



UNAP



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS AMBIENTALES CON
MENCIÓN EN INDUSTRIA DEL PETRÓLEO Y MEDIO AMBIENTE**

TESIS

**ACTIVIDAD CATALÍTICA DE CENIZA DE CÁSCARA DE *Theobroma
bicolor Bonpl.* PARA TRANSESTERIFICAR ACEITE
VEGETAL USADO – IQUITOS 2023**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS AMBIENTALES CON
MENCIÓN EN INDUSTRIA DEL PETRÓLEO
Y MEDIO AMBIENTE**

PRESENTADO POR: GONZALO DÁVILA RÍOS

**ASESORES: ING. QUIM. ROSA ISABEL SOUZA NAJAR, DRA.
ING. QUIM. JORGE ANTONIO SUAREZ RUMICHE, DR.
Q.F. FRANK ROMEL LEÓN VARGAS, DR.**

IQUITOS, PERÚ

2024



UNAP



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS AMBIENTALES CON
MENCIÓN EN INDUSTRIA DEL PETRÓLEO Y MEDIO AMBIENTE**

TESIS

**ACTIVIDAD CATALÍTICA DE CENIZA DE CÁSCARA DE *Theobroma
bicolor Bonpl.* PARA TRANSESTERIFICAR ACEITE
VEGETAL USADO – IQUITOS 2023**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS AMBIENTALES CON
MENCIÓN EN INDUSTRIA DEL PETRÓLEO
Y MEDIO AMBIENTE**

PRESENTADO POR: GONZALO DÁVILA RÍOS

**ASESORES: ING. QUIM. ROSA ISABEL SOUZA NAJAR, DRA.
ING. QUIM. JORGE ANTONIO SUAREZ RUMICHE, DR.
Q.F. FRANK ROMEL LEÓN VARGAS, DR.**

IQUITOS, PERÚ

2024



UNAP

Escuela de Postgrado
"Oficina de Asuntos
Académicos"



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS
N°120-2024-OAA-EPG-UNAP

En Iquitos en la Escuela de Postgrado (EPG) de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP) a los veinticinco días del mes de julio de 2024 a las 12:00 m., se dió inicio a la sustentación de la tesis denominada: "**ACTIVIDAD CATALÍTICA DE CENIZA DE CÁSCARA DE *Theobroma bicolor Bonpl. PARA TRANSESTERIFICAR ACEITE VEGETAL USADO - IQUITOS 2023***", aprobado con Resolución Directoral N°1177-2024-EPG-UNAP, presentado por el egresado **GONZALO DAVILA RIOS**, para optar el **Grado Académico de Maestro en Ciencias y Tecnologías Ambientales con mención en Industria del Petróleo y Medio Ambiente**, que otorga la UNAP de acuerdo a la Ley Universitaria 30220 y el Estatuto de la UNAP.

El jurado calificador designado mediante Resolución Directoral N°1052-2024-EPG-UNAP, esta conformado por los profesionales siguientes:

Ing.Quim. Víctor García Pérez, Dr. (Presidente)
Ing.Quim. Matsen Rolando García Navarro Mtro. (Miembro)
Ing.Quim. Daniel Diomedes Carrasco Montañez MSc. (Miembro)

Después de haber escuchado la sustentación y luego de formuladas las preguntas, éstas fueron respondidas: SATISFACTORIAMENTE

Finalizado la evaluación; se invitó al público presente y al sustentante abandonar el recinto; y, luego de una amplia deliberación por parte del jurado, se llegó al resultado siguiente:

La sustentación pública y la tesis ha sido: APROBADA con calificación MUY BUENA.

A continuación, el Presidente del Jurado da por concluida la sustentación, siendo las 13:00 HRS del veinticinco de julio de 2024; con lo cual, se le declara al sustentante APTO, para recibir **Grado Académico de Maestro en Ciencias y Tecnologías Ambientales con mención en Industria del Petróleo y Medio Ambiente**.

Ing.Quim. Víctor García Pérez, Dr.
Presidente

Ing.Quim. Matsen Rolando García Navarro Mtro.
Miembro

Ing.Quim. Daniel Diomedes Carrasco Montañez, MSc.
Miembro

Ing.Quim. Rosa Isabel Souza Najjar, Dra.
Asesora

Ing. Quim. Jorge Antonio Suarez Rumiche, Dr.
Asesor

Q.F. Frank Romel León Vargas, Dr.
Asesor

Somos la Universidad licenciada más importante de la Amazonía del Perú, rumbo a la acreditación

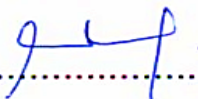
Calle Los Rosales cuadra 5 s/n, San Juan Bautista, Maynas, Perú
Celular: 953 664 439 - 956 875 744
Correo electrónico: postgrado@unapiquitos.edu.pe www.unapiquitos.edu.pe



TESIS APROBADA EN SUSTENTACIÓN PÚBLICA EL 25 DE JULIO DEL 2024, EN LA ESCUELA DE POSTGRADO DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA AMAZONÍA PERUANA, EN LA CIUDAD DE IQUITOS-PERÚ.



.....
ING. QUIM. VÍCTOR GARCÍA PÉREZ, Dr.
PRESIDENTE



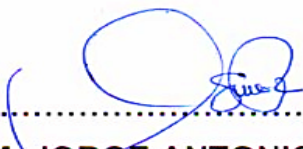
.....
ING. QUIM. MATSEN ROLANDO GARCÍA NAVARRO, Mtro.
MIEMBRO



.....
ING. QUIM. DANIEL DIOMEDES CARRASCO MONTAÑEZ, MSc.
MIEMBRO



.....
ING. QUIM. ROSA ISABEL SOUZA NAJAR, Dra.
ASESORA



.....
ING. QUIM. JORGE ANTONIO SUAREZ RUMICHE, Dr.
ASESOR



.....
QF. FRANK ROMEL LEÓN VARGAS, Dr.
ASESOR

NOMBRE DEL TRABAJO

EPG_M_TESIS_DAVILA RIOS.pdf

AUTOR

GONZALO DAVILA RIOS

RECuento DE PALABRAS

10455 Words

RECuento DE CARACTERES

54097 Characters

RECuento DE PÁGINAS

42 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

642.2KB

FECHA DE ENTREGA

May 23, 2024 8:55 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME

May 23, 2024 8:56 AM GMT-5

● **16% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 13% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 10% Base de datos de trabajos entregados
- 3% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)

A mi madre que supo darme una buena formación para seguir adelante en los momentos difíciles, mi padre que me ilumina desde el cielo y mi hija que me motiva para ser un ejemplo para ella.

AGRADECIMIENTO

El principal agradecimiento a Dios quien me ha guiado y me da la fortaleza para seguir adelante.

A mi familia por su comprensión y estímulo constante, además su apoyo incondicional a lo largo de mis estudios.

Y a todas las personas que de una y otra manera me apoyaron en la realización de este trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Páginas
Carátula	i
Contracarátula	ii
Acta de sustentación	iii
Jurado	iv
Resultado del informe de similitud	v
Dedicatoria	vi
Agradecimiento	vii
Índice de contenidos	viii
Índice de tablas	x
Índice de figuras	xi
Resumen	xii
Abstract	xiii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	3
1.1. Antecedentes	3
1.2. Bases teóricas	9
1.3. Definición de términos básicos	19
CAPÍTULO II: VARIABLES E HIPÓTESIS	21
2.1. Variables y definiciones operacionales.	21
2.2. Formulación de la hipótesis.	21
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	23
3.1. Tipo y diseño de la investigación	23
3.2. Población y muestra	24
3.3. Técnicas e instrumentos	25
3.4. Procedimiento de recolección de datos	26
3.5. Técnicas de procesamiento y análisis de datos	29
3.6. Aspectos éticos	29
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	30
CAPITULO V: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	35
CAPITULO VI: PROPUESTA	38
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES	40

CAPÍTULO VIII: RECOMENDACIONES	42
CAPÍTULO IX: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

ANEXOS

1. Matriz de consistencia
2. Tabla de operacionalización de variables
3. Cálculo de metanol requerido para la transesterificación.
4. Caracterización fisicoquímica del aceite vegetal usado (AVU)
5. Imágenes del desarrollo del proceso.
6. Resultados de los análisis de Ca y K en cenizas de cáscara de macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*)
7. Resultado del contenido de metil éster (FAME) en el biodiésel obtenido

ÍNDICE DE TABLAS

		Páginas
Tabla N°1	Niveles de los factores de estudio	23
Tabla N°2	Matriz de planteamiento del experimento	23
Tabla N°3	Cantidad de reactivos usados en cada ensayo	27
Tabla N°4	Caracterización del aceite vegetal usado (AVU)	30
Tabla N°5	Rendimiento en ceniza calcinada obtenida de la cáscara del fruto de macambo (<i>Theobroma bicolor Bonpl.</i>)	30
Tabla N°6	Contenido de potasio y calcio en la ceniza de la cáscara del fruto del Macambo (<i>Theobroma bicolor Bonpl.</i>)	30
Tabla N°7	Fuerza básica de la ceniza de la cáscara del fruto de macambo (<i>Theobroma bicolor Bonpl.</i>) mediante indicadores de Hammett.	31
Tabla N°8	Rendimiento en biodiésel en la reacción de transesterificación del aceite vegetal usado empleando la ceniza del fruto de macambo (<i>Theobroma bicolor Bonpl.</i>)	31
Tabla N°9	Análisis de Varianza de los rendimientos en biodiésel obtenido vs. Ensayos	32
Tabla N°10	Prueba de Tukey de los rendimientos en biodiésel obtenidos en los ensayos para un nivel de confianza del 95%	32
Tabla N°11	Análisis de varianza del modelo de regresión factorial 2^3 : Rendimiento biodiésel versus los factores de estudio RM, TR, CC	33
Tabla N°12	Resumen del modelo regresión factorial 2^3 : Rendimiento en biodiésel versus los factores en estudio RM, TR, CC.	34
Tabla N°13	Optimización de la respuesta: Rendimiento de biodiésel obtenido.	34
Tabla N°14	Características físicas y químicas del biodiésel obtenido.	34

ÍNDICE DE FIGURAS

		Páginas
Figura N°1	Conversión de aceites y grasas en biodiésel	12
Figura N°2	Reacción general de la transesterificación	13
Figura N°3	Productos intermedios formados en la reacción de transesterificación	13
Figura N°4	Formación del grupo alcoxi y ataque al grupo carbonilo	14
Figura N°5	Formación del éster y segundo producto intermedio	15
Figura N°6	Formación del diglicérido	15
Figura N°7	Adsorción del alcohol en el catalizador	16
Figura N°8	Ataque del grupo alcoxi formación de nuevo éster	16
Figura N°9	Formación del grupo alcohol para formar el diglicérido	17
Figura N°10	Planta y cáscara después de extracción de las semillas del fruto de macambo (Theobroma bicolor Bonpl.)	19
Figura N°11	Diagramas de Pareto de efectos estandarizados para un $\alpha=0.05$	33

RESUMEN

Este estudio investigó la utilidad de la ceniza de la cáscara del fruto del macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*) como catalizador en la conversión de aceites vegetales usados (AVU) en biodiésel. Se caracterizó el AVU y se preparó el catalizador mediante calcinación a 700°C, evaluándose su fuerza básica y contenido de potasio y calcio. Usando un diseño experimental factorial 2^3 , se investigaron tres factores críticos a dos niveles: relación molar metanol/aceite (RM: 6/1 y 9/1), tiempo de reacción (TR: 60 y 90 minutos) y cantidad de catalizador (CC: 2% y 3%). Se halló que el AVU tenía un 0,61% de humedad y un índice de acidez de 0,28 (mg de KOH/g aceite), aptos para la transesterificación directa. El catalizador mostró un rendimiento del 0.91%, con altos contenidos de potasio (38,40%) y calcio (1,76%), y una máxima basicidad en $pKBH= 9,8$ indicando su eficacia catalítica. Los ensayos de transesterificación revelaron rendimientos promedio de biodiésel entre el 84,97% y el 92,64%, con significancia estadística ($p < 0,05$). Las mejores condiciones de rendimiento en biodiésel fueron RM de 6/1, TR de 60 minutos y CC del 3%. Estos hallazgos respaldan la viabilidad de usar la ceniza de la cáscara del macambo como catalizador efectivo para producir biodiésel a partir de AVU.

Palabras clave: Transesterificación; ceniza, *Theobroma bicolor Bonpl.*, catálisis.

ABSTRACT

This study investigated the usefulness of macambo fruit shell ash (*Theobroma bicolor Bonpl.*) as a catalyst in the conversion of used vegetable oils (UVO) into biodiesel. The UVO was characterized, and the catalyst was prepared by calcination at 700°C, evaluating its basic strength and potassium and calcium content. Using a 2³ factorial experimental design, three critical factors were investigated at two levels: molar ratio of methanol/oil (MR: 6/1 and 9/1), reaction time (RT: 60 and 90 minutes), and catalyst amount (CC: 2% and 3%). It was found that the UVO had 0.61% moisture and an acidity index of 0.28 (mg of KOH/g oil), suitable for direct transesterification. The catalyst showed a yield of 0.91%, with high potassium (38.40%) and calcium (1.76%) contents, and maximum basicity at pKBH= 9.8, indicating its catalytic efficacy. Transesterification assays revealed average biodiesel yields between 84.97% and 92.64%, with statistical significance ($p < 0.05$). The best biodiesel yield conditions were MR of 6/1, RT of 60 minutes, and CC of 3%. These findings support the viability of using macambo shell ash as an effective catalyst to produce biodiesel from UVO.

Keywords: Transesterification; ash, *Theobroma bicolor Bonpl.*, catalysis.

INTRODUCCIÓN

En el actual contexto de búsqueda de fuentes de energía sostenible y renovable a nivel global, la producción de biodiésel a partir de aceites vegetales usados se destaca como una alternativa prometedora para abordar el cambio climático y disminuir la dependencia de los combustibles fósiles (Ershov *et al.*, 2023). En la región amazónica, concretamente en la ciudad de Iquitos, la gestión de residuos de aceite de cocina usado y de biomasa plantea desafíos significativos que podrían representar una solución sustentable a esta problemática.

En los últimos años, se ha observado un creciente interés en el uso de catalizadores derivados de biomasa para la producción sostenible de biodiésel (Vargas *et al.*, 2021). Debido a que los catalizadores convencionales, como el hidróxido de sodio y potasio, presentan limitaciones tanto ambientales como económicas, lo que resalta la necesidad de explorar alternativas más sostenibles y eficientes en la transformación de aceites vegetales usados en biodiésel (Cuevas-García y Bravo Nava, 2021).

