H ₃ O ⁺ /g	1.87E-04	5.50E-05	1.94E-04
Glicerol crudo	Alcalinidad Metilato(%m/m)	1.7	2.14	2.14
	mol OH ⁻ /g	3.19E-04	4.00E-04	4.00E-04
Relación másica teórica		0.59	0.15	0.5
Relación másica de trabajo		0.6, 0.65 y 0.7	0.3	0.65

Nota. La acidez del aceite y la alcalinidad del glicerol crudo son utilizados para calcular la relación másica teórica y la relación de trabajo. La relación de trabajo para la fase 2 se calculó sumando 0.15 a la relación teórica. Los valores de relación másica teórica para acidez leve y acidez elevada de la fase 2 se redondearon a 0.15 y 0.5 respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

Con esta información obtenida se inicia la fase 1 del diseño experimental.

4.4. Fase 1: Neutralización con glicerol crudo - método propuesto

La fase 1 responde al primer objetivo específico, dónde se busca identificar los valores de agitación y relación másica que favorezcan el rendimiento y la reducción de la acidez por debajo de 0.1% en masa, en la etapa de pretratamiento. Tener en cuenta que, la acidez inicial del aceite usado de cocina para los 18 tratamientos de esta fase 1 fue de ntp. Se experimentó manipulando las variables independientes relación másica en 3 niveles (0.6, 0.65 y 0.7) y agitación en 2 niveles (200 y 600 rpm), los tratamientos

realizados a 200 rpm y 600 rpm tuvieron un tiempo de reacción de 60 y 15 min respectivamente. Los resultados se resumen en la tabla 9 , además, de las variables de estudio se presenta información adicional sobre la humedad y los jabones luego del pretratamiento, la humedad permanece constante en los 16 tratamientos y en cuanto a los jabones es ligeramente superior para las pruebas realizadas a 600 rpm de agitación, este aumento va de la mano con una mayor reducción de la acidez.

Tabla 9

Resumen de los resultados de rendimiento y caracterización del aceite usado de cocina pretratado para los 6 tratamientos con sus 3 réplicas

Fase 1						
item	Agitación (rpm)*	Relación másica*	Rendimiento (%m/m)**	Acidez final Oleico (%m/m)**	Humedad (ppm)	Jabones (ppm)
T1.1	200	0,6	97,6	1,5	358	770
T1.2	200	0,6	97,1	1,6	300	838
T1.3	200	0,6	98,1	1,77	364	846
T2.1	200	0,65	97,26	1,47	420	802
T2.2	200	0,65	97,08	1,64	295	965
T2.3	200	0,65	98,06	1,62	297	912
T3.1	200	0,7	96,17	1,37	361	794
T3.2	200	0,7	96,2	1,44	270	972
T3.3	200	0,7	97,48	1,47	306	964

T4.1	600	0,6	95,4	0,26	328	1387
T4.2	600	0,6	94,6	0,28	318	1187
T4.3	600	0,6	95,83	0,36	349	1029
T5.1	600	0,65	94,32	0,2	323	1560
T5.2	600	0,65	94,52	0,18	304	1621
T5.3	600	0,65	95,4	0,23	319	1461
T6.1	600	0,7	93,44	0,03	295	1394
T6.2	600	0,7	94,37	0,04	315	1366
T6.3	600	0,7	94,4	0,11	340	1367

Nota. *Variables independientes y **variables dependientes estudiadas. Recordar que la inicial del aceite usado de cocina para los 16 tratamientos fue de 5.27% en masa.

4.4.1. Análisis estadístico ANOVA- variable dependiente acidez final.

Este apartado busca identificar los valores de las variables independientes agitación y relación másica que permitan reducir la acidez del aceite usado de cocina por debajo de 0.1% masa. Para obtener resultados más rigurosos se realiza el análisis de varianzas ANOVA, para encontrar las diferencias significativas entre los 6 tratamientos experimentales.

Previamente al análisis estadístico ANOVA de doble vía para la variable dependiente acidez final, se verificaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad de los datos mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente. Luego de verificar los supuestos, se realiza la prueba de ANOVA de doble vía, los resultados se muestran en la tabla 10. Esta tabla evalúa cómo dos factores, relación másica y agitación, afectan a la variable de

respuesta Acidez final. Además, y muy importante, evalúa si estos factores interactúan entre sí. Recordar que el nivel de significancia empleado es $\alpha = 0.05$.

Tabla 10

Resultados del análisis ANOVA para las variables independientes agitación y relación másica, y la variable dependiente acidez final.

