

Effect of acid and base catalytic transesterification on the methyl ester profile of biodiesel

Joseph Alex Torres Olaya¹; Yasmin Nicole Adames Solano¹; Maicol Enrique Peralta Vargas¹;
Enrique Fernandez Clergé¹; Luis Mario Miranda Bravo¹;

¹Zamorano University, Honduras, joseph.torres@est.zamorano.edu, yasmin.adames@est.zamorano.edu,
maicol.peralta@est.zamorano.edu, enrique.clerge@est.zamorano.edu, luis.miranda@est.zamorano.edu

Abstract– *The study investigates the effect of acid (H₂SO₄) and base (KOH) catalyzed transesterification on the fatty acid profile of biodiesel derived from palm and sunflower oils. A factorial 2x2 experimental design was employed, comparing the two catalysts and oil types, with three repetitions per treatment. Results revealed that potassium hydroxide (KOH) promoted higher yields of monounsaturated fatty acids (e.g., oleic acid) in both oils, while sulfuric acid (H₂SO₄) favored polyunsaturated fatty acids (e.g., linoleic acid). Sunflower biodiesel showed a significant increase in linoleic acid (59%) with H₂SO₄, whereas palm biodiesel retained higher saturated fatty acids (e.g., palmitic acid) with KOH. The findings highlight the catalytic influence on biodiesel composition, impacting properties like oxidative stability and cold flow. Base catalysis proved more efficient for triglyceride conversion, while acid catalysis excelled in preserving unsaturated fatty acids.*

Keywords: *Catalyzer, fatty acid profile, H₂SO₄, KOH, Renewable Diesel.*

Efecto de la transesterificación por catálisis ácida y básica en el perfil de metil ésteres del biodiesel

Joseph Alex Torres Olaya¹; Yasmin Nicole Adames Solano¹; Maicol Enrique Peralta Vargas¹; Enrique Fernandez Clergé¹; Luis Mario Miranda Bravo¹;

¹Zamorano University, Honduras, joseph.torres@est.zamorano.edu, yasmin.adames@est.zamorano.edu, maicol.peralta@est.zamorano.edu, enrique.clerge@est.zamorano.edu, luis.miranda@est.zamorano.edu

Resumen– El estudio evalúa el efecto de la transesterificación con catalizadores ácido (H_2SO_4) y básico (KOH) en el perfil de metil ésteres del biodiesel obtenido de aceites de palma y girasol. Se utilizó un diseño factorial 2x2, comparando los catalizadores y tipos de aceite con tres repeticiones. Los resultados mostraron que el hidróxido de potasio (KOH) promovió mayores rendimientos de ácidos grasos monoinsaturados (p. ej., ácido oleico) en ambos aceites, mientras que el ácido sulfúrico (H_2SO_4) favoreció los ácidos grasos poliinsaturados (p. ej., ácido linoleico). El biodiésel de girasol mostró un aumento significativo en ácido linoleico (59%) con H_2SO_4 , mientras que el biodiésel de palma retuvo mayores cantidades de ácidos grasos saturados (p. ej., ácido palmítico) con KOH. Los hallazgos resaltan la influencia catalítica en la composición del biodiésel, impactando propiedades como la estabilidad oxidativa y el flujo en frío. La catálisis básica demostró ser más eficiente para la conversión de triglicéridos, mientras que la catálisis ácida sobresalió en la preservación de ácidos grasos insaturados.

Palabras clave: Catalizador, H_2SO_4 , KOH, perfil de metil ésteres, diésel renovable.

I. INTRODUCCIÓN

Desde principios del siglo XX, la alternativa de sustituir los derivados del petróleo por recursos renovables se considera cada vez más importante. Esto se debe al crecimiento que está experimentando el mercado en cuanto al desarrollo y la oferta de productos renovables, lo que ha contribuido de manera significativa al gasto relacionado con la producción de biocombustibles en los últimos diez años y ha cambiado favorablemente la situación con respecto a los combustibles fósiles. Según la investigación de Bulla et al. (2014), se indicó que: Esta situación se debe a la reducción de las reservas de petróleo, al aumento de los precios de los derivados del petróleo y al deseo de reducir los efectos nocivos de los combustibles fósiles sobre el medio ambiente [1].