Investigaciones realizadas por Changmai *et al.*, (2020) han destacado la eficacia de estos catalizadores en la síntesis de biodiésel, resaltando su potencial para contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Por otro lado, Faba, Díaz, Ordóñez (2015) han subrayado los avances recientes en el desarrollo de catalizadores a partir de biomasa, señalando su importancia en la búsqueda de alternativas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente en la producción de biocombustibles. Además, Hamza *et al.*, (2021) han revisado la aplicación de catalizadores derivados de biomasa en la producción de biodiésel, resaltando su relevancia en la búsqueda de soluciones más eficientes y limpias en el sector energético.

En este sentido, la importancia de encontrar catalizadores provenientes de biomasa de especies amazónicas se vuelve fundamental para abordar los desafíos locales en la producción de biodiésel a partir de aceites vegetales usados, teniendo en consideración que la gestión inadecuada de estos no solo

representa un problema ambiental inmediato, sino que también podría tener repercusiones a largo plazo en los ecosistemas acuáticos (Gautam *et al.*, 2023). Por lo tanto, la evaluación de cenizas de biomasa como catalizador en la transesterificación de aceites vegetales usados no solo busca mejorar la eficiencia del proceso, sino también mitigar los futuros impactos negativos en el entorno natural de la ciudad de Iquitos.

En este contexto, la presente investigación se enfoca en evaluar la ceniza de la cáscara del fruto de macambo como posible catalizador en la transesterificación de aceites vegetales usados en Iquitos. Se espera que los resultados de este estudio contribuyan al desarrollo de un proceso de producción de biodiésel más sostenible y económicamente viable, con impactos positivos en términos ambientales, sociales y económicos para la región amazónica.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

En 2020, se desarrolló un nuevo catalizador, RS-SO₃H, a partir de pirólisis rápida de paja de arroz y sulfonación con ácido sulfúrico concentrado, con el objetivo de mejorar la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal usado (AVU). El análisis confirmó su estructura química y su estabilidad térmica. Se evaluaron factores como tiempo, temperatura y concentración del catalizador en la transesterificación, logrando un rendimiento máximo del 90,37% bajo condiciones óptimas. Las propiedades del biodiésel obtenido cumplen con las normas ASTM D6751. El AVU utilizado presentaba un contenido de humedad del 2,3%, un índice de acidez de 2,8 mg KOH/g, y un valor de saponificación de 156,8 mg KOH/g, con una masa molecular estimada de 1078,7 g/mol. Se observó una ligera disminución en la eficiencia del catalizador después de múltiples usos, pero se mantuvo altamente efectivo. Este estudio destaca la viabilidad de utilizar AVU para producir biodiésel de manera eficiente y respetuosa con el medio ambiente (Mohamed *et al.*, 2020).

En 2021, se llevó a cabo una investigación sobre el uso de las cenizas de cáscara de plátano "Valery" (*Musa x paradisiaca L.*) como catalizador básico heterogéneo en la transesterificación del aceite vegetal usado. Tras someterlas a un proceso de secado a 80°C durante 48 horas y una posterior calcinación a 700°C durante 4 horas a la cáscara del plátano. Se determinó su contenido de potasio y calcio, así como su fuerza básica. El aceite vegetal usado contenía una viscosidad de 35,10 cSt, un nivel de humedad del 0,42% y un contenido de ácido grasos libres del 0,27%. Llevaron a cabo una transesterificación alcalina directa, logrando un rendimiento máximo de biodiésel del 86,94% con un 2% de catalizador (CCPC), una relación molar metanol/aceite de 6/1 y un tiempo de reacción de 60 minutos. Los resultados mostraron un contenido de potasio de 515 mg de K/Kg ceniza. La fuerza básica de la ceniza estuvo en el rango de 9,8 a 12,2 lo que indica que tiene un potencial uso como catalizador debido a su alta alcalinidad, atribuyéndole

esta característica a la presencia de potasio en su composición (Souza *et al.*, 2021).

En 2022, se evaluó un nuevo catalizador heterogéneo compuesto de cáscaras de cangrejo y plátano fusionadas para la transesterificación de aceite vegetal usado (AVU), destacando una superficie agregada con poros definidos y composición bifuncional, con una alta superficie ($260,35 \text{ m}^2/\text{g}$) y volumen de poros ($0,65 \text{ cm}^3/\text{gramo}$) del catalizador. Mediante la metodología de superficie de respuesta (RSM), se optimizó el proceso alcanzando un rendimiento máximo de biodiésel del 93%. El modelo mostró una excelente adecuación ($R^2 = 0,9939$), y el catalizador demostró estabilidad con rendimientos de biodiésel superiores al 80% tras seis ciclos de reutilización. Las propiedades del AVU, determinadas por la AOAC, mostraron un contenido de humedad del 0,6%, un índice de acidez de 2,81 (mg KOH/g aceite) y una viscosidad de $35,71 \text{ mm}^2/\text{s}$, mientras que el biodiésel producido cumplió con los estándares y presentó propiedades similares al diésel comercial, destacando su reutilización, síntesis fácil y disponibilidad de materiales precursores (Amenaghawon *et al.*, 2022).

En el año 2023, se llevó a cabo una investigación experimental para probar un catalizador sólido (JPW) obtenido a partir del residuo de cáscara de yaca (*Artocarpus heterophyllus*), con el fin de producir biodiésel. Tras calcinar la torta a diferentes temperaturas durante 2 horas, se determinó que la ceniza calcinada a 500°C tuvo el mejor rendimiento del 92,38% en biodiésel. La caracterización mostró que el potasio, calcio y magnesio eran componentes importantes en el catalizador, haciéndolo prometedor para la síntesis de biodiésel. La metodología de superficie de respuesta identificó condiciones óptimas para el proceso, logrando un contenido de éster metílico del 98,88%. Estas condiciones incluyeron una relación molar aceite-metanol de 1:9, un peso de catalizador del 12% (p/p), un tiempo de reacción de 105 minutos y una temperatura constante de 65°C . El catalizador JPW se pudo reutilizar tres veces con un rendimiento máximo del 93,33%. El biodiésel producido cumplió con la norma ASTM D 6751. Este estudio demostró que el JPW es efectivo como catalizador sólido para la síntesis de biodiésel (Mulkan *et al.*, 2023)

En el 2022 se realizó una investigación, para obtener un catalizador heterogéneo TPC a partir de cenizas de cáscara de mandarina 'Ponkan' (*Citrus reticulata Blanco*), para la producción de biodiésel a utilizando metanol, aceite de soja refinado y aceite de cocina residual como materias primas. Se prepararon ocho muestras de catalizador mediante calcinación de las cenizas a 700°C (TPC7), 800°C (TPC8) y 900°C (TPC9), y mezclas de TPC7 con CaCO₃ y K₂CO₃. Las reacciones de transesterificación fueron evaluadas mediante un diseño experimental usando la metodología de superficie. Los resultados del diseño D-Optimal mostró que el efecto del tiempo de reacción (F = 19.04, P-valor = 0.0005) y su interacción con el efecto de la relación molar son los parámetros más significativos para mejorar el rendimiento de conversión de la soja refinada a biodiésel. Las condiciones de reacción seleccionadas promovieron una conversión de éster metílico superior al 92 %. Además, la producción de biodiésel de aceite de cocina residual fue efectiva utilizando los catalizadores TPC7 y TPC8, permitiendo un proceso de viabilidad económica y sostenible (de Oliveira *et al.*, 2022).

En el año 2021, se desarrolló un estudio para probar el potencial de un catalizador heterogéneo de la ceniza de cáscaras de huevo de gallina y cáscaras de papaya fusionadas, en la transesterificación del aceite de linaza. Los residuos, se secaron y calcinaron por separado a 900°C o 700°C por 3 horas para obtener sus cenizas (cáscaras de huevo calcinadas (CES) y cáscaras de papaya calcinadas (CPP)). El CES y el CPP se mezclaron por el método de impregnación húmeda a una relación en peso de 7:3 CES/ CPP en 100 ml de agua y calcinándolas nuevamente a 600 °C durante 2 horas. El catalizador desarrollado se caracterizó mediante microscopía electrónica de barrido: espectroscopia de rayos X de dispersión de energía (SEM-EDS), difracción de rayos X (XRD) y espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Se aplicó el diseño Box-Behnken para investigar el efecto de los parámetros operativos como la relación molar metanol-aceite, la carga del catalizador y el tiempo de reacción. Los resultados de la caracterización muestran que la ceniza es muy rica en iones Ca (40,96%) y bajo en K (8,57%). La mejor condición de reacción para la transesterificación fue con la relación molar metanol/aceite de 14,9:1, carga de catalizador de 3,78% en peso,

tiempo de reacción 80 min a una temperatura de reacción constante de 65°C con un rendimiento máximo de biodiésel de 91,20% en peso. El biodiésel producido cumplió con estándares de calidad internacionales (Etim, Musonge y Eloka-Eboka, 2021).

En el 2021 se realizó un estudio para investigar la transesterificación de aceite de cocina usado, utilizando metanol y cenizas de salvado de trigo modificado con CaO como catalizador heterogéneo, se emplearon cenizas de salvado de trigo y agua mezcladas con escamas de incrustación ricas en CaO de una unidad de destilación, prepararon el catalizador por calcinación a 700°C durante 4 horas. Para caracterizar el catalizador se utilizaron difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido y espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier. Según los resultados experimentales, la mayoría de los picos de XRD se caracterizan por CaO. Se aplicó la metodología de superficie de respuesta (RSM) para investigar los impactos de la interacción de los parámetros de la reacción de transesterificación, incluida la relación de volumen de aceite/metanol (0,5:1 a 2,5:1), el tiempo de reacción (30 a 150 min) y la temperatura (40 a 60°C). y la concentración del catalizador (3-15% en peso). Se obtuvo una pureza de biodiésel del 93,6% en condiciones óptimas, es decir, una relación de volumen de metanol a aceite de 1,46:1, un contenido de catalizador de 11,66% en peso y una temperatura de 54,6 °C durante 114,21 min. Por lo tanto, la ceniza de salvado de trigo podría servir como catalizador en la producción de biodiésel (Gouran, Aghel y Nasirmanesh, 2021).

En el 2019 se realizó una investigación para evaluar el uso de cenizas de cáscara de fruta de *Tamarindus indica*, como catalizador sólido para producir biodiésel. El catalizador se preparó mediante calcinación de cáscara de fruta de *Tamarindus indica* a 800°C, durante 3 horas. Se utilizó el indicador de Hammett para caracterizar su fuerza básica. Evaluaron los parámetros de producción de biodiésel relación molar metanol aceite, cantidad de catalizador y tiempo de reacción. Los resultados obtenidos muestran un catalizador con un contenido de ión calcio del 47,4% e ión potasio del 19,2% y una fuerza básica superior a $H > 9,8$ y los mejores parámetros operativos para producir

biodiésel fue con una relación molar de metanol a aceite de 9:1, 125 mg de catalizador (5% en peso de aceite), un tiempo de reacción de 2 horas y una temperatura de reacción de 60 °C. obteniendo un rendimiento máximo del 96,2%. Asimismo, analizaron las características del biodiésel obtenido: índice de acidez, viscosidad y puntos de inflamación, vertido y turbidez observándose que se encuentran dentro de lo estipulado por las normas ASTM para biodiésel (Nabora, Kingondu y Kivevele, 2019).

En el 2021, se investigó la actividad catalítica de la ceniza de semilla de acai (ASA) para la en transesterificación aceite de soja con metanol. Las semillas se calcinaron a diferentes temperaturas (500–900°C) y tiempos (2 a 5 horas). El catalizador obtenido por calcinación a 800°C durante 4 horas se caracterizó mediante análisis termogravimétrico (TG-DTG), difracción de rayos X (XRD), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR), microscopía electrónica de barrido (SEM), análisis de energía. espectroscopia de dispersión de rayos X (EDS) y alcalinidad. La actividad catalítica se exploró mediante la metodología de superficie de respuesta basada en un diseño compuesto centrado en la cara (FCCD 24). Las condiciones óptimas fueron: temperatura de 100°C, relación molar alcohol: aceite de 18:1, concentración de catalizador de 12,0% (p/p) y tiempo de reacción de 1 hora, obteniéndose biodiésel con un contenido de éster de 98,5% ± 0,21. La caracterización del catalizador mostró que su actividad catalítica se debe principalmente al alto contenido de óxido de potasio de 12,7% que es un sitio superficial básico, lo que lo hace altamente eficientes para la producción de biodiésel (Mares *et al.*, 2021).

En el 2021, se desarrolló una investigación para evaluar un catalizador sólido obtenido mediante calcinación (550°C, 2 horas) de cenizas de bagazo de caña de azúcar en la producción de ésteres metílicos del aceite de semilla de *jatrofa*. El catalizador fue caracterizado mediante el método Brunauer-Emmett-Teller (BET), espectrómetro infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR), difractómetro de rayos X (XRD), microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FESEM), X-dispersivo de energía. (EDX), microscopio electrónico de transmisión de alta resolución (HRTEM) y espectrofotómetro

electrónico de rayos X (XPS). El análisis reveló que el catalizador está compuesto de varios óxidos y carbonatos metálicos. El catalizador podría producir un rendimiento de 92,84% en peso de biodiésel, en una proporción de metanol a aceite de 9:1, 10% de catalizador a 65 °C en 285 min. El catalizador policristalino contiene un 12,07% en potasio y 2,43% en Calcio, con una fuerza básica de $10,1 < H < 18,4$ según los indicadores de Hammett posee una buena eficacia para la reacción de transesterificación. Concluyendo que la síntesis de biodiésel con un catalizador renovable de bagazo de caña de azúcar, agregaría un valor considerable para el desarrollo de este material (Basumatary *et al.*, 2021).

En el 2021 se estudió la actividad catalítica de cenizas de residuos de madera Merbau obtenida mediante calcinación, para la producción de biodiésel a partir de aceite de palma de baja calidad. La calcinación de los residuos de madera de Merbau se realizó a temperaturas de 500, 600, 700, 800 y 900°C durante 3 horas. Se seleccionó el M700 (residuo calcinado a 700°C) como catalizador basado en la basicidad más alta, según lo confirmado por la prueba de basicidad y el análisis de difracción de rayos X siendo el CaO la especie con mayor contribución de fuerza básica. Se evaluó la relación masa M700 respecto al volumen de metanol, al 5%, 10%, 15%, 20% (p/v) en la producción de biodiésel. La reacción se llevó a cabo mediante reflujo a una temperatura de 80 °C durante 2 horas. El producto biodiésel obtenido es predominantemente palmitato de metilo. La relación ceniza-metanol del 15% da la conversión óptima de la fracción de biodiésel (78,7% p/p) (Santi, Triyono y Morin, 2021).