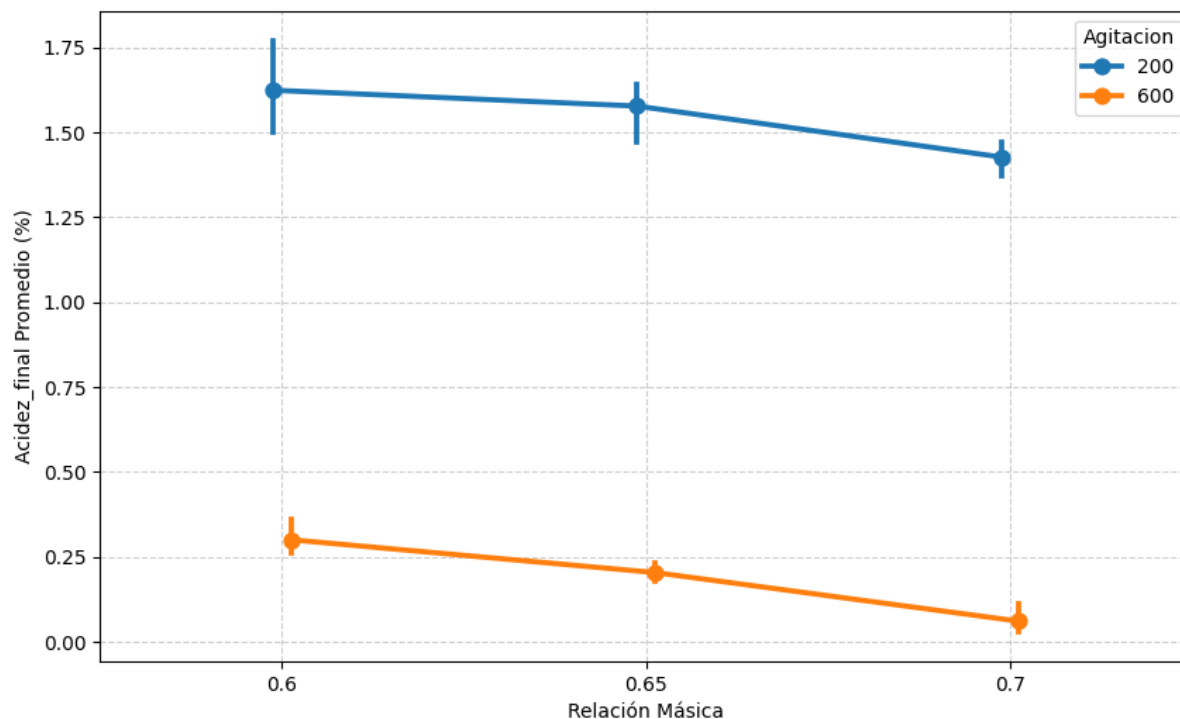
Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Valor F	p Valor
Agitación x relación másica	2	0.002211	0.1882	8.3079e-01
Agitación	1	8.255339	1405.8287	8.3222e-14
Relación másica	2	0.148633	12.6556	1.1067e-03
Residuo	12	0.0070467	-	-

Nota. Valores $p < 0.05$, rechazan la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, que afirma que existe diferencias significativas entre los grupos o niveles de la variable independiente.

La interacción entre las variables independientes tiene un **p-valor** de $0.8308 > 0.05$, ver tabla 10, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula la cual menciona que no existe interacción significativa entre los factores relación másica y agitación, en otras palabras, el efecto de la relación másica sobre la acidez final es el mismo sin importar el nivel de agitación, y viceversa. Además, las “líneas” en un gráfico de interacción serían aproximadamente paralelas, cuando no existe interacción entre las variables independientes, revisar figura 12. Este hecho permite estudiar las variables independientes por separado, como se expone a continuación.

Figura 12

Gráfico de interacción acidez final promedio (Oleico %m/m) vs relación másica v agitación



Fuente: Elaboración propia

- **Efecto de la agitación en la acidez final.**

El valor p es $8.32e-14 < 0.05$, en consecuencia, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que existe un efecto muy fuerte y estadísticamente significativo del nivel de agitación sobre la acidez final. Esto significa que los diferentes niveles de agitación 200 y 600 rpm producen, en promedio, valores de acidez final muy diferentes. Siendo el valor de agitación de 600 rpm, el cual permite reducir la acidez hasta valores por debajo de 0.4% masa de ácido oleico. Recordar que el objetivo del pretratamiento es reducir la acidez por debajo de 0.1% masa, para esta investigación.

- **Efecto de la relación másica en la acidez final.**

El valor p es $0.0011 < 0.05$, también se rechaza la hipótesis nula y se afirma que existe un efecto estadísticamente significativo del factor relación másica sobre la acidez final. Esto indica que, en promedio, al menos uno de los niveles de relación másica (0.6, 0.65, 0.7) produce un valor de acidez final diferente a los otros. Para confirmar lo anterior, se realiza una prueba de ANOVA de una vía, solo para los tratamientos desarrollados a 600 rpm (valor de agitación que reduce la acidez del aceite usado de cocina de manera significativa), seguida por una prueba post hoc (Tukey HSD), con el fin de identificar cuáles son los grupos de relación másica diferentes. Los resultados de la ANOVA son un F valor de 24.606 y un p valor de $1.283e-03$, concluyendo que al menos un grupo presenta diferencias significativas respecto al resto. En la tabla 11 se puede revisar los resultados de la prueba Tukey HSD, que permite reconocer cuál es el grupo con resultados significativamente diferente.

Tabla 11

Resultados de la prueba Tukey HSD para los niveles de la variable relación másica y su efecto en la acidez final, en condiciones de agitación de 600 rpm.