El biodiésel es una mezcla de ésteres alquílicos producidos a partir de ácidos grasos, se destaca como un sustituto renovable y con bajas emisiones de carbono del diésel fósil para el sector del transporte. El biodiésel, un biocombustible biodegradable derivado de aceites vegetales o grasas animales, se puede utilizar puro o mezclado con diésel de petróleo debido a su completa miscibilidad [2]. La transesterificación, proceso de la formación de este, se ocurre con la reacción entre triglicéridos y alcoholes, requiere catalizadores que pueden ser ácidos o básicos. Esta elección

afecta la cinética, el rendimiento, y el perfil de metil ésteres del biodiésel final.

El análisis del perfil de metil ésteres en el biodiésel es fundamental, ya que determina directamente muchas de sus propiedades fisicoquímicas y su rendimiento. La proporción de metil ésteres saturados e insaturados tiene un impacto directo en algunos parámetros clave, como la viscosidad, el punto de inflamación, la estabilidad oxidativa, el índice de cetano y el comportamiento a bajas temperaturas. Por ejemplo, un alto contenido en metil ésteres saturados aumenta el punto de enturbiamiento y mejora el índice de cetano, pero puede afectar negativamente a la fluidez en climas [6]. Por otro lado, un mayor porcentaje de metil ésteres insaturados mejora la fluidez y reduce la viscosidad, pero disminuye la estabilidad oxidativa del combustible [3]. Estas características son muy importantes para cumplir con normas internacionales como ASTM D6751 y EN 14214, lo que significa que el perfil de metil ésteres influye no solo en la eficiencia energética del biodiésel, sino también en su calidad comercial y seguridad operativa.

Las propiedades fisicoquímicas del biodiésel están fuertemente influenciadas por las características estructurales de los metil ésteres poliinsaturados, monoinsaturados y saturados [4]. Por eso, modificar el perfil mediante la elección del catalizador, que puede ser básico como el hidróxido de potasio (KOH) o ácido como el ácido sulfúrico (H_2SO_4), puede optimizar el rendimiento energético y la calidad final del biodiésel. Sin embargo, cada uno presenta ventajas y limitaciones. Investigaciones estiman que la catálisis básica es más rápida y requiere condiciones más suaves, pero es muy sensible al contenido de ácidos grasos libres mientras que la catálisis ácida tolera niveles elevados de ácidos grasos libres, pero requiere tiempos de reacción más largos y condiciones más severas [5]. Por lo tanto, esta situación plantea la necesidad de analizar el efecto de la transesterificación en la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal, utilizando una catálisis alcalina mediante hidróxido de potasio (KOH), como base fuerte, y una catálisis ácida utilizando ácido sulfúrico (H_2SO_4), como ácido fuerte, sobre la composición de metil ésteres del biodiésel obtenido.

II. PLANTEAMIENTO DE HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

A. Identificación del problema de investigación

La eficiencia del proceso de transesterificación para la producción de biodiésel y la calidad del producto final pueden variar significativamente dependiendo del tipo de catalizador

utilizado (ácido o básico) y del tipo de aceite vegetal empleado como materia prima. Se plantea que la composición lipídica del biodiésel puede verse modificada por la interacción entre el tipo de catalizador y las características intrínsecas de cada aceite.

Pregunta de investigación:

¿Cómo influye el tipo de catalizador (ácido vs. básico) en el perfil de metil ésteres del biodiésel producido a partir de aceite de palma y de girasol?

B. *Formulación de hipótesis*

1. *Hipótesis conceptual:*

La naturaleza del catalizador utilizado en la transesterificación (ácido o básico) tiene un efecto significativo sobre la composición de metil ésteres del biodiésel, modificando su perfil lipídico de manera significativa en cada tipo de aceite utilizado (palma o girasol