En el año 2024, se empleó la flor de plátano para desarrollar un nano catalizador básico heterogéneo que puede separarse magnéticamente, con el propósito de producir biodiésel utilizando aceite de *jatrofa* como materia prima. La eficacia del catalizador se evaluó mediante un análisis exhaustivo que incluyó técnicas como espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR), difracción de rayos X (XRD), espectroscopía foto electrónica de rayos X (XPS), microscopía electrónica de barrido por emisión de campo

(FESEM), microscopía electrónica de transmisión (TEM), análisis de superficie BET (Brunauer-Emmett-Teller) y análisis termogravimétrico (TG). Los notables contenidos de calcio (3,5%) y potasio (32,4%) presentes en el catalizador indican su naturaleza altamente básica. Al utilizar una carga de catalizador y una relación metanol/aceite de 6% en peso y 9:1 respectivamente, a una temperatura de 60°C, se logró un rendimiento de biodiésel del $97,2 \pm 1,15\%$ en un tiempo de 60 ± 2 minutos. Se determinó que la basicidad y el área superficial del catalizador eran de 0,612 mmol/g y 64,4 mg respectivamente. El catalizador exhibió una notable estabilidad catalítica y reactividad durante tres ciclos, manteniendo un valor de magnetización adecuado de 17,43 emu/g y un contenido de potasio del 22,38%. Obteniendo un rendimiento en biodiésel del 91,5% en el tercer ciclo de uso (Chutia, Bora y Phukan, 2024).

1.2. Bases teóricas

1.2.1. Biodiésel

El biodiésel, es una fuente de energía renovable y biodegradable, se elabora a partir de materias primas naturales como aceite vegetal, grasa animal o aceites reciclados. Se emplea como sustituto del diésel convencional derivado del petróleo, destacando por su menor impacto ambiental al disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. La definición de biodiésel según la ASTM (Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales) describe este combustible como ésteres de cadena larga de ácidos grasos, con un solo grupo alquílico. (FAME) (Ouellet, Abdel-Mawgoud, 2024).

1.2.2. Fuentes primarias para la producción de biodiésel

Las fuentes primarias más comunes para la obtención de biodiésel son aquellas con un elevado contenido de triglicéridos, como los aceites vegetales de girasol, palma y soya, así como los aceites de fritura reciclados y las grasas animales (Elgharbawy *et al.*, 2021).

Aceites vegetales

Las fuentes primarias convencionales más comunes para la producción de biodiésel incluyen los aceites extraídos de semillas oleaginosas como el girasol, la colza (principalmente en Europa), la soya (ampliamente utilizada en Estados Unidos) y el coco (predominante en Filipinas). Además, se destacan los aceites derivados de frutos oleaginosos como la palma, mayormente empleada en Malasia e Indonesia (Beltrán Velásquez *et al.*, 2020).

Aceites de fritura usados

El reciclaje de aceites usados emerge como una opción prometedora para producir biodiésel, ya que constituye la materia prima más económica para este propósito. La reutilización de aceites desechados no solo favorece una gestión ambientalmente responsable de los residuos, sino que también ofrece una solución rentable para la obtención de biocombustible (Oliveira, 2018).

Grasas animales

Además de los aceites vegetales, las grasas animales, en particular el sebo de vaca, representan otra alternativa viable para la elaboración de biodiésel (López, 2022). Su inclusión en la matriz de materias primas amplía las opciones disponibles para la producción sostenible de este combustible alternativo.

1.2.3. Calidad del aceite para biodiésel

Para asegurar la producción de biodiésel de alta calidad, es esencial emplear aceite refinado de la mejor calidad disponible, que esté completamente libre de cualquier material sólido en suspensión. Es crucial que este aceite presente un reducido nivel de ácidos grasos, especialmente al utilizar catalizadores homogéneos, dado que un exceso de estos ácidos podría resultar en una eficiencia reducida de la reacción. Además, se recomienda mantener el contenido de gomas y material insaponificable lo más bajo posible (Echevarría Trujillo *et al.*, 2018).

La evaluación de la calidad del aceite puede realizarse mediante una serie de parámetros, incluyendo el índice de acidez y humedad, el índice de peróxido, el índice de yodo, los materiales insaponificables, el contenido de fósforo y la cantidad de insolubles. Estos criterios proporcionan una visión integral de la idoneidad del aceite para la producción eficiente y efectiva de biodiésel, asegurando así un producto final de óptima calidad y desempeño.

- **Índice de acidez:** Este parámetro cuantifica la cantidad de miligramos de hidróxido de potasio requeridos para neutralizar los ácidos libres presentes en cada gramo de grasa.
- **Índice de peróxido:** El índice de peróxido indica el nivel de oxidación inicial experimentado por la grasa o aceite. Los peróxidos son productos primarios que se forman en la oxidación de los aceites y grasas, se originan en las insaturaciones de las cadenas de carbono de los ácidos grasos, sin importar su composición.
- **Índice de yodo:** Este índice representa la cantidad de los miliequivalentes o fracciones de yodo consumido por cada 100 partes de peso de la sustancia. Proporcionando una indicación del número de insaturaciones presentes en los ácidos grasos del aceite.
- **Índice de saponificación:** Indica la cantidad de hidróxido de potasio (KOH), en miligramos, requeridos para que un gramo de grasa o aceite se saponifique completamente.
- **Insolubles:** Este término se refiere al contenido de impurezas presentes en el aceite. Representa los materiales que no se disuelven en la solución y pueden afectar la calidad y la pureza del aceite.

1.2.4. Síntesis del biodiésel.

Existen diversas metodologías para la producción de biodiésel, las cuales varían según el tipo de materia prima y el catalizador empleado, ya sea ácido o básico. Además de estos catalizadores convencionales, se recurre a tecnologías como resinas de intercambio iónico, lipasas (enzimas) y fluidos supercríticos. Esta diversidad resalta la versatilidad del proceso y la capacidad de adaptarse a diferentes condiciones y materias primas disponibles.

Una de las ventajas distintivas del biodiésel es su origen a partir de materias primas naturales y renovables. Este combustible se deriva principalmente de aceites de origen vegetal y animal, lo que contribuye a disminuir la dependencia de los recursos fósiles y promueve la sostenibilidad ambiental y económica (López, 2022).

Uno de los métodos más comúnmente empleados para la producción de biodiésel se destaca la transesterificación básica. Este proceso es ilustrado en la figura 1, representando un enfoque fundamental en la conversión de materias primas oleaginosas en biodiésel de alta calidad.

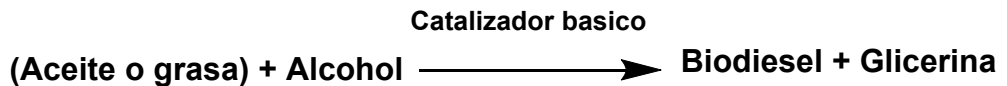


Figura N°1. Conversión de aceites y grasas en biodiésel.

1.2.5. Transesterificación de triglicéridos para obtener biodiésel

La transesterificación, también conocida como alcoholisis debido al uso de alcoholes de cadena corta como metanol o etanol, es un proceso que implica la combinación de un aceite vegetal o grasa con un alcohol en presencia de un catalizador, este proceso tiene como objetivo la producción de ésteres de ácidos grasos, junto con la formación de glicerina como un subproducto de valor añadido (Pérez-Bravo *et al.*, 2022). Este procedimiento es comúnmente aplicado para disminuir la elevada viscosidad de los aceites y grasas. La figura 2 ilustra la reacción genérica de la transesterificación con la utilización de un catalizador básico.

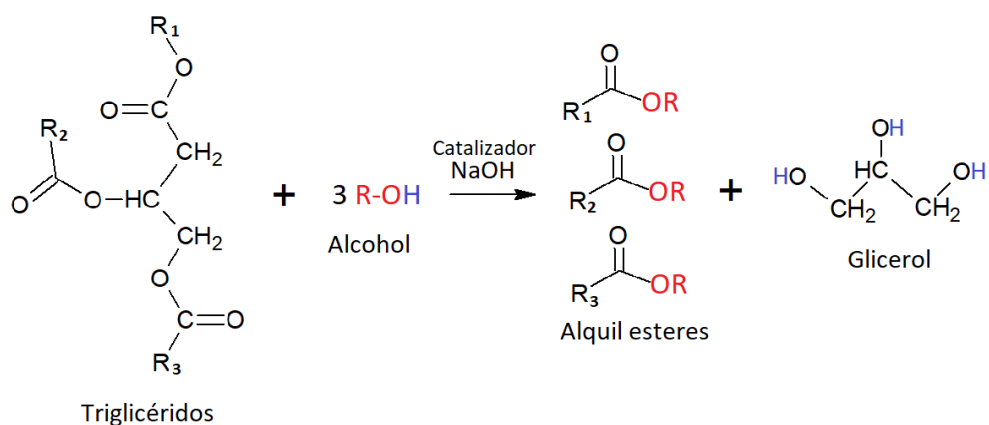


Figura N°2. Reacción general de la transesterificación.

Cuando se emplea metanol, se denomina metanolisis, mientras que, si se usa etanol, se conoce como etanolisis. Ambos procedimientos tienen la posibilidad de ser catalizados por un ácido o una base. Entre las sustancias alcalinas más comúnmente empleadas se encuentran el hidróxido de sodio y el hidróxido de potasio. Por otro lado, los catalizadores ácidos convencionales empleados incluyen el ácido sulfúrico, ácidos sulfónicos y ácido clorhídrico. Tras la etapa de transesterificación, los productos resultantes son una combinación de ésteres, glicerol, alcohol, catalizador, y tri-, di- y monoglicéridos, los cuales son posteriormente separados (Elgharbawy *et al.*, 2021). La capa de glicerina se asienta en el fondo del recipiente de reacción.

La aparición de diglicéridos y monoglicéridos constituye una etapa intermedia en el proceso. En la figura 3, se describe los productos intermedios formados durante la reacción de transesterificación.

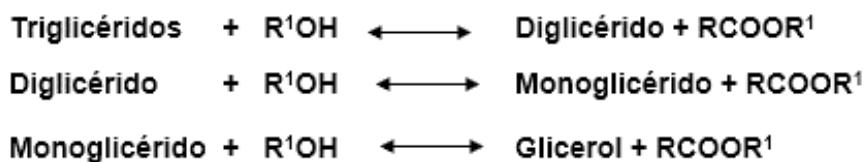


Figura N°3. Productos intermedios generados durante la reacción de transesterificación.

Las etapas de la reacción son reversibles por lo que se estila usar una pequeña cantidad adicional de alcohol para que el equilibrio se oriente hacia la formación de ésteres (Elgharbawy *et al.*, 2021). La transesterificación se puede realizar mediante dos tipos de catálisis: catálisis homogénea y catálisis heterogénea.

1.2.6. Mecanismo de transesterificación por catálisis homogénea

La catálisis homogénea básica consiste en producir un alcóxido nucleofílico a partir del alcohol (ver figura 3a) que luego ataca la parte electrofílica de uno del grupo carbonilo del triglicérido formando un nuevo enlace carbono oxígeno y produciendo la ruptura del enlace doble formando un intermedio en la reacción en donde el oxígeno del grupo carbonilo presenta un par de electrones disponibles para formar un nuevo enlace (Meriatna *et al.* 2023).

Seguidamente se produce el reacomodo de los electrones, en los átomos de oxígenos unidos en el grupo carbonilo, produciendo la ruptura de uno de los enlaces carbono oxígeno para dar como productos un éster y un segundo producto intermedio con un par de electrones en el átomo de oxígeno disponibles para formar un nuevo enlace (Meriatna *et al.*, 2023).

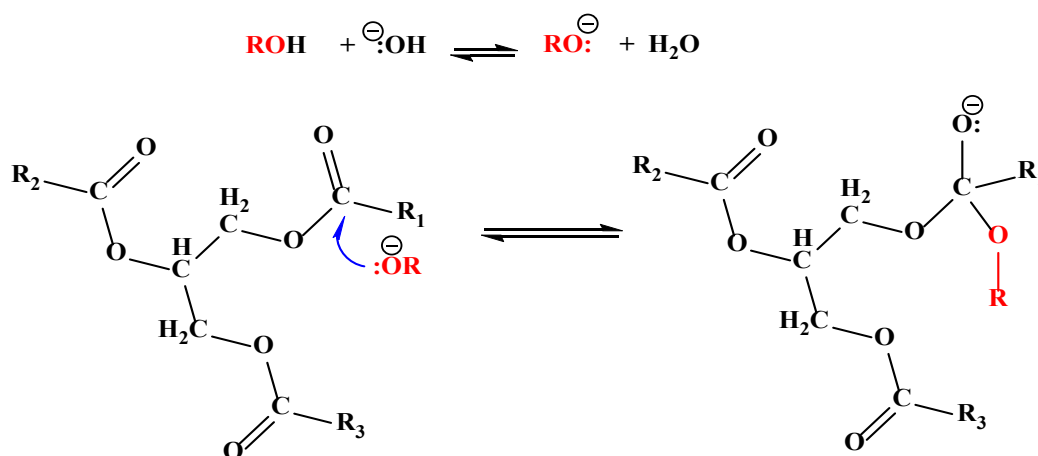


Figura N°4. Formación del grupo alcoxi y ataque al grupo carbonilo.

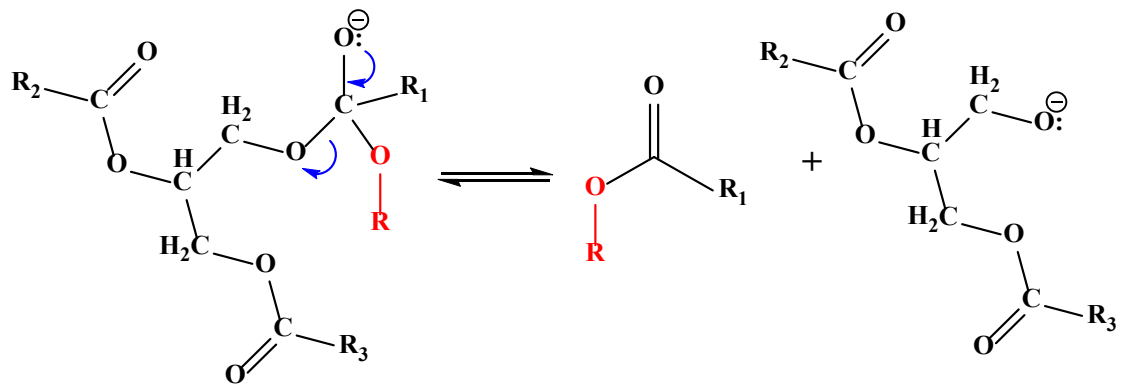


Figura N°5. Formación del éster y segundo producto intermedio.