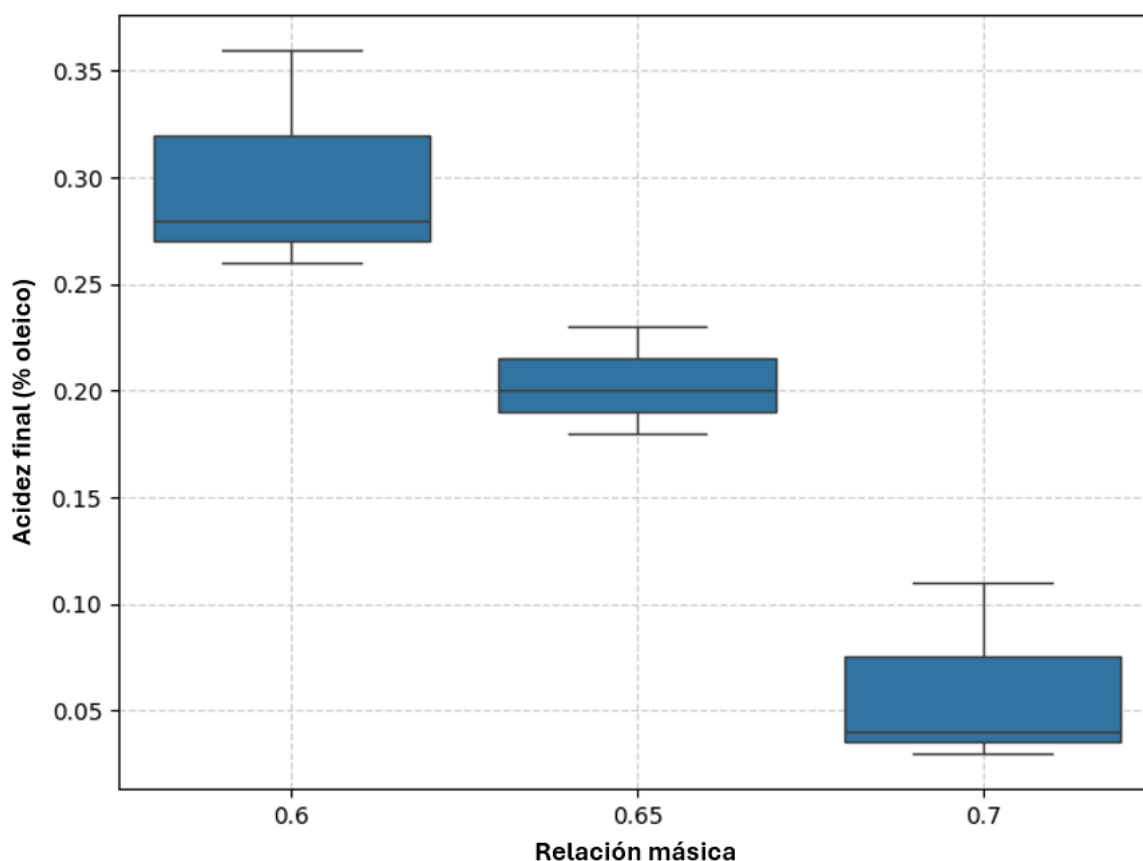
Grupo 1	Grupo 2	Diferencia media	p valor
0.6	0.65	-0.0967	0.0691
0.6	0.7	-0.24	0.0011
0.65	0.7	-0.1433	0.014

Nota. Elaboración propia.

El grupo 0.7_600, es el único que presenta diferencias estadísticamente significativas, con respecto a los otros dos. Teniendo en cuenta lo anterior, se corrobora en la figura 13, que la combinación relación másica 0.7 y agitación de 600 rpm, reduce la acidez alrededor de 0.1% masa, alcanzando el valor deseado de acidez final.

Figura 13

Distribución de la acidez final vs la relación másica, tratamientos realizados a 600 rpm.



Nota. Es fácil visualizar que el pretratamiento realizado con una relación másica de 0.7 y agitación de 600 rpm reduce la acidez del aceite usado de cocina por debajo de 0.1% masa. Elaboración propia.

Entonces, se concluye que una agitación de 600 rpm y valores de relación másica mayores o iguales a 0.7, para una relación teórica de 0.6, permite neutralizar el aceite usado de cocina alcanzando valores de acidez final menores a 0.1% masa, respondiendo de esta manera parte del primer objetivo específico.

Una pregunta que surge aquí es ¿Por qué es necesario emplear una relación másica mayor al valor teórico para poder alcanzar valores de acidez inferiores al 0,1%? Esta situación,

puede justificarse con el hecho de que además de la reacción de neutralización se esté desarrollando otra reacción que consumen el componente alcalino, dicha reacción podría ser la saponificación.

4.4.2. Análisis estadístico ANOVA- variable dependiente rendimiento pretratamiento.

Luego de verificar los supuestos, se realiza la prueba de ANOVA de doble vía para la variable dependiente rendimiento del pretratamiento, los resultados se muestran en la tabla 12.

Tabla 12

Resultados del análisis ANOVA para las variables independientes agitación y relación másica, y la variable dependiente rendimiento del pretratamiento.

Fuente de variación	de	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Valor F	p Valor
Agitación x relación másica		0.1186	2	0.16955	8.4603e-01
Agitación		28.8041	1	82.3352	1.0e-06
Relación másica		3.7834	2	5.4074	2.1174e-02
Residuo		4.1981	12	-	-

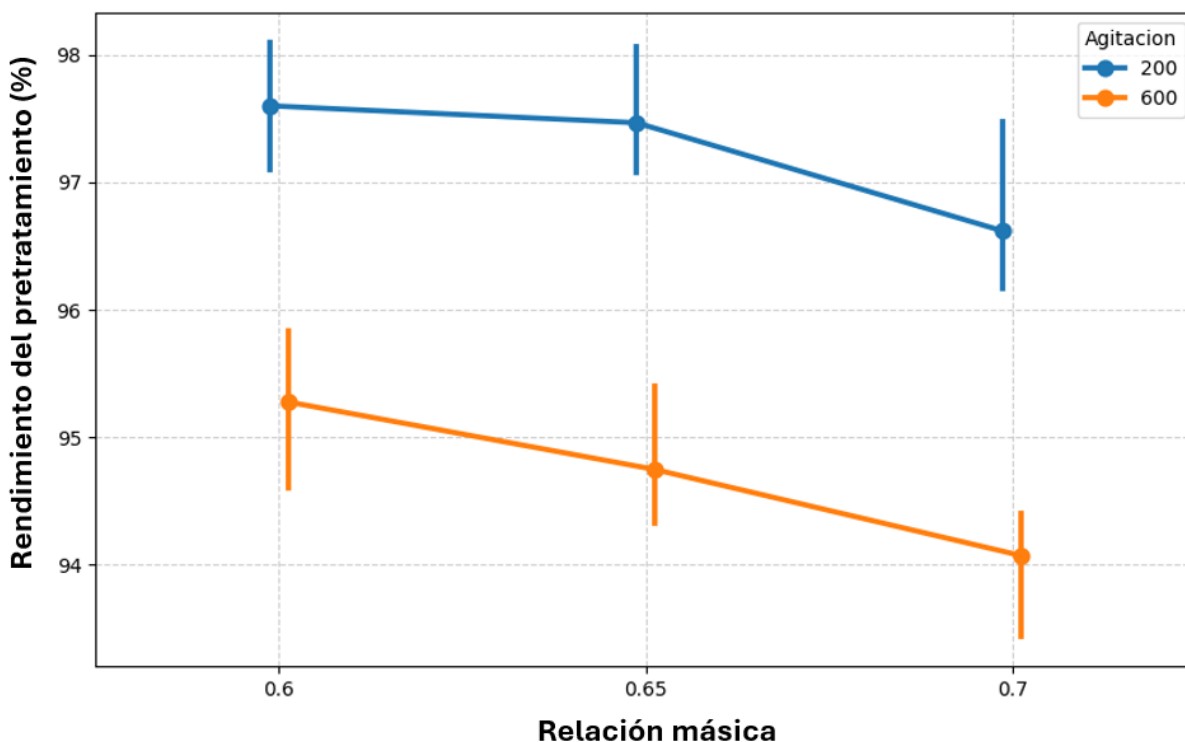
Nota. Valores $p < 0.05$, rechazan la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, que afirma que existe diferencias significativas entre los grupos o niveles de la variable independiente.

La interacción entre las variables independientes tiene un **p-valor** de $0.8460 > 0.05$, en otras palabras, el efecto de la relación másica sobre el rendimiento del pretratamiento es el mismo sin importar el nivel de agitación, y viceversa. Además, las “líneas” en un gráfico de interacción, figura 14, son aproximadamente paralelas, cuando no existe interacción entre las

variables independientes. Esto permite estudiar el efecto de los factores de manera independiente.

Figura 14

Gráfico de interacción rendimiento del pretratamiento (%) vs relación másica y agitación



Nota. Elaboración propia

- **Efecto de la agitación en el rendimiento del pretratamiento.**

El p-valor para la agitación es extremadamente pequeño, ver tabla 12, Esto significa que los diferentes niveles de agitación 200 y 600 rpm producen, en promedio, valores de rendimiento del pretratamiento muy diferentes. Ver la figura 14, se visualiza que los tratamientos desarrollados a 600 rpm tienen un valor de rendimiento inferior. Las medias porcentuales para el rendimiento del pretratamiento en los grupos de 200 y 600 rpm, 97.23% y 94.7%, respectivamente, tienen una diferencia aproximada del 3%, un valor aceptable, considerando que los tratamientos a 600 rpm son los únicos que reducen la acidez a valores deseados.

- **Efecto de la relación másica en el rendimiento del pretratamiento.**

Los datos del punto anterior confirman que el pretratamiento debe desarrollarse a 600 rpm, por tal motivo, realizaremos un análisis ANOVA de una vía para los grupos de relación másica (0.6, 0.65, 0.7) a 600 rpm, con el fin de detectar alguna diferencia estadísticamente significativa en los resultados de rendimiento del pretratamiento. Los resultados del ANOVA se pueden ver en la tabla 13.

Tabla 13

Resultados del análisis ANOVA para la variable independiente relación másica y la variable dependiente rendimiento del pretratamiento.

Fuente de variación	de	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Valor F	p Valor
Relación másica		2.1948	2	3.2351	1.1139e-01
Residuo		2.0353	6	-	-

Nota. El valor de $p > 0.05$, en consecuencia, se acepta la hipótesis nula, la cual afirma que no existen diferencias significativas entre los grupos o niveles de la variable independiente.

Los resultados de la tabla 13 muestran que no existe diferencia significativa para el rendimiento del pretratamiento entre los distintos niveles de la variable relación másica desarrollados a 600rpm.