Luego el átomo de oxígeno con el par de electrones disponibles para formar un nuevo enlace es protonado para formar un grupo hidroxilo, dando origen a la formación de un diglicérido (Meriatna *et al.*, 2023).

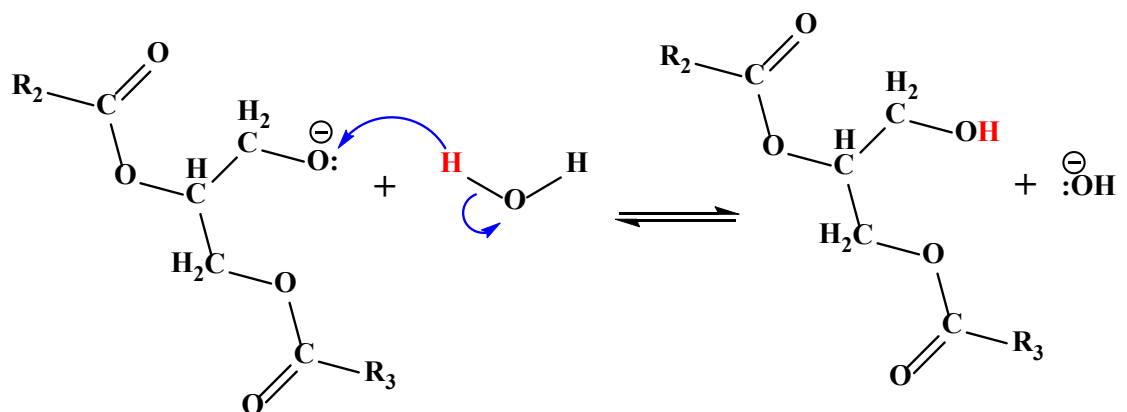


Figura N°6. Formación del diglicérido.

Este mecanismo se repite, otro grupo alcoxi ataca al grupo carbonilo, para formar otro éster y un monoglicérido, en otra etapa un tercer grupo alcoxi ataca al grupo carbonilo del monoglicérido y lo transforma en un tercer éster y el glicerol (Meriatna *et al.*, 2023).

1.2.7. Mecanismo de transesterificación por catálisis heterogénea

La catálisis heterogénea en la reacción de transesterificación emplea catalizadores sólidos recuperables, como los óxidos de metales alcalinotérreos, para reducir los problemas de separación de productos y catalizadores presentes en la catálisis homogénea. En este proceso, la adsorción de especies y la desorción de productos ocurren en la superficie del catalizador. El mecanismo implica:

- Formación del anión alcoxi: Una vez adsorbido, el alcohol se descompone en un anión alcoxi (RO-) y un protón (H+). El anión alcoxi es una especie altamente reactiva que está lista para reaccionar con los ésteres presentes en la materia prima (Wang *et al.*, 2023).

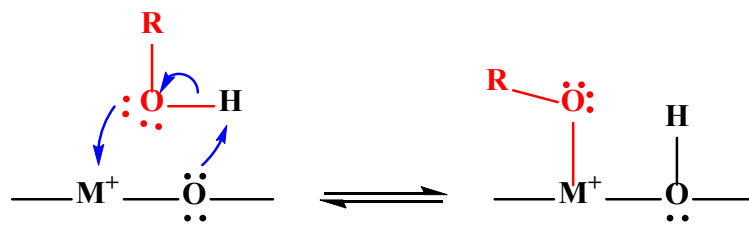


Figura N°7. Adsorción del alcohol en el catalizador.

- Ataque al carbono del carbonilo del éster: El anión alcoxi ataca al carbonilo del grupo éster presente en el triglicérido, sustituyendo el grupo alcoxi por el grupo éster. Este paso forma un intermedio tetraédrico produciendo un nuevo éster de ácido graso (Wang *et al.*, 2023).

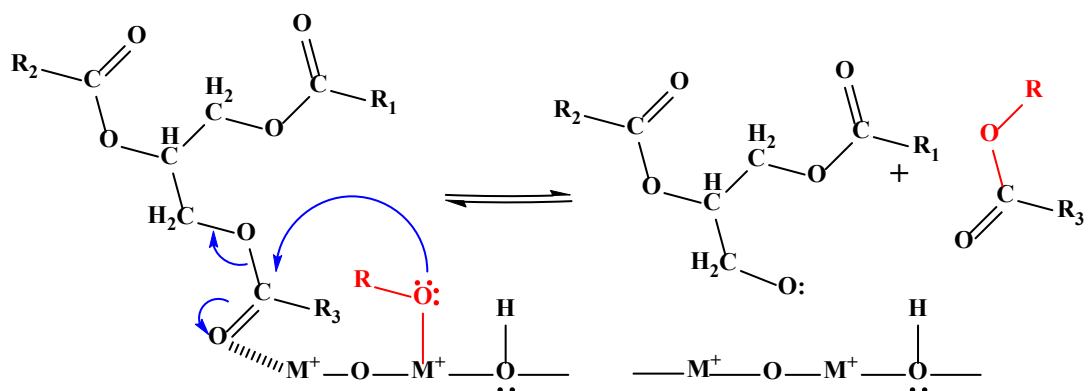


Figura N°8. Ataque del grupo alcoxi formación de nuevo éster.

- Formación del diglicérido: La reacción con el anión alcoxi produce un nuevo éster de ácido graso, mientras que el grupo originalmente unido al carbono del éster se libera como un alcohol (Wang *et al.*, 2023).

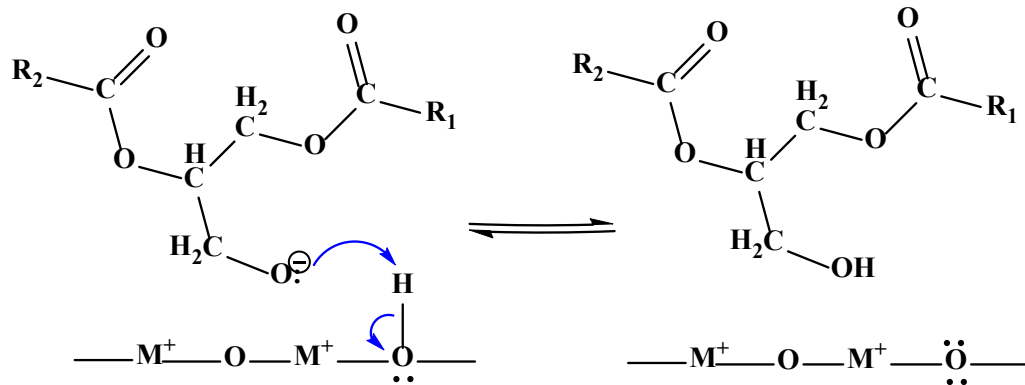


Figura N°9. formación del grupo alcohol para formar el diglicérido.

- Una vez completada la reacción, el producto deseado se desorbe de la superficie del catalizador, dejando espacio para que ocurran nuevas reacciones. Este paso es esencial para que el catalizador heterogéneo continúe siendo activo (Wang *et al.*, 2023).

1.2.8. Parámetros que afectan a la transesterificación

Relación molar metanol/aceite

El exceso de alcohol es necesario para asegurar una buena dispersión de los triglicéridos, mantener baja la viscosidad de la mezcla de reacción, y desplazar el equilibrio químico hacia la formación de los productos. Generalmente, se utiliza una relación molar metanol/triglicérido entre 6:1 y 9:1 (Sánchez, 2021).

La temperatura, tiempo de reacción y la agitación.

La temperatura de reacción puede variar según el tipo de aceite utilizado. A medida que la temperatura se incrementa, se observa un aumento en el rendimiento de la reacción, debido a que facilita el contacto entre el aceite y el alcohol. Sin embargo, existe un punto en el cual el incremento adicional de temperatura no tiene un impacto significativo en el rendimiento.

Generalmente, la transesterificación se realiza a temperaturas cercanas al punto de ebullición del alcohol, que oscilan entre los 60°C y 70°C (Sanaguano, 2018). Por otro lado, el tiempo de reacción es uno de los factores más estudiados, debido a que su influencia en el rendimiento debido a que este define la efectividad de la transferencia de masa en la reacción, en fase homogéneas generalmente es de 1 hora, mientras que en la heterogénea tiende a variar de 1 a 24 horas. Mientras que la agitación evita que las fases de alcohol y aceite se separen en el reactor, aumentando la eficiencia de la reacción (Pérez *et al.*, 2022).

La clase y concentración agente catalítico.

El empleo de un catalizador contribuye significativamente al aumento del rendimiento en la reacción. En ausencia de catalizador, la temperatura requerida para la reacción sería superior a 250°C. La selección del tipo de catalizador es crucial, ya que establece los límites de composición en relación con la materia prima. Además, el catalizador utilizado influye en las condiciones y procesos de separación posteriores a la reacción. La cantidad de catalizador utilizada varía según el tipo empleado; por ejemplo, para catalizadores básicos se registran concentraciones que oscilan entre el 0,3% y el 2% en relación con la cantidad de aceite utilizado (Martínez, 2019).

1.2.9. Macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*)

En la región amazónica del Perú, este árbol es conocido por varios nombres comunes, incluyendo pataxte, pataxte cacao, pataste, patashe, cacao cimarrón e incluso cacao blanco. Alcanza alturas de 7 a 12 metros, con un tronco de color gris y hojas alternas de forma oblonga u ovalada. Su fruto, una baya leñosa, tiene una forma oblonga o subglobosa-elipsoidal y es el más grande dentro del género *Theobroma*, llegando a medir entre 25 y 35 centímetros de longitud y de 12 a 15 centímetros de ancho (Cartay, 2020).



Figura N°10. Planta y cáscara después de extracción de las semillas del fruto de Macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*)

Fuente: Gonzales, Torres 2010

1.3. Definición de términos básicos

- Ceniza calcinada de la cáscara del fruto del macambo: Se refiere al material obtenido a partir de la quema de las cáscaras del fruto de la planta *Theobroma bicolor Bonpl.* Es el catalizador utilizado en la investigación.
- Aceites vegetales usados (AVU): Son aceites de origen vegetal que han sido utilizados previamente en frituras principalmente y se desean convertir en biodiésel a través de un proceso de transesterificación.
- Biodiésel: Es un tipo de combustible renovable elaborado mediante la transesterificación a partir de fuentes biológicas como aceites vegetales o grasas animales.
- Transesterificación: Es un proceso químico en el cual un éster se convierte en otro éster y un alcohol. En este contexto, se refiere al proceso de conversión de los AVU en biodiésel utilizando la ceniza de la cáscara del macambo como catalizador.
- Fuerza básica y contenido de potasio y calcio: Se refiere a las propiedades del catalizador obtenido a partir de la ceniza de la cáscara del macambo, las cuales son importantes para su actividad catalítica en la

transesterificación.

- Diseño experimental factorial 2^3 : Es un diseño experimental que, evalúa el efecto de tres variables independientes (factores) en una variable dependiente, mediante la manipulación de dos niveles en cada uno los factores en el experimento.
- Relación molar metanol/aceite (RM): Es la proporción de moles de metanol respecto a los moles de aceite en la reacción de transesterificación.
- Tiempo de reacción (TR): Es el tiempo que dura la reacción de transesterificación.
- Cantidad de catalizador (CC): Es la cantidad de ceniza de la cáscara del macambo utilizada como catalizador en la reacción de transesterificación.
- Rendimiento en biodiésel: Es la cantidad de biodiésel producido respecto a la cantidad de AVU.
- Actividad catalítica: Se refiere a la eficacia del catalizador en la producción de biodiésel a partir de los AVU.
- Condiciones óptimas: Son las condiciones experimentales que maximizan el rendimiento de la reacción de transesterificación.

CAPÍTULO II: VARIABLES E HIPÓTESIS

2.1. Variables y definiciones operacionales.

Variables independientes:

X1: Relación molar metanol/aceite (RM)

X2: Tiempo de reacción (TR)

X3: Cantidad de ceniza (CC)

Variable dependiente:

Y1: Rendimiento en biodiésel.

Definiciones operacionales

X1: Cantidad estequiometría entre el metanol y aceite usado en la reacción de transesterificación expresada en mol de metanol/mol aceite.

X2: Tiempo estimado que dura la reacción de transesterificación expresada en minutos.

X3: Cantidad de cenizas en relación al peso del aceite expresada en porcentaje.

Y1: Cantidad porcentual de biodiésel obtenido a partir de una cantidad determinada de aceite

2.2. Formulación de la hipótesis.

Dada la composición química de las cenizas la cual contienen, óxidos metálicos y alcalinotérreos, se espera que la ceniza de la cáscara de *Theobroma bicolor Bonpl.* pueda exhibir actividad catalítica produciendo ruptura de los enlaces ésteres presentes en el aceite vegetal usado, facilitando así la producción de biodiésel. Además, se piensa que la relación molar entre el alcohol y el aceite vegetal usado, el tiempo de reacción y la cantidad de catalizador tendrán una influencia en la actividad catalítica de la ceniza. En consecuencia, se plantea:

Hipótesis: La ceniza de cáscara de *Theobroma bicolor* Bonpl. presenta actividad catalítica significativa en la transesterificación del aceite vegetal usado para la producción de biodiésel.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de la investigación

La investigación se clasifica como descriptiva-experimental. Es descriptiva ya que se analizaron las propiedades físicas y químicas del aceite de fritura usado y de las cenizas de la cáscara de macambo. Se considera experimental debido a la manipulación de las condiciones operativas durante la producción de biodiésel, incluyendo la relación molar entre el alcohol y el aceite, el tiempo de reacción y la concentración del catalizador. Se utilizó un diseño experimental factorial 2^3 , con tres factores en dos niveles cada uno, y se realizaron tres réplicas, dando lugar a un total de 24 experimentos.

Tabla N°1. Niveles de los factores de estudio

Variables	Símbolo	Niveles (bajo-alto)	Unidades
Relación molar metanol/aceite	RM	6/1 – 9/1	mol/mol
Tiempo de reacción	TR	60 - 90	Minutos
Cantidad de catalizador	CC	2 - 3	porcentaje

Factores intervinientes:

Temperatura de reacción: 60°C

Agitación : 1200 rpm

La Tabla 2 muestra las combinaciones obtenidas para el diseño experimental.

Tabla N°2. Matriz de planteamiento del experimento

Corrida	RM	TR	CC
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	-	-	+
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Donde:

(-) : Representa los niveles más bajos de los factores en estudio.

(+) : Indica los niveles más altos de los factores en estudio.

3.2. Población y muestra

- **Población de estudio.**

Fue el aceite de vegetal usado colectados en la escuela de gastronomía de la FUNDESAB de la UNAP y la cáscara de macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*).