Se concluye esta primera fase y en respuesta al primer objetivo específico: Las mejores condiciones para pretratar el aceite usado de cocina que tiene una acidez inicial de 5.27% masa, son: una agitación de 600 rpm y una relación másica 0.7 o mayor, para una relación teórica de 0.6. Dicho escenario permite alcanzar un valor de acidez promedio de 0.06% masa con un rendimiento promedio del 94.07% en la etapa de pretratamiento.

4.5. Fase 2: Producción de biodiesel a partir de aceite usado de cocina

Identificadas las mejores condiciones de pretratamiento, en la fase 1, se emplea esta información para pretratar aceite usado de cocina, pero ahora con diferentes niveles de acidez inicial, revisar tabla 2- fase 2. El objetivo es evaluar cómo evoluciona el rendimiento del pretratamiento y el rendimiento del biodiesel al variar la acidez inicial de la materia prima, objetivos específicos 2 y 3. Se establecieron 2 niveles de acidez con 3 réplicas, en total 6 tratamientos. Revisemos los resultados en la tabla 14 y figura 15.

Tabla 14

Resumen de los resultados de rendimiento para las etapas de pretratamiento (pre), transesterificación - refinación (trans- ref) y rendimiento de biodiesel.

Fase 2					
item	Acidez inicial Oleico (%m/m)*	Acidez final Oleico (%m/m)	Rendimiento (pre) (%m/m)**	Rendimiento (trans - ref) (%m/m)	Rendimiento de Biodiesel (%m/m)**
T1.1	1.55	0,03	100.2	95.73	95.92
T1.2	1.55	0,06	99.78	95.38	95.17
T1.3	1.55	0,05	99.82	95.53	95.34
T2.1	5.48	0,05	95.55	95.21	90.97
T2.2	5.48	0,04	95.6	95.08	90.89
T2.3	5.48	0,05	95.69	95.4	91.29

Nota. *Variables independientes y **variables dependientes estudiadas. El pretratamiento se desarrolló a 600 rpm de agitación, 15 min y una relación másica de 0.15 más, respecto a la

relación teórica, ver tabla 8. El rendimiento de biodiesel es el valor que contempla el rendimiento de todo el proceso productivo, esto incluye pretratamiento, transesterificación - refinación.

Figura 15

Biodiesel producido 3 réplicas por cada nivel de acidez inicial



4.5.1. Efecto de la acidez inicial en el rendimiento del pretratamiento.

Para responder el segundo objetivo específico es necesario conocer si la acidez inicial de la materia prima influye en el rendimiento de pretratamiento, para ello se emplea la prueba ANOVA de una vía, los resultados se pueden revisar en la tabla 15.

Tabla 15

Resultados del análisis ANOVA para la variable independiente acidez inicial y la variable dependiente rendimiento del pretratamiento.

Fuente de variación	de	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Valor F	p Valor
Acidez inicial		27.9936	1	952.7033	7.0e-06
Residuo		0.1175	4	-	-

Nota. El valor de p-valor < 0.05 , en consecuencia, se rechaza la hipótesis nula, en otras palabras, existen diferencias significativas en los valores de rendimiento de pretratamiento para cada grupo de acidez inicial.

El valor p, en la tabla 15, confirma que los valores de acidez inicial del aceite usado de cocina producen rendimientos distintos, en otras palabras, el valor de acidez inicial en la materia prima influye en el rendimiento del pretratamiento, de manera inversamente proporcional. Si la cantidad de acidez inicial es leve, 1.55% masa, se obtiene rendimientos de alrededor de 99.93% en promedio, pero si se incrementa la acidez inicial de la materia prima a 5.48% masa, el rendimiento se reduce hasta un 95.61% en promedio, esto debido a que los ácidos grasos libres se convierten en jabones y se eliminan junto al glicerol crudo. En respuesta al segundo objetivo específico, se concluye que valores de acidez inicial menores producen rendimientos más altos y viceversa.

4.5.2.Efecto de la acidez inicial en el rendimiento del biodiesel.

Para responder el tercer objetivo específico y con ello alcanzar el objetivo general, se realiza la prueba ANOVA para determinar si el nivel de acidez inicial de la materia prima influye en el rendimiento de biodiesel o rendimiento global de todo el proceso, los resultados se pueden revisar en la tabla 16.

Tabla 16

Resultados del análisis ANOVA para la variable independiente acidez inicial y la variable dependiente rendimiento de biodiesel.

Fuente de variación	de	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Valor F	p Valor
Acidez inicial		29.3931	1	294.7658	6.8e-05
Residuo		0.3989	4	-	-

Nota. El p-valor < 0.05 , se concluye que existen diferencias significativas en los valores de rendimiento de biodiesel para cada grupo de acidez inicial.

Los resultados de la prueba ANOVA, tabla 16, para la acidez inicial, confirman que existe diferencia significativa entre los resultados de rendimiento de biodiesel entre los dos grupos de acidez inicial leve y acidez inicial elevada. Esto evidencia que la acidez inicial de la materia prima influye en el rendimiento de la producción de biodiesel de manera inversamente proporcional, donde corresponde un rendimiento mayor para materias primas con menor valor de acidez inicial y un rendimiento menor para materias primas con mayor valor de acidez inicial. Además, se obtienen rendimientos de biodiesel mayor al 90%, con valores de 95.48% y 91.05% en promedio para aceite usado de cocina con una acidez inicial de 1.55% y 5.48% masa, respectivamente, cumpliendo el objetivo de la presente investigación.