- **Tamaño de la población de estudio**

Estuvo conformada por 5 litros de aceite de fritura reciclado (usado) generado en la escuela de gastronomía de la FUNDESAB de la UNAP y la cáscara de cinco frutos de macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*).

- **Muestreo o selección de la muestra**

El tipo de muestreo fue por conveniencia del investigador. El muestreo del aceite de fritura reciclado (usados) se realizó en las instalaciones de la FUNDESAB de la UNAP, para ello se dejó un recipiente etiquetado de 5 litro para la disposición de los aceites usados durante una semana. Mientras que para el muestreo de la cáscara de macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*) se compraron cinco frutos en los centros de abastos.

- **Criterios de selección**

El criterio de la selección que se tuvo en cuenta es que el aceite sea usado o de fritura reciclado en la escuela de gastronomía de la FUNDESAB de la UNAP ya que estos son usados una vez. Y que la cáscara sea de frutos de macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*) que se encuentren en estado de madurez.

3.3. Técnicas e instrumentos

En el presente estudio se emplearon diversos métodos de laboratorio y procedimientos estandarizados para preparar las muestras de aceite vegetal usado y ceniza de la cáscara del fruto de macambo *Theobroma bicolor Bonpl.*; y realizar los análisis fisicoquímicos. Se utilizaron equipos especializados para evaluar diversos parámetros.

3.3.1. Instrumentos

Estuvo conformado por los materiales, reactivos químicos y equipos de laboratorio.

Material biológico

El material biológico empleado fue el aceite vegetal usado, y la cáscara de macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*) que fue calcinado para obtener el catalizador.

Reactivos químicos

- Metanol grado analítico 98% de pureza
- Hidróxido de sodio grado analítico 98.4% de pureza
- Hidróxido de potasio granulado 98,4% de pureza
- Ácido sulfúrico 96-97% de pureza.
- Ácido clorhídrico 37% pureza
- Etanol al 99,5% de pureza
- Yoduro de potasio grado analítico
- Sulfato de cobre pentahidratado.
- Carbonato de sodio grado analítico
- Azul Bromo timol grado analítico
- Fenoltaleina grado analítico
- Índigo de Carmín grado analítico

Equipos

- Balanza analítica digital de cuatro dígitos
- Mufla capacidad de 0 a 1200°C.
- Molino eléctrico
- Reactor a reflujo con control de temperatura digital.

3.4. Procedimiento de recolección de datos

En el laboratorio se llevaron a cabo análisis para determinar las propiedades físicas y químicas del aceite de frituras usado, así como la ceniza de cáscara de macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*), y se evaluó su conversión a biodiésel. Se procedió con los pasos siguientes:

A. Caracterización del aceite de fritura usado:

Se determinaron los parámetros, de acuerdo a las Normas Técnicas Peruanas en su versión 2016 sobre aceites y grasas comestibles, margarinas y tortas de semillas oleaginosas (Anexo 1):

Parámetros	Norma
Humedad y materiales volátiles.	NTP 209.004:1968 (revisada el 2016)
Acideces libres	NTP 209.005:1968 (revisada el 2016)
Índice de peróxido	NTP 209.006:1968 (revisada el 2016)
Viscosidad	Cerdeira S. 2000.
Densidad	NORMA CODEX STAN 210-
Índice de Saponificación	1999
Peso molecular	NTP 209.058:1980

B. Preparación del Catalizador a partir de los residuos macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*)

El residuo de macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*), después de ser colectados, fueron secados a una temperatura de 90°C por un tiempo de 2 horas, y luego fueron calcinados en una mufla a una temperatura de 700°C por un tiempo de 4 horas. Las cenizas calcinadas, se pulverizaron aún más hasta obtener partículas finas usando mortero y pilón, luego se guardaron en un recipiente de hermético para su caracterización y uso posterior como catalizador en la reacción de transesterificación.

C. Evaluación actividad catalítica del catalizador en la transesterificación del aceite vegetal usado.

Transesterificación del aceite vegetal usado.

La transesterificación se realizó a nivel de laboratorio. El aceite vegetal usado (AVU), metanol y ceniza se pesaron según las proporciones establecidas según el diseño experimental para cada ensayo y se colocaron en un balón de tres bocas de capacidad de 500 mL, implementado con un sistema de reflujo, la reacción se realizó a una temperatura de 60°C con una velocidad de agitación de 1200 rpm. El tiempo de reacción se mantuvo según lo establecido en cada ensayo.

Para cada prueba, se emplearon 50 gramos de aceite vegetal usado (AVU), y se determinaron las cantidades de los reactivos a utilizar según la estequiometría de la reacción de transesterificación y el diseño experimental detallado en la Tabla 3.

Tabla N°3. Cantidad de reactivos usados en cada ensayo

Ensayo	Relación molar Alcohol/Aceite (RM)	Tiempo de reacción (TR)	Concentración del catalizador (CC)	Peso aceite vegetal usado	Peso alcohol Metílico	Peso catalizador (CRAUC)	Temperatura reacción
	Mol/mol	min	%	g	g	g	°C
1	6/1	60	2	50	12,58	1,0	60
2	9/1	60	2	50	18,88	1,0	60
3	6/1	90	2	50	12,58	1,0	60
4	9/1	90	2	50	18,88	1,0	60
5	6/1	60	3	50	12,58	1,5	60
6	9/1	60	3	50	18,88	1,5	60
7	6/1	90	3	50	12,58	1,5	60
8	9/1	90	3	50	18,88	1,5	60

Filtración

Finalizada la reacción, se aprecia tres fases; biodiésel (superior) glicerina (media) y catalizador (inferior), en seguidamente se separó el catalizador mediante filtración por gravedad.

Decantación

Para separar el biodiésel se utilizó una pera de decantación. En donde se colocó el filtrado y se dejó en reposo por 24 horas, para obtener la separación de las fases, biodiésel (superior), glicerina (inferior), seguidamente se procedió a separar la glicerina del biodiésel.

Purificación

El biodiésel fue filtrado usando carbonato de calcio para mejorar su apariencia eliminando el metanol y agua. Posteriormente el biodiésel fue calentado a 90 °C para eliminar el metanol y humedad que podría tener el producto.

Determinación del rendimiento en biodiésel

El rendimiento se determinó mediante la proporción entre la masa de biodiésel obtenido y la masa del aceite vegetal usado (AVU) utilizado en la reacción, expresado como un porcentaje. (Amenaghawon *et al.*, 2022).

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Gramos de biodiésel producido}}{\text{Gramos (AVU)}} \times 100$$

D. Pruebas de la calidad del biodiésel

Parámetros	Norma
Viscosidad Cinemática a 40 °C, cSt	ASTM D 445-04
Densidad.	ASTM D 1298-99
Índice de Acidez (mg de KOH/ g aceite)	NTP 209.005:1968
FAME %V	ASTM 7371-07

Se evaluó la calidad del biodiésel a través de la medición de sus parámetros, incluyendo la viscosidad cinemática y el porcentaje volumétrico de metil ésteres (FAME), los cuales fueron analizados en el laboratorio de PETROPERU-Refinería Iquitos. Por otro lado, el índice de acidez y la densidad fueron determinados en el laboratorio de Análisis Químicos Industriales de la UNAP.

3.5. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Los resultados obtenidos se presentaron utilizando estadísticas descriptivas, empleando tablas y gráficos. Estos resultados fueron analizados mediante el análisis de varianza y pruebas de Tukey para determinar si había diferencias significativas entre los diversos tratamientos utilizados en la producción de biodiésel. Se utilizó el software estadístico MINITAB 17 para realizar estos análisis.

3.6. Aspectos éticos

Este estudio se adhirió a principios éticos, asegurando la integridad de la propiedad intelectual mediante la correcta referencia de las diversas fuentes utilizadas. Se priorizó la protección de la especie vegetal durante el proceso de investigación, y es relevante mencionar que no se llevaron a cabo actividades que implicaran la participación de seres humanos o animales.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

5.1 Caracterización fisicoquímica del aceite vegetal usado (AVU).

Tabla N°4. Caracterización del aceite vegetal usado (AVU)

Determinaciones	Promedio	DS
Humedad (%)	0,61	±0,01
Densidad (g/ml) a 15°C	0,90	±0,03
Viscosidad Cinemática (cSt) a 40 °C	16,62	±0,14
Índice de Acidez (mg de KOH/ g aceite)	0,28	±0,03
Grado de Acidez (% Ácido Oleico)	0,14	±0,02
Índice de Peróxido (mEq O ₂ /Kg aceite)	16,78	±0,01
Índice de Saponificación (mg KOH/g aceite)	220,62	±0,12
Peso molecular (g/mol) *	763,82	±0,49

5.2 Obtención y caracterización del catalizador de cáscara de macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*)

Tabla N°5. Rendimiento en ceniza calcinada obtenida de la cáscara del fruto de macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*)

Muestras	Rendimiento en cenizas (%)				
	1	2	3	Promedio	DE
Cáscara de macambo	3,45	3,24	3,33	3,34	0,064

Tabla N°6. Contenido de potasio y calcio en la ceniza de la cáscara del fruto del macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*)

Determinaciones	Promedio
Potasio (K) %	38,40
Calcio (ca) %	1,76

Tabla N°7. Fuerza básica de la ceniza de la cáscara del fruto de macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*) mediante indicadores de Hammett.

Muestra	Indicador		
	Azul de bromotimol pKBH = 7,2	Fenolftaleína pKBH = 9,8	Índigo de Carmín pKBH = 12,2
Ceniza calcificada de cáscara de macambo	+	+	-

5.3 Evaluación de la actividad catalítica de la ceniza calcificada de la cáscara de macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*) en la reacción de transesterificación del aceite vegetal usado

Tabla N°8. Rendimiento en biodiésel en la reacción de transesterificación del aceite vegetal usado empleando la ceniza del fruto de macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*)

Número Ensayo	RM (mol/mol)	TR (min)	CC %	Rendimiento (%)				
				1	2	3	Promedio	DE
1	6/1	60	2	85,02	84,84	85,05	84,97	0,11
2	9/1	60	2	85,52	85,10	85,13	85,25	0,23
3	6/1	90	2	85,75	85,41	85,55	85,57	0,17
4	9/1	90	2	86,31	86,44	86,24	86,33	0,10
5	6/1	60	3	92,61	92,64	92,67	92,64	0,03
6	9/1	60	3	92,10	92,15	92,14	92,13	0,02
7	6/1	90	3	92,14	92,27	92,22	92,21	0,06
8	9/1	90	3	91,87	91,88	91,89	91,88	0,01

Desv.Est. agrupada = 0,12

En la tabla 9 y tabla 10, se muestra el análisis de varianza y la prueba de Tukey de los rendimientos de biodiésel obtenidos en la reacción de transesterificación del aceite vegetal usado empleando cenizas calcificadas de residuos macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*)

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Tabla N°9. Análisis de Varianza de los rendimientos en biodiésel obtenido vs. Ensayos.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Corridas	7	272,136	38,8766	2745,04	0,000
Error	16	0,227	0,0142		
Total	23	272,363			

Tabla N°10. Prueba de Tukey de los rendimientos en biodiésel obtenidos en los ensayos para un nivel de confianza del 95%.

Ensayos	N	Media	Agrupación
5	3	92,6400	A
7	3	92,2100	B
6	3	92,1300	B
8	3	91,8800	B
4	3	86,3300	C
3	3	85,5700	D
2	3	85,2500	D E
1	3	84,9700	E

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

En la tabla 11, 12,13 y figura 11, se muestra el análisis del modelo de regresión factorial 2³: Rendimiento versus RM, TR, CC, de los rendimientos en biodiésel obtenido en la transesterificación del aceite vegetal usado empleando cenizas calcinadas de residuos macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*)

Tabla N°11. Análisis de varianza del modelo de regresión factorial 2³:
Rendimiento biodiésel versus los factores de estudio RM, TR, CC.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	272,136	38,877	2745,04	0,000
Lineal	3	268,525	89,508	6320,10	0,000
RM	1	0,015	0,015	1,06	0,319
TR	1	0,375	0,375	26,48	0,000
CC	1	268,135	268,135	18932,77	0,000
Interacciones de 2 términos	3	3,577	1,192	84,20	0,000
RM*TR	1	0,163	0,163	11,53	0,004
RM*CC	1	1,325	1,325	93,59	0,000
TR*CC	1	2,089	2,089	147,47	0,000
Interacciones de 3 términos	1	0,034	0,034	2,38	0,142
RM*TR*CC	1	0,034	0,034	2,38	0,142
Error	16	0,227	0,014		
Total	23	272,363			

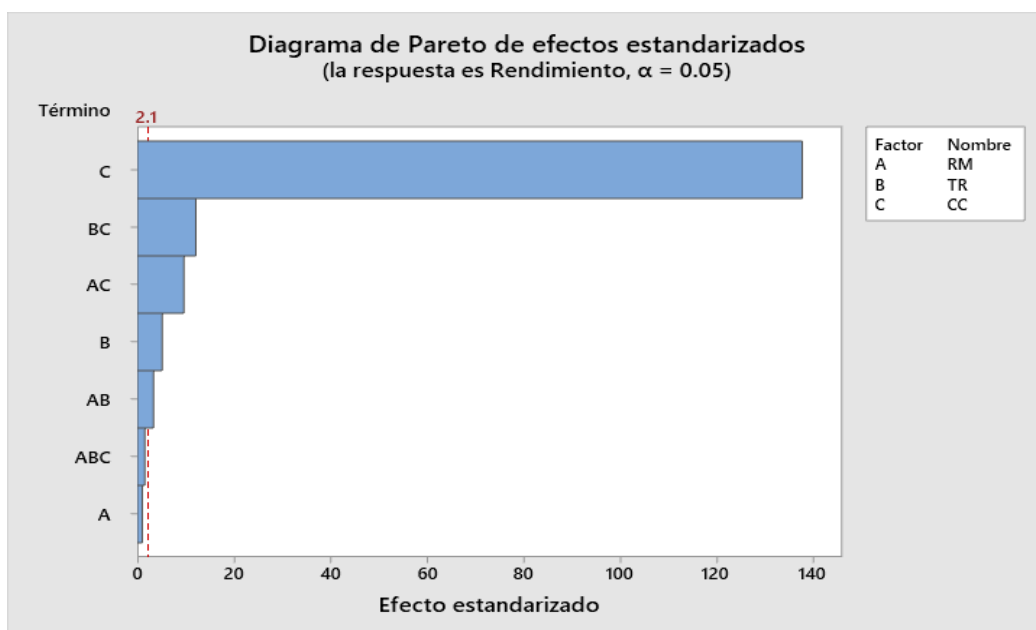


Figura N°11. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para un $\alpha=0.05$

Tabla N°12. Resumen del modelo regresión factorial 2³: Rendimiento en biodiésel versus los factores en estudio RM, TR, CC.