Cabe mencionar que, durante la etapa de refinación del biodiesel obtenido, fue necesario realizar varios lavados, debido al alto contenido de jabones en el biodiesel crudo. Este hecho se debe a que se empleó una dosis excesiva de catalizador NaOH durante la transesterificación, esta dosis excesiva reduce el rendimiento en la producción de biodiesel, pues la materia que debería terminar convirtiéndose en éster de ácido graso se transforma en jabón. Por ello una dosis ligeramente menor de catalizador ayudaría a mejorar el rendimiento.

4.6. Calidad del biodiesel producido

En este apartado se reporta los valores de los principales parámetros del biodiesel, con el fin de verificar si cumple las normas que lo regulan. Ver tabla 17 .

Los resultados de la calidad del biodiesel producido, todos se encuentran dentro de especificación, establecidos en la NTP 321.125, versión 2019. Existen otros ensayos adicionales como el contenido de ésteres metílicos o FAME, por sus siglas en inglés, que no fue posible realizar, siendo esta una limitante de este estudio.

Tabla 17*Caracterización del biodiesel obtenido*

Propiedad	Unidades	Límite	Biodiesel (acidez leve)	Biodiesel (acidez elevada)
Número de acidez**	mg KOH/g	0.5 Max.	0.37	0.4
Contenido de Jabones	Ppm	Reportar	no detectado	21
Contenido de agua (humedad)**	Ppm	500 Max.	324	362
Viscosidad a 40 °C**	cSt	6.0 Max.	4.82	4.94
Densidad @ 15 °C**	Kg/m ³	Reportar	885.00	883.94
Gravedad API a 60 °F	API	Reportar	28.33	28.47
Agua y sedimentos**	% volumen	0.05 Max.	0.01	0.01
Flash Point**	°C	130 min	>160	>160
Cloud Point **	°C	Reportar	4	2
Pour Point**	°C	Reportar	2	0
Monoglicéridos saturados (MGS-B5)**	mg/L	70 Max.	51.1	48.7
Contenido de Monoglicéridos **	% m/m	0.7 Max.	0.433	0.497
Contenido de Diglicéridos **	% m/m	0.2 Max.	0.164	0.169
Contenido de Triglicéridos **	% m/m	0.2 Max.	0.023	0.026
Glicerina Libre**	% m/m	0.02 Max.	0.004	0.006
Glicerina Total **	% m/m	0.24 Max.	0.143	0.163

Nota. Las propiedades del biodiesel con ** se encuentran referenciadas en la NTP 321.125, versión 2019.

Por otro lado, el ensayo de cromatografía que determina el contenido de mono, di y triglicéridos, principales componentes del aceite, todos se encuentran dentro de especificación, demostrando así que se llevó a cabo una correcta conversión de aceite a biodiesel, esto gracias a la estrategia de doble reacción de transesterificación.

El valor de MGS para ambos biocombustibles fue de 51.1 y 48.7 mg/L, por tanto, al compararlo con los valores establecidos en la tabla 18 de anexos, se interpreta que es apropiado para usarlo en una mezcla al 5 % (B5) con combustible diésel para intervalos de temperaturas mínimas promedio de 0 °C a < 11 °C, cuyo máximo valor de MGS es 70 mg/L.

5. DISCUSIÓN

El contenido de ácidos grasos libres varía de acuerdo al origen del aceite usado de cocina, en este estudio se trabajó con materias primas con valores de acidez de 1.55% y 5.3%, denominados como acidez leve y acidez elevada, otros investigadores reportaron valores similares: Haq et al., (2021) reportó valores de 4.53% o 9.01 mgKOH/g, Hadiyanto et al., (2020) obtuvo un valor de acidez para el aceite usado de cocina de 1.61%, mientras Bajwa et al., (2024) reportó un valor de 1.91%.

Con respecto al método de pretratamiento empleado para reducir la acidez del aceite usado de cocina, el presente trabajo propone un método alternativo que permite refinar el aceite en una sola etapa, mediante el uso de glicerol crudo, subproducto de la transesterificación. Este método se aplica sobre el aceite previamente seco, logrando alcanzar valores de acidez de 0.06% masa en promedio, sin aumentar el contenido de humedad, bajo condiciones de reacción moderadas, temperatura de 55°C, agitación 600 rpm y 15 min de tiempo de reacción. En contraste, numerosos investigadores utilizan la esterificación ácida, para pretratar el aceite usado de cocina, por ejemplo Haq et al. (2021), redujo la acidez de 4.53% a 0.24%, empleando esterificación ácida durante 90 min a 65 °C y 1% w/v de ácido sulfúrico. Aunque este método permite alcanzar niveles bajos de acidez, implica mayores costos operativos y el uso de reactivos corrosivos (Kerras et al., 2023; Zulqarnain et al., 2021), además de requerir etapas adicionales de lavado para remover el ácido sulfúrico, generando efluentes ácidos y aumentando la humedad del aceite esterificado, lo cual conlleva a una etapa de secado, aumentando el gasto energético. Otro método estudiado por Haq et al., (2021), es la reacción de glicerólisis que empleó las siguientes condiciones 6 horas, a 160 °C, 5% de glicerol y 0,5% polvo de zinc, para reducir la acidez de 4.53% a 1.1%, este método es mucho más tardado y trabaja a temperatura elevada, lo que se traduce en un elevado consumo energético y no alcanza a reducir la acidez por debajo de 1% masa. De esta manera sobresale el método propuesto de neutralización con glicerol crudo,

debido a que es más económico, rápido y simple de escalar a nivel industrial, se puede construir un sistema continuo con un mixer, un reactor CSTR y una centrífuga de discos, logrando producir grandes volúmenes en periodos cortos de tiempo. No obstante, una limitación de utilizar el glicerol crudo es la disponibilidad, solo se encuentra en plantas que producen biodiesel a partir de algún aceite vegetal y emplean metilato de sodio como catalizador, lo cual restringe su aplicabilidad en otros contextos industriales.

En cuanto al rendimiento de biodiesel para materias primas de una acidez inicial leve, 1.55% masa, se obtuvo un valor de 95.48% en promedio, mientras que, para la materia prima de acidez inicial elevada, 5.48%, se obtuvo 91.05% en promedio. Haq et al., (2021) reporta valores de rendimiento de biodiesel para materia prima de acidez inicial, 4.53%, de alrededor de 96.91%, empleando esterificación ácida para pretratar e hidróxido de sodio como catalizador para transesterificar. Si bien es cierto que este último método para producir biodiesel empleado por Haq et al., (2021) genera un mayor rendimiento. Sin embargo, el proceso de la esterificación a nivel industrial es más tardado debido a que contempla más etapas y se produce por lotes batch, aumentando costos operativos y reduciendo la capacidad de producción; en comparación con el pretratamiento con glicerol crudo que se puede desarrollar en un sistema continuo a nivel industrial, que se traduce en más volumen procesado por unidad de tiempo, además de ser más económico por emplear el subproducto de la transesterificación. Por otro lado, Hadiyanto et al. (2020), obtuvo un rendimiento en la producción de biodiesel de alrededor del 90.21%, a partir de una materia prima con acidez inicial de 1.61%, sin realizar un pretratamiento; el biodiesel producido por este autor presenta valores de acidez y viscosidad, 0.98 mgKOH/g y 7.076 mm²/seg, respectivamente, valores fuera de límite máximo establecido en la norma americana ASTM D6751. Otros valores de rendimiento de biodiesel a partir de aceite usado, tras una optimización con modelos de inteligencia artificial, reportaron valores de 96.83% según Ahmad (2023) y 94% por Bajwa et al. (2024), para materias primas de acidez inicial de 2.51% y 1.9%, respectivamente; ambos emplearon una esterificación ácida como pretratamiento.

En cuanto a la calidad del biodiesel producido los parámetros evaluados en este proyecto, todos se encuentran dentro de los límites máximos establecidos en la norma técnica peruana NTP 321.125, versión 2019.

6. CONCLUSIONES

- Es posible producir biodiesel a partir de aceite usado de cocina con rendimientos mayores al 90% para una acidez inicial de 5.48% o valores menores, y con una calidad que cumple la norma técnica peruana NTP 321.125:2019, empleando las técnicas de pretratamiento con glicerol crudo y una reacción de transesterificación catalizada con hidróxido de sodio.
- Es factible pretratar el aceite usado de cocina con glicerol crudo, para reducir la acidez del aceite por debajo de 0.1% sin aumentar la humedad. Además, permite obtener rendimientos superiores al 90% de aceite tratado para valores de acidez inicial menores a 5.48%.
- Pretratar el aceite usado de cocina con glicerol crudo, es un proceso de una etapa, que aprovecha el subproducto de la transesterificación y trabaja a condiciones leves de temperatura (55°C) y agitación (600 rpm), por tanto, es un proceso simple, económico, no genera residuos tóxicos, es muy fácil de escalar a nivel industrial y no corroe los equipos industriales en comparación con la esterificación ácida.

7. RECOMENDACIONES

- Es necesario estudiar la reacción de transesterificación alcalina del aceite usado de cocina con metóxido de sodio, como catalizador, este compuesto puede ayudar a mejorar el rendimiento.
- Se deben desarrollar estudios con respecto a la conversión del aceite usado de cocina a biodiesel, por el método de transesterificación alcalina con NaOH, con el fin de conocer la cantidad de catalizador hidróxido de sodio óptimo para convertir el aceite, pues poca cantidad de catalizador acarrea una conversión incompleta y una excesiva cantidad produce una elevada generación de jabones, disminuyendo el rendimiento y dificultando la refinación del biodiesel.