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,119006	99,92%	99,88%	99,81%

Tabla N°13. Optimización de la respuesta: Rendimiento de biodiésel obtenido.

Variable	Valor de configuración
RM	6/1
TR	60
CC	3

Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
Rendimiento	92,6400	0,0687	(92,4943 - 92,7857)	(92,3487 - 92,9313)

En la tabla 14 muestra las características fisicoquímicas del biodiésel obtenido en los ensayos 5, 6, 7, y 8 en donde se observó los mejores rendimientos.

Tabla N°14. Características físicas y químicas del biodiésel obtenido.

Parámetros	Ensayos				ASTM D 6751-03	EN 14214	N.T.P 321.12 5.2019
	5	6	7	8			
Densidad (g/cm ³)	0,8761	0,8760	0,9085	0,9113	0,86-0,90	0,85	-----
Viscosidad (cSt) 40°C	7,86	8,295	10,683	11,248	1,90-6,0	3,5-5,0	1,90-6,0
Índice de acidez (mg KOH/g aceite)	0,2744	0,2805	0,2167	0,2804	< 0,8máx.	0,5 máx.	0,5 máx.
Ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) % m	94,56	93,18	89,73	88,55	-----	96,5 min	96,5 min

CAPITULO V: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Las propiedades físicas y químicas del aceite vegetal usado (AVU) se detallan en la tabla 4. Se destaca que el contenido de humedad, con un valor del 0,61%, es ligeramente superior al registrado por Souza *et al.* (2021) de 0,42% y similar al informado por Amenahghawon *et al.* (2022) de 0,6%, destacando la importancia del bajo contenido de agua en el aceite para prevenir la formación de jabones durante la reacción de transesterificación. Asimismo, el índice de acidez fue de 0,28 mg de KOH/ g aceite, similar al obtenido por Mohamed *et al.* (2020) y Amenahghawon *et al.* (2022) de 2,8 mg de KOH/ g aceite, pero inferior al obtenido por Souza *et al.* (2021) de 0,53 mg de KOH/g aceite. Estos valores de humedad e índice de acidez del aceite vegetal usado en este estudio sugieren la viabilidad de llevar a cabo una transesterificación básica directa. Por otro lado, se destaca que la viscosidad de (16,62 cSt), menor al valor reportado por Souza *et al.* (2021) de 35,10 cSt.

El rendimiento del catalizador, obtenido a partir de la calcinación de la cáscara del fruto del macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*), alcanzó el 3,34% (véase tabla 5). En cuanto a los niveles de potasio y calcio, se detallan en la tabla 6, mostrando un contenido de potasio del 38,40%, una cifra notablemente superior a los resultados reportados por Etim, Musone y Eloka-Eboka (2021); Nabora, Kingondu y Kivevele (2019); Mares *et al* (2021); Basumatary *et al.* (2021), que registraron valores de 8,57%, 19,2%, 12,7% y 12,07%, respectivamente, pero similar al obtenido por Chutia, Bora y Phukan (2024), que fue del 32,4%. Por otro lado, se observa que el contenido de calcio en la ceniza fue del 1,76%, una cantidad menor en comparación con el 40,96% y 47,4% reportado por Etim, Musone y Eloka-Eboka (2021); Nabora, Kingondu y Kivevele (2019) respectivamente, pero similar al 2,43% y 3,5% mencionado por Basumatary *et al.* (2021) y Chutia, Bora y Phukan (2024). La presencia de niveles elevados de potasio y calcio en estos tipos de catalizadores les confiere una alta actividad catalítica durante el proceso de transesterificación del aceite vegetal para la producción de biodiésel.

El elevado contenido de potasio y la presencia de calcio en las cenizas de en la cáscara de macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*) se ven reflejados en los indicadores de Hammett, donde se evidencia la basicidad en el rango de $pKBH > 9,8$. Este punto se identifica por el cambio de color de la solución, de incoloro a rosado, al utilizar el indicador de fenolftaleína, tal como se muestra en la tabla 7, resultados similares a los reportados por Souza *et al.* (2021); Nabora, Kingondu y Kivevele (2019) y Basumatary *et al.* (2021), quienes atribuyendo esta característica al contenido de calcio y potasio en las cenizas.

En la tabla 8, se presentan los rendimientos promedio de biodiésel obtenidos en los 8 ensayos realizados durante la reacción de transesterificación, con variaciones que oscilan entre un 84,97% y un 92,64%. El análisis de varianza aplicado a estos resultados arroja un valor de $p < 0,05$ para un nivel de significancia $\alpha = 0,05$, indicando que al menos uno de los promedios de los rendimientos obtenidos, difiere de los demás, como se puede apreciar en la tabla 9. Por otro lado, la prueba de Tukey (ver tabla 10), evidencia que el ensayo 5 se encuentra en el grupo A, exhibiendo diferencias estadísticas con los demás ensayos que se encuentran en los grupos B, C, D y E. Eso nos revela que el rendimiento más alto obtenido en este ensayo (92,64% en biodiésel), es diferente a los demás y está siendo favorecido por alguno de los factores en estudio.

En la tabla 11, el análisis de varianza (ANOVA) reveló que el modelo factorial 2^3 es estadísticamente significativo (modelo lineal, $F=2745.04$, $p < 0.005$), indicando que al menos un factor o la interacción de dos términos su interacción afecta el rendimiento del biodiésel (interacción de dos términos, $F=84,20$, $p < 0,05$). Se encontró que el tiempo de reacción y la cantidad de catalizador tienen un impacto significativo en el rendimiento, mientras que la relación molar no lo tiene. Se identificaron interacciones significativas entre pares de factores, lo que resalta la importancia de considerarlas en el diseño y la optimización del proceso. Sin embargo, la interacción de tres términos no mostró una significancia estadística clara ($F=2,38$, $p=0,142$), lo que sugiere que la relación entre los tres factores no afecta significativamente el rendimiento del biodiésel en las condiciones evaluadas.

Los resultados de la investigación muestran que la cantidad de catalizador (CC) es el factor más influyente en el rendimiento del biodiésel, destacando su importancia en la optimización del proceso de transesterificación (Figura N°11), estos resultados resaltan la importancia de la cantidad del catalizador en la reacción. Además, el modelo de regresión explica casi toda la variabilidad en el rendimiento del biodiésel, con altos valores de R-cuadrado, 99,88%, R-cuadrado ajustado y 99,81% para R-cuadrado predictivo (Tabla 12). La mejor configuración de variables para lograr el rendimiento máximo fue con una RM de 6/1, TR de 60 minutos y CC del 3%, con un rendimiento en biodiésel de 92,64%, con una precisión de ajuste del 0,0687, con un intervalo de confianza al 95% entre 92,4943% al 92,7857% (Tabla 13).

La tabla 14, muestra los resultados sobre la calidad del biodiésel obtenido en los ensayos 5, 6, 7, y 8, en donde en general se puede observar que los valores de densidad e índice de acidez cumplen con los estándares requeridos por las normas EN 14214 y N.T.P 321.125.2019, mientras que la viscosidad y el contenido de ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) se encuentran por debajo del mínimo requerido por el estándar. Los ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) son los componentes principales del biodiésel y su contenido es un indicador importante de la calidad del mismo. Los valores registrados sugieren que el contenido de biodiésel en las muestras analizadas es menor de lo esperado. Esto indicaría que es necesario realizar un ajuste en el proceso para aumentar el contenido de biodiésel.

CAPITULO VI: PROPUESTA

En un mundo donde la demanda energética está en constante aumento y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero es imperativa, el biodiésel se presenta como una alternativa prometedora y sostenible a los combustibles fósiles. Sin embargo, su producción aún enfrenta desafíos, especialmente en términos de eficiencia y costos.

Para abordar estos desafíos, la búsqueda de nuevos catalizadores efectivos y económicos es crucial. En este contexto, las cenizas de cáscaras de frutos, como la del macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*), surge como un candidato prometedor debido a su fácil acceso, bajo costo y potencial para actuar como catalizador en la transesterificación de aceites vegetales usados (AVU) para la producción de biodiésel.

Basándonos en los resultados obtenidos en este estudio, donde se demostró la eficacia de la ceniza de cáscara del fruto de macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*) como catalizador en la transesterificación de aceites vegetales usados (AVU), logrando un rendimiento en biodiésel prometedor del 92,64%, es evidente que existen oportunidades para optimizar aún más este proceso y mejorar la calidad del biodiésel obtenido. Por lo tanto, se propone:

- Seguir investigando la optimización de la concentración del catalizador y otros parámetros claves, como la calidad del aceite y velocidad de agitación, utilizando métodos estadísticos y experimentales.
- Caracterización del biodiésel: Sería importante llevar a cabo una caracterización completa del biodiésel producido para determinar su calidad y cumplimiento con las normativas y estándares relevantes. Esto incluiría pruebas adicionales de, punto de inflamación, entre otros parámetros.
- Realizar un estudio de estabilidad para evaluar la resistencia del biodiésel a la oxidación y la degradación con el tiempo. Esto ayudaría a determinar su vida útil y almacenamiento adecuado, así como su comportamiento en condiciones de uso real.

- Realizar un análisis económico detallado para evaluar la viabilidad económica de la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal usado utilizando ceniza de cáscara de macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*) como catalizador. Esto incluiría la evaluación de los costos de producción, los ingresos potenciales y el retorno de la inversión.
- Realizar un estudio del impacto ambiental de la producción de biodiésel utilizando este método, comparándolo con los combustibles fósiles tradicionales y otras fuentes de energía renovable. Esto ayudaría a evaluar los beneficios ambientales de la producción de biodiésel y su contribución a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Finalmente, el trabajo busca desarrollar un proceso de producción de biodiésel más eficiente, económico y respetuoso con el medio ambiente, aprovechando el potencial de las cenizas de cáscaras de frutos como catalizador. Esta propuesta podría revolucionar la industria del biodiésel al ofrecer una alternativa más sostenible y económicamente viable para la producción de combustibles renovables.

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio ofrecen una visión integral de la transesterificación del aceite vegetal usado utilizando cenizas calcinadas de la cáscara del fruto de macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*) como catalizador.

Las propiedades físicas y químicas del aceite vegetal usado, sugieren que este aceite es adecuado para llevar a cabo una transesterificación básica directa, lo que respalda la viabilidad de este proceso.

El catalizador obtenido a partir de la calcinación de la cáscara del fruto del macambo demostró un rendimiento del 3,34%, y su alta concentración de potasio y la presencia de calcio, le proporcionan la fuerza básica necesaria que es importante para la actividad catalítica durante la transesterificación.

Los resultados de los ensayos de transesterificación revelaron rendimientos promedio de biodiésel que oscilan entre 84,97% y 92,64%. El análisis estadístico confirmó la significancia de las diferencias en los rendimientos entre los distintos grupos de ensayos, lo que sugiere que al menos una de las condiciones o factores del proceso tiene un impacto significativo en el rendimiento del biodiésel.

La interacción entre el tiempo de reacción, el porcentaje de catalizador y la relación molar fue evaluada mediante análisis de varianza y modelos de regresión factorial. Se encontró que el tiempo de reacción y la cantidad de catalizador tienen un efecto significativo en el rendimiento del biodiésel, mientras que la relación molar no mostró una influencia relevante en el rango de valores evaluados. Además, se identificaron interacciones significativas entre pares de factores, destacando la importancia de considerar estas relaciones complejas en la optimización del proceso.

La optimización de la respuesta indicó que la mejor configuración de variables para lograr el rendimiento máximo fue una relación molar de 6/1, un tiempo de reacción de 60 minutos y un porcentaje de catalizador del 3%, lo que resultó en un rendimiento del 92,64%.

La calidad del biodiésel para los ensayos 5,6,7 y 8, cumplen con los parámetros de densidad e índice de acidez de acuerdo a los estándares de calidad del biodiésel, sin embargo el bajo contenido de ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) es un punto de atención que requiere ser analizado en los parámetros del proceso de transesterificación.

Los resultados obtenidos respaldan la hipótesis planteada, confirmando que la ceniza de cáscara de macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*) presenta una actividad catalítica significativa en la reacción de transesterificación del aceite vegetal usado.

CAPÍTULO VIII: RECOMENDACIONES

Realizar análisis más detallados de la composición química de la ceniza de cáscara de macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*) para comprender mejor los mecanismos involucrados en su actividad catalítica.

Continuar experimentando con la ceniza de cáscara de macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*) con diferentes niveles de tiempo de reacción, relación molar y cantidad de catalizador para identificar las condiciones óptimas que maximicen el rendimiento y calidad del biodiésel.

Realizar estudios cinéticos para determinar la velocidad de reacción y los mecanismos de transesterificación catalizada por la ceniza de cáscara de macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*)

Investigar la estabilidad térmica y química del catalizador a lo largo del tiempo y en diferentes condiciones de reacción para evaluar su vida útil y potencial aplicación a escala industrial.

Realizar un análisis económico detallado para evaluar la viabilidad económica de la producción de biodiésel utilizando la ceniza de cáscara de macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*) como catalizador en comparación con otros métodos disponibles.

Investigar otras posibles aplicaciones de la ceniza de cáscara de macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*), como en la industria de la construcción o la remediación ambiental, para maximizar su utilidad y valor agregado.