8. REFERENCIAS

- Ahmad, A. (2023). Application of machine learning and genetic algorithms to the prediction and optimization of biodiesel yield from waste cooking oil. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 40. <https://doi.org/10.1007/s11814-023-1489-9>
- Bajwa, W., Ikram, A., Malik, M. A. I., Razzaq, L., Khan, A. R., Latif, A., Hussain, F., & Qazi, A. (2024). Optimization of biodiesel yield from waste cooking oil and sesame oil using RSM and ANN techniques. *Heliyon*, 10(15), e34804. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34804>
- Elgharbawy, A. S., SADIK, W. A., SADEK, O. M., & KASABY, M. A. (2021). A review on biodiesel feedstocks and production technologies. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 65(1), 5098-5109. Scopus. <https://doi.org/10.4067/S0717-97072021000105098>
- Hadiyanto, H., Aini, A. P., Widayat, W., Kusmiyati, K., Budiman, A., & Rosyadi, A. (2020). Multi-feedstock biodiesel production from esterification of Calophyllum inophyllum oil, castor oil, palm oil, and waste cooking oil. *International Journal of Renewable Energy Development*, 9(1), 119-123. Scopus. <https://doi.org/10.14710/ijred.9.1.119-123>
- Haq, I. U., Akram, A., Nawaz, A., Zohu, X., Abbas, S. Z., Xu, Y., & Rafatullah, M. (2021). Comparative analysis of various waste cooking oils for esterification and transesterification processes to produce biodiesel. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 14(3), 461-472. Scopus. <https://doi.org/10.1080/17518253.2021.1941305>
- Heidari, S., & Wood, D. A. (2023). Biodiesel Production Methods and Feedstocks. En *Biodiesel Technology and Applications* (pp. 447-464). Scopus. <https://doi.org/10.1002/9781119724957.ch17>
- INACAL (2019). *Norma Técnica Peruana NTP 321.125:2019 BIOCOMBUSTIBLES*. Biodiésel. Especificaciones, 2ª Edición, el 17 de octubre de 2019.
- Kerras, H., Outili, N., & Hassen, A. (2023). Waste cooking oil pretreatment using microwave and

- ultrasound methods. *Comptes Rendus Chimie*, 26, 3-76.
<https://doi.org/10.5802/crchim.229>
- Maheshwari, P., Haider, M. B., Yusuf, M., Klemeš, J. J., Bokhari, A., Beg, M., Al-Othman, A., Kumar, R., & Jaiswal, A. K. (2022). A review on latest trends in cleaner biodiesel production: Role of feedstock, production methods, and catalysts. *Journal of Cleaner Production*, 355, 131588. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131588>
- Mathew, G. M., Raina, D., Narisetty, V., Kumar, V., Saran, S., Pugazhendhi, A., Sindhu, R., Pandey, A., & Binod, P. (2021). Recent advances in biodiesel production: Challenges and solutions. *Science of the Total Environment*, 794. Scopus.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148751>
- Outili, N., Kerras, H., & Meniai, A. H. (2023). Recent conventional and non-conventional WCO pretreatment methods: Implementation of green chemistry principles and metrics. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 41, 100794.
<https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2023.100794>
- Suzihaque, M. U. H., Alwi, H., Kalthum Ibrahim, U., Abdullah, S., & Haron, N. (2022a). Biodiesel production from waste cooking oil: A brief review. *Materials Today: Proceedings*, 63, S490-S495. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.527>
- Suzihaque, M. U. H., Alwi, H., Kalthum Ibrahim, U., Abdullah, S., & Haron, N. (2022b). Biodiesel production from waste cooking oil: A brief review. *Materials Today: Proceedings*, 63, S490-S495. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.527>
- Zhao, Y., Wang, C., Zhang, L., Chang, Y., & Hao, Y. (2021). Converting waste cooking oil to biodiesel in China: Environmental impacts and economic feasibility. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110661>
- Zulqarnain, Ayoub, M., Yusoff, M. H. M., Nazir, M. H., Zahid, I., Ameen, M., Sher, F., Floresyona, D., & Budi Nursanto, E. (2021). A comprehensive review on oil extraction and biodiesel production technologies. *Sustainability (Switzerland)*, 13(2), 1-28. Scopus.

<https://doi.org/10.3390/su13020788>

9. ANEXOS

Tabla 18

Relación entre los intervalos de temperaturas mínimas promedios ambientales (°C) en el Perú y los contenidos máximos de monoglicéridos saturados del

			Fuente
Intervalos de temperaturas mínimas promedio ambientales del Perú (°C)	De 0 °C a < 11 °C	De 11 °C a ≤ 22 °C	“Perú: Anuario de Estadísticas Ambientales 2014”
Monoglicéridos saturados del combustible, (mg/l, máx)	70	90	Norma UNE-EN 14214:2013 V2+A1

Nota. Adaptado de la NTP 321.125:2019

Tabla 19*Resultado de todo el proceso productivo de la fase 2, producción de biodiesel*

Etapa			Pretratamiento con glicerol crudo					Transesterificación			
Oleico inicial (%m/m)	Alcalinidad del glicerol crudo	Relación másica teórica	Relación másica de trabajo	Oleico final (%m/m)	Humedad Final (ppm)	Jabones Final (ppm)	Rendimiento (%m/m)	Número de acidez (mgKOH/g)	Humedad Final (ppm)	Rendimiento (%m/m)	Rendimiento global (%m/m)
1,55	2,14	0,15	0,30	0,03	496	446	100,2	0.38	268	95,73	95,92
1,55	2,14	0,15	0,30	0,06	656	551	99,78	0.4	315	95,38	95,17
1,55	2,14	0,15	0,30	0,05	560	397	99,82	0.34	326	95,53	95,36
5,48	2,14	0,5	0,65	0,05	678	475	95,55	0.44	361	95,21	90,97
5,48	2,14	0,5	0,65	0,04	634	666	95,6	0.38	254	95,08	90,90
5,48	2,14	0,5	0,65	0,05	674	674	95,69	0.4	201	95,4	91,29