CAPÍTULO IX: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMENAGHAWON, A.N., OBAHIAGBON, K., ISESELE, V. y USMAN, F., 2022. Optimized biodiésel production from waste cooking oil using a functionalized bio-based heterogeneous catalyst. *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 8, ISSN 26667908. DOI 10.1016/j.clet.2022.100501.
- BASUMATARY, B., DAS, B., NATH, B. y BASUMATARY, S., 2021. Synthesis and characterization of heterogeneous catalyst from sugarcane bagasse: Production of jatropha seed oil methyl esters. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, vol. 4, DOI 10.1016/j.crgsc.2021.100082.
- BELTRÁN VELÁSQUEZ, E. y GAVIRIA NAVARRO, J., 2020. *Evaluación de los parámetros cinéticos de la transesterificación de los aceites vegetales*. Bogotá D.C.: FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA.
- CARTAY, R., 2020. Mocambo (*Theobroma Bicolor*). *Del Amazonas* [en línea]. [consulta: 10 mayo 2024]. Disponible en: <https://delamazonas.com/plantas/mocambo/>.
- CHANGMAI, B., VANLALVENI, C., INGLE, A.P., BHAGAT, R. y ROKHUM, L., 2020. Widely used catalysts in biodiesel production: A review. *RSC Advances*, vol. 10, no. 68, DOI 10.1039/d0ra07931f.
- CHUTIA, G.P., BORA, S. y PHUKAN, K., 2024. Musa balbisiana colla banana flower derived magnetic heterogeneous nanocatalyst for cleaner biodiesel production from jatropha oil. *Materials Today Sustainability*, vol. 26, DOI 10.1016/j.mtsust.2024.100755.
- CUEVAS-GARCÍA, R. y BRAVO NAVA, I., 2021. Producción de combustibles renovables. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, vol. 16, no. 30, ISSN 2007-5979. DOI 10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69635.
- DE OLIVEIRA, K.G., DE LIMA, R.R.S., MOURA, H.M.D.A., BICUDO, T.D.C. y S. DE CARVALHO, L., 2022. Tangerine peel ashes applied as green catalyst: a biorefinery-based approach for biodiesel production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 16, no. 2, DOI 10.1002/bbb.2327.
- ECHEVARRÍA TRUJILLO, R.G., ÑIQUE MESÍA, T.E. y GUERRERO CHIQUILÍN, Y., 2018. Manual para la PRODUCCIÓN DE BIODIESEL a partir del aceite de PIÑÓN BLANCO (*Jatropha curcas* L.). . S.I.:
- ELGHARBAWY, A.S., SADIK, Wagih.A., SADEK, O.M., KASABY, M.A., ELGHARBAWY, A.S., SADIK, Wagih.A., SADEK, O.M. y KASABY, M.A., 2021. A REVIEW ON BIODIESEL FEEDSTOCKS AND PRODUCTION TECHNOLOGIES. *Journal of the Chilean Chemical Society* [en línea], vol. 66, no. 1, [consulta: 23 abril 2024]. ISSN 0717-9707. DOI 10.4067/S0717-97072021000105098. Disponible en:

http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-97072021000105098&lng=en&nrm=iso&tlng=en.

- ERSHOV, M.A., SAVELENKO, V.D., MAKHOVA, U.A., MAKHMUDOVA, A.E., ZUIKOV, A.V., KAPUSTIN, V.M., ABDELLATIEF, T.M.M., BUROV, N.O., GENG, T., ABDELKAREEM, M.A., ABDELKAREEM, M.A. y OLABI, A.G., 2023. Current Challenge and Innovative Progress for Producing HVO and FAME Biodiesel Fuels and Their Applications. *Waste and Biomass Valorization*, vol. 14, no. 2, DOI 10.1007/s12649-022-01880-0.
- ETIM, A.O., MUSONGE, P. y ELOKA-EBOKA, A.C., 2021. An effective green and renewable heterogeneous catalyst derived from the fusion of bi-component biowaste materials for the optimized transesterification of linseed oil methyl ester. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 15, no. 5, DOI 10.1002/bbb.2252.
- FABA, L., DÍAZ, E. y ORDÓÑEZ, S., 2015. Recent developments on the catalytic technologies for the transformation of biomass into biofuels: A patent survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, DOI 10.1016/j.rser.2015.06.020.
- GAUTAM, K., SHARMA, P., GAUR, V.K., GUPTA, P., PANDEY, U., VARJANI, S., PANDEY, A., WONG, J.W.C. y CHANG, J.-S., 2023. Oily waste to biosurfactant: A path towards carbon neutrality and environmental sustainability. *Environmental Technology and Innovation*, vol. 30, DOI 10.1016/j.eti.2023.103095.
- GONZALES, A., TORRES G., 2010. Cultivo de macambo *Theobroma bicolo* (Humb). & (Bompl.). Instituto de investigación de la amazonía peruana-IIAP Iquitos-Perú.[En línea]. [Fecha de consulta: 2 diciembre 2023] Disponible en : <http://iiap.org.pe/upload/publicación/PUBL534.pdf>
- GOURAN, A., AGHEL, B. y NASIRMANESH, F., 2021. Biodiesel production from waste cooking oil using wheat bran ash as a sustainable biomass. *Fuel*, vol. 295, DOI 10.1016/j.fuel.2021.120542.
- HAMZA, M., AYOUB, M., SHAMSUDDIN, R.B., MUKHTAR, A., SAQIB, S., ZAHID, I., AMEEN, M., ULLAH, S., AL-SEHEMI, A.G. y IBRAHIM, M., 2021. A review on the waste biomass derived catalysts for biodiesel production. *Environmental Technology and Innovation*, vol. 21, DOI 10.1016/j.eti.2020.101200.
- LÓPEZ CRUZ, O.I., 2022. *Propuesta técnica para la producción de biodiésel a pequeña escala a partir de aceite desechado de frituras de los locales de comida de la ciudad de Chiclayo*. LAMBAYEQUE: UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO.
- MARES, E.K.L., GONÇALVES, M.A., DA LUZ, P.T.S., DA ROCHA FILHO, G.N., ZAMIAN, J.R. y DA CONCEIÇÃO, L.R.V., 2021. Acai seed ash as a novel basic heterogeneous catalyst for biodiesel synthesis: Optimization

of the biodiesel production process. *Fuel*, vol. 299, DOI 10.1016/j.fuel.2021.120887.

MARTÍNEZ MARTÍNEZ, A.R., 2019. *Obtención de biodiesel mediante catálisis heterogénea con CaO/SBA-15 y su análisis de ciclo de vida*. S.I.: ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS.

MERIATNA, HUSIN, H., RIZA, M., FAISAL, M., AHMADI y SULASTRI, 2023. Biodiesel production using waste banana peel as renewable base catalyst. *Materials Today: Proceedings*, vol. 87, ISSN 2214-7853. DOI 10.1016/J.MATPR.2023.02.400.

MOHAMED, R.M., KADRY, G.A., ABDEL-SAMAD, H.A. y AWAD, M.E., 2020. High operative heterogeneous catalyst in biodiesel production from waste cooking oil. *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. 29, no. 1, ISSN 1110-0621. DOI 10.1016/J.EJPE.2019.11.002.

MULKAN, A., ZULKIFLI, N.W.M., HUSIN, H., AHMADI, DAHLAN, I. y SYAFIIE, S., 2023. Development of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) peel waste as a new solid catalyst: Biodiesel synthesis, optimization and characterization. *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 177, ISSN 0957-5820. DOI 10.1016/J.PSEP.2023.07.021.

NABORA, C.S., KINGONDU, C.K. y KIVEVELE, T.T., 2019. Tamarindus Indica fruit shell ash: a low cost and effective catalyst for biodiesel production from Parinari curatellifolia seeds oil. *SN Applied Sciences*, vol. 1, no. 3, DOI 10.1007/s42452-019-0256-3.

OLIVEIRA, C. de J. de, 2018. *ESTUDO DA EFICIÊNCIA DO DIGLICERÓXIDO DE CÁLCIO A PARTIR DA CASCA DE OVO E GLICERINA BRUTA COMO CATALISADOR NA SÍNTESE DE BODIESEL DE ÓLEOS RESIDUAIS*. Palotina: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ.

OUELLET, B. y ABDEL-MAWGOUD, A.M., 2024. Production of genetically engineered designer biodiesel from yeast lipids. *Current Research in Biotechnology*, vol. 7, DOI 10.1016/j.crbiot.2024.100189.

PÉREZ-BRAVO, S.G., AGUILERA-VÁZQUEZ, L., CASTAÑEDA-CHÁVEZ, M.D.R., GALLARDO-RIVAS, N.V., PÉREZ-BRAVO, S.G., AGUILERA-VÁZQUEZ, L., CASTAÑEDA-CHÁVEZ, M. del R. y GALLARDO-RIVAS, N.V., 2022. Condiciones del proceso de transesterificación en la producción de biodiésel y sus distintos mecanismos de reacción. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas* [en línea], vol. 25, [consulta: 26 abril 2024]. ISSN 2395-8723. DOI 10.22201/fesz.23958723e.2022.481. Disponible en: <http://tip.zaragoza.unam.mx/index.php/tip/article/view/481>.

- SANAGUANO SALGUERO, H. del R., 2018. *Conversión de los aceites residuales de la industria de alimentos en biodiesel*. Lima: UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS.
- SÁNCHEZ FABA, E.M., 2021. *Obtención de biodiesel a partir de aceites vegetales empleando catalizadores sólidos nanoestructurados*. Córdoba: UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL.
- SANTI, D., TRIYONO y MORIN, J.V., 2021. The preparation of merbau wood waste ash-based catalyst and its utilization for biodiesel production from low-grade palm oil. *Rasayan Journal of Chemistry*, vol. 14, no. 2, DOI 10.31788/RJC.2021.1426238.
- SOUZA, R., SUAREZ, J., CARRASCO, D. y CASTILLO, A., 2021. Use of shell ash from Musa paradisiacal variety Valery as a basic heterogeneous catalyst in obtaining biodiesel. *Revista Ciencia y Tecnología*, vol. 17, no. 4, ISSN 18106781. DOI 10.17268/rev.cyt.2021.04.05.
- VARGAS, E.M., VILLAMIZAR, D.O., NEVES, M.C. y NUNES, M.I., 2021. Pelletized biomass fly ash for FAME production: Optimization of a continuous process. *Fuel*, vol. 293, DOI 10.1016/j.fuel.2021.120425.
- WANG, B., WANG, B., SHUKLA, S.K. y WANG, R., 2023. Enabling Catalysts for Biodiesel Production via Transesterification. *Catalysts*, vol. 13, no. 4, DOI 10.3390/catal13040740.

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

TITULO	Preguntas	Objetivos	Hipótesis	Tipo y diseño de investigación	Población de estudio y procesamiento	Instrumento de recolección de datos
ACTIVIDAD CATALITICA DE CENIZA DE CÁSCARA DE <i>Theobroma bicolor</i> Bonpl. PARA TRANSESTERIFICAR ACEITE VEGETAL USADO - IQUITOS 2023.	<p>Problema General ¿Cuál será la influencia de las cenizas de la cáscara del fruto de macambo <i>Theobroma bicolor</i> Bonpl?, como catalizador en la transesterificación de aceite vegetal usado para la producción de biodiesel en Iquitos en 2023?</p> <p>Problemas Específicos:</p> <p>¿Qué características físicas y químicas presenta el aceite de fritura usado generados en la ciudad de Iquitos?</p> <p>¿Cuál es la composición química y características</p>	<p>Objetivo General Evaluar la influencia de las cenizas de la cáscara del fruto de macambo <i>Theobroma bicolor</i> Bonpl., como catalizador en el rendimiento de la transesterificación de aceite vegetal usado para la producción de biodiesel en la ciudad de Iquitos.</p> <p>Objetivos Específicos</p> <p>Determinar las características físicas y químicas del aceite vegetal usado en la ciudad de Iquitos.</p> <p>Analizar la composición química y las propiedades</p>	<p>H₀: El uso de la ceniza de la cáscara del fruto de <i>macambo</i> <i>Theobroma bicolor</i> Bonpl., como catalizador influye significativamente en el rendimiento de la transesterificación del aceite vegetal usado generado en Iquitos para producir biodiesel</p>	<p>La investigación es del tipo descriptivo porque se pretende recolectar información referente a la cantidad y características físicas químicas del aceite vegetal usado y ceniza de la cáscara del fruto de macambo <i>Theobroma bicolor</i> Bonpl. Es experimental porque se manipulará los los parámetros de operación en la reacción de transesterificación tales como, cantidad de catalizador, tiempo de reacción y relación molar metanol/aceite para encontrar los parámetros óptimos que nos permita</p>	<p>Población de estudio. Esta constituidos por los residuos de la cáscara del fruto de macambo <i>Theobroma bicolor</i> Bonpl., y el aceite vegetal usado que se genera en la ciudad de Iquitos.</p> <p>Procedimientos: Acondicionamiento y caracterización fisicoquímica del aceite vegetal usado. Calcinación de la torta del fruto de macambo, caracterización química fuerza básica de cenizas de la cáscara del fruto y</p>	<p>Los instrumentos para la recolección de los datos estarán constituidos por materiales, equipos de laboratorio y cuadernos de apuntes de laboratorio.</p>

	<p>básicas que presenta las cenizas de cáscara de frutos de macambo <i>Theobroma bicolor Bonpl.</i>, que se encuentran en la ciudad de Iquitos?</p> <p>¿Cómo interactúan los parámetros que influyen en la transesterificación, como la cantidad de catalizador, el tiempo de reacción y la relación molar metanol/aceite, en la conversión del aceite vegetal usado en biodiesel usando la ceniza de la cáscara del fruto de macambo <i>Theobroma bicolor Bonpl.</i>, como catalizador?</p> <p>¿Cuáles serán la calidad del biodiesel obtenido, mediante la transesterificación de aceite vegetal,</p>	<p>básicas de la ceniza de la cáscara del fruto de macambo <i>Theobroma bicolor Bonpl.</i>, que se generan en la ciudad de Iquitos.</p> <p>Evaluar la interacción de los parámetros de transesterificación, que incluyen la cantidad de catalizador, el tiempo de reacción y la relación molar metanol/aceite, en la eficiencia de conversión de aceite vegetal usado a biodiesel utilizando la ceniza del fruto de macambo <i>Theobroma bicolor Bonpl.</i>, como catalizador.</p> <p>Determinar la calidad del biodiesel producido a través de la transesterificación</p>		<p>convertir eficientemente el aceite vegetal usado en biodiesel usando la torta de la cascará del fruto de macambo <i>Theobroma bicolor Bonpl.</i>, como catalizador. El diseño experimental a emplearse es del tipo factorial 2^3 (tres factores a dos niveles), con dos réplicas, generándose 16 experimentos para el estudio.</p>	<p>Determinación de potasio y calcio en catalizador (cenizas).</p> <p>Evaluación de la eficiencia catalítica de la ceniza de la cáscara del fruto de macambo <i>Theobroma bicolor Bonpl.</i>, en la transesterificación del aceite usado para la obtención de biodiesel.</p> <p>Proceso de transesterificación para la obtención de biodiesel.</p> <p>Se realizarán 8 ensayos con tres repeticiones según el diseño experimental para las diferentes combinaciones de los parámetros y sus niveles, como se muestra en la tabla 4, según los niveles de los</p>	
--	---	--	--	--	---	--

	usando la ceniza de la cáscara del fruto de macambo <i>Theobroma bicolor</i> Bonpl?, como catalizador?	del aceite vegetal usado utilizando las cenizas de cáscara del fruto de macambo <i>Theobroma bicolor</i> Bonpl., como catalizador.			parámetros en estudio. Separación del biodiesel Purificación Rendimiento en biodiesel. Determinación de las características físicas y químicas del biodiesel.	
--	--	--	--	--	---	--

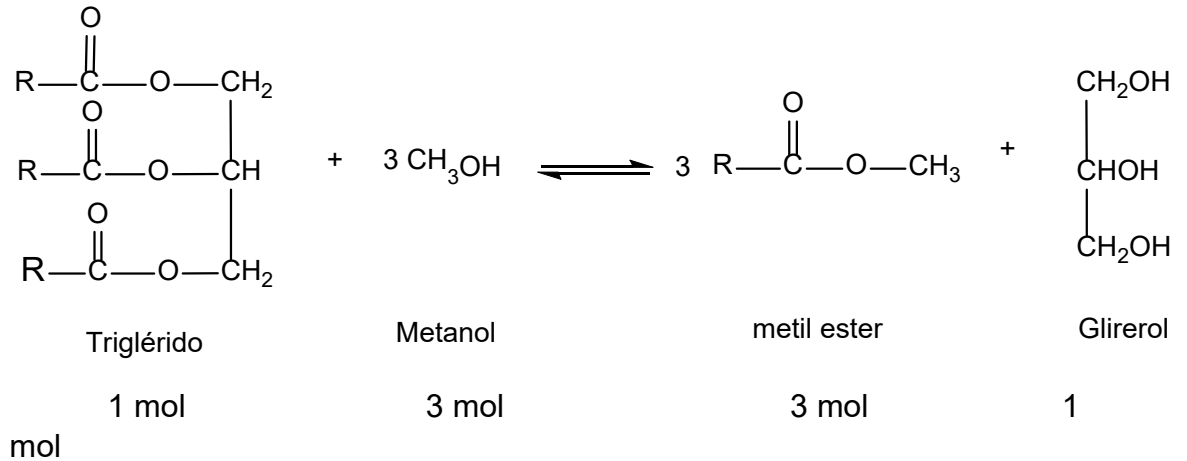
Anexo 2. Tabla de operacionalización de variables

Variable	Definición	Tipo por naturaleza	Indicador	Escala de medición	Categorías	Valores de las categorías	Medio de verificación
Independientes:							
X1: Relación molar metanol/aceite	Cantidad estequiometría entre el metanol y aceite usado en la reacción de transesterificación	Cuantitativa continua	Mol de metanol/mol de aceite	Numérica	Valores de Moles de metanol/moles de aceite usados en la reacción	RM1=6/1 RM2=9/1	Cuaderno de laboratorio
X2: Tiempo de reacción	Tiempo estimado que dura la reacción de transesterificación	Cuantitativa continua	Minutos que dura la reacción	Numérica	Valores en minutos que dura la reacción	TR1= 60 min TR2= 90 min	Cuaderno de laboratorio
X3: Cantidad de ceniza	Cantidad de cenizas en relación al peso del aceite	Cuantitativa continua	Porcentaje en peso cenizas por peso de aceite usado	Numérica	Valores Porcentuales en peso de cenizas por peso de aceite usado	CC1=2% CC2=3%	Cuaderno de laboratorio

Dependiente:							
Y1: Rendimiento en biodiésel	Cantidad porcentual de biodiésel obtenido a partir de una cantidad determinada de aceite	Cuantitativa continua	Porcentaje en peso de biodiésel obtenido por peso de aceite usado	Numérica	Valores Porcentuales en peso de biodiésel obtenido por peso de aceite usado	0 a 100 %	Cuaderno de laboratorio

Anexo 3. Cálculo de metanol requerido para la transesterificación.

De acuerdo a la relación estequiométrica por cada mol de grasa se requiere tres moles de metanol.



Se realizaron los cálculos tomando en consideración el peso molecular del aceite vegetal usado (600.9 g/mol) determinado con el valor del índice de saponificación.

Para una relación molar 1:6

Masa del aceite	=	50.00 g.
PM (AVU)	=	763.82 mol gramo
η (aceite): 1 mol	=	0.0655 Moles
PM (Metanol)	=	32.04 mol gramo
η (Metanol requerido): 6 moles	=	0.3924 Moles
Masa del metanol requerido	=	12.58 g

Para una relación molar 1:9

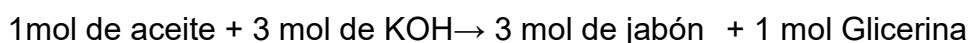
Masa del aceite	=	50.00 g.
PM (AVU)	=	763.82 mol gramo
η (aceite):	=	0.0655 moles
PM (Metanol)	=	32.04 mol gramo
η (Metanol requerido): 9 mol	=	0.5895 moles
Masa Metanol requerido	=	18.88 g.

Anexo 4. Caracterización fisicoquímica del aceite vegetal usado (AVU)

- Determinación del peso molecular del aceite vegetal usado (AVU).

Índice de Saponificación (I. S). Es el peso en miligramos de potasa cáustica (KOH) necesaria para saponificar 1 gramo de grasa.

La saponificación consiste en la reacción de una grasa con un álcali, estequiométricamente se cumple:



Sabiendo el valor del índice de saponificación del aceite vegetal usado (220.62 mg KOH/ g de aceite) y el valor índice de acidez (0.28 mg KOH/ g de aceite) promedio, se aplica la siguiente relación.

$$\text{PM aceite vegetal usado (g/mol)} = \frac{3000 \times \text{PM KOH}}{IS - IA}$$

$$\text{PM aceite vegetal usado (g/mol)} = 763.82$$

- Determinación de Humedad.

Se procede a pesar 10 gramos de muestra en una cápsula de porcelana, luego se introduce en una estufa a 105°C durante 2 horas. Al finalizar este tiempo, se retira de la estufa y se coloca en un desecador para permitir su enfriamiento. Posteriormente, se vuelve a pesar la muestra y se repite este procedimiento hasta alcanzar un peso constante.

Cálculo:

$$\%H = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100$$

Donde

- ✓ W_i = Peso inicial
- ✓ W_f = Peso final

- **Densidad.**

Primero, se procedió a pesar el picnómetro vacío. Luego, se llenó completamente con la muestra y se tapó cuidadosamente para evitar la entrada de burbujas de aire. Acto seguido, se sumergió en un baño de agua a una temperatura controlada de $25^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$, manteniéndolo allí durante 30 minutos. Transcurrido este tiempo, se retiró el picnómetro del baño y se secó meticulosamente con papel absorbente adecuado. Después, se dejó enfriar a temperatura ambiente durante 30 minutos y finalmente se pesó con una aproximación de 0,1 mg.

- **Viscosidad Cinemática.**

Se introduce una muestra de 10 ml en un viscosímetro limpio y seco a través del tubo de mayor diámetro. Luego, se coloca el viscosímetro en un baño termostático y se espera aproximadamente 5 minutos para que la muestra alcance la temperatura de 25°C . Posteriormente, se succiona el aceite por encima de la marca superior del viscosímetro (ubicada en el tubo de menor diámetro) y se mide el tiempo que tarda en pasar entre las marcas A y B.

Calculo:

$$\frac{v}{\rho} = Kx t$$

Donde:

v = Viscosidad cinemática (cSt ó mm^2/s)

K = Constante del viscosímetro que debe determinarse por calibración con un líquido de viscosidad conocida (por ejemplo, agua).

t = Tiempo en que el menisco superior cae de la marca superior del viscosímetro a la inferior (de A a B).

ρ = Densidad de la muestra de aceite. (g/ml)

- **Índice de Saponificación.**

Se comienza pesando 2 gramos de muestra en un matraz, seguido por la adición de 25 mililitros de una solución etanólica de KOH 0.5 N. Luego se

coloca un refrigerante de reflujo y se lleva la mezcla a ebullición, manteniéndola así durante 60 minutos y agitando ocasionalmente por rotación. Al finalizar este tiempo, se retira del calor y se añaden 4 o 5 gotas de fenolftaleína. La solución jabonosa se valora en caliente utilizando una solución de ácido clorhídrico 0.5N.

- **Índice de Acidez.**

Se procede a pesar 2 gramos de muestra en un matraz Erlenmeyer de 250 mL. Luego, se añaden 50 mL de una mezcla de etanol y éter etílico en una proporción de 1:2. Posteriormente, se agregan 3 gotas de indicador de fenolftaleína al matraz. Se procede a valorar la solución con una solución etanólica de KOH 0.1N hasta que se observe el cambio de color indicado por el indicador.

Calculo:

$$\text{Índice de Acidez} = \frac{56,1xVxN}{P}$$

Donde:

V = Volumen en ml de solución etanólica de KOH empleada

N = Normalidad exacta de la solución etanólica de KOH empleada.

P = Peso en gramos de la muestra empleada.

- **Ácidos grasos libres.**

Primero, se pesan 2 gramos de muestra en un matraz. Luego, se añaden 50 ml de alcohol neutralizado al matraz. Se calienta el matraz y posteriormente se agregan 5 gotas del indicador fenolftaleína. A continuación, se titula la solución con NaOH 0.1 N, agitando vigorosamente hasta que aparezca el primer color rosado permanente, que debe ser de igual intensidad que el del alcohol neutralizado. Este color debe persistir durante al menos 30 segundos.

Calculos:

$$\% \text{ AGL (Ac. Oleico)} = \frac{N \times V \times 0,282 \times 100}{P}$$

Donde:

V = Volumen en ml de solución etanoica de NaOH empleada

N = Normalidad exacta de la solución etanolica de NaOH empleada.

P = Peso en gramos de la muestra empleada.

- Índice de Peróxido.

Se pesó 2 g de la muestra en un erlenmeyer, luego se añade 30 ml de solución de ácido acético-Cloroformo (3:2), se agita el frasco hasta que la muestra se disuelva en la solución. Enseguida se añade 0,5 ml de solución saturada de KI y se deja en reposo por exactamente 1 minuto. Luego se agrega 50 ml de agua destilada y se valora con solución de tiosulfato de sodio 0,1 N hasta que el color amarillo de la solución casi desaparezca, enseguida se agrega 0,5 ml de solución de almidón y se continúa la valoración hasta que desaparezca completamente el color.

Cálculos:

$$\text{Indice de Peróxidos} = \frac{N \times V \times 1000}{P}$$

Donde:

V = Volumen de Tiosulfato en mililitros consumido en la valoración.

N = Normalidad de la solución de tiosulfato.

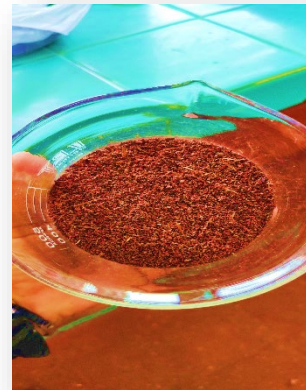
P = peso en gramos de la muestra.

Anexo 5. Imágenes del desarrollo del proceso.

1. Cáscara de *Theobroma bicolor* Bonpl.



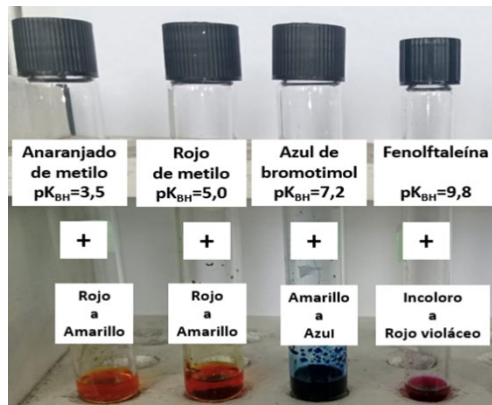
2. Cáscara seca y molida



3. Calcinación



4. Prueba de Hammett de ceniza calcinada de la cáscara de *Theobroma bicolor* Bonpl.



5. Colecta del aceite vegetal usado

Aceite Usado colectado en el Comedor-UNAP

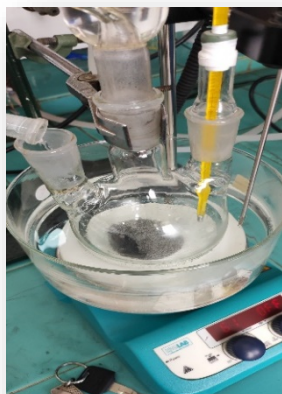


6. Tratamiento del aceite vegetal usado.

Decantación, filtración y almacenamiento del AVU



7. Reacción de Transesterificación



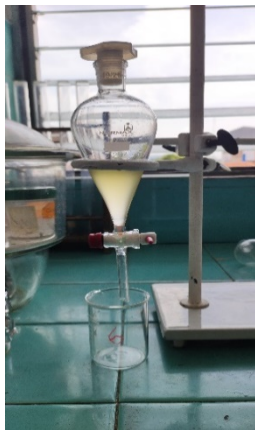
8. recuperación del catalizador



9. Separación de las fases

Decantación

Separación de las fases Glicerina/ Biodiésel



10. Proceso de purificación del biodiésel



11. Biodiésel purificado



Anexo 6. Resultados de los análisis de Ca y K en cenizas de cáscara de macambo (*Theobroma bicolor Bonpl.*)



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS AGUAS Y FOLIARES



INFORME DE ENSAYO

2401011

Ciente Proyecto: Actividad catalítica de ceniza de cascara de *Theobroma bicolor bonpl.* para transesterificar aceite vegetal usado Iquitos 2023.
Dirección Av. Grau 1074 - Iquitos
Procedencia de muestra: Iquitos - Loreto
Matriz Cenizas

Fecha de Muestreo : --
Fecha de Ingreso : 22/01/2024
Fecha de Informe : 30/01/2024
Código de Laboratorio :
N° de páginas : 1 de 1

Id.		Ca %	K %
Lab	Campo		
2401011.3	Macambo	1.76	38.40

(*) Muestras en base seca


Ing. Julio Zavaleta Armas
Jefe de Laboratorio

Anexo 7. Resultado del contenido de metil éster (FAME) en el biodiésel obtenido

PETROLEOS DEL PERU - PETROPERU S.A.
GERENCIA DPTO. REFINACION SELVA
UNIDAD LABORATORIO - JEFATURA TECNICA

Resultados Ensayos Muestras de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana

ITEM	N° ENSAYO	MUESTRA DE BIODIESEL	CONTENIDO DE FAME %v	VISCOSIDAD 40°C cSt
1	ENSAYO 5	CATALIZADOR: Cáscara de Macambo	94.56	7.860
2	ENSAYO 6	CATALIZADOR: Cáscara de Macambo	93.18	8.295
3	ENSAYO 7	CATALIZADOR: Cáscara de Macambo	89.73	10.683
4	ENSAYO 8	CATALIZADOR: Cáscara de Macambo	88.55	11.248

- FAME (Metil Ester de Acidos Grasos).

- La viscosidad cinemática se efectuó de acuerdo a la norma ASTM D445.

- El contenido de FAME efectuó de acuerdo a la norma ASTM D7371.

Nota: el análisis de API no se llevo a realizar, debido a que el volumen de las muestra eran menores a lo requerido (600 mL) para realizar la prueba.



Firmado digitalmente por:
LAYCHE LOZANO Edain
Medio: FAU 20100128218 soft
Motivo: CONFORME
Fecha: 24/01/2024 16:01:31-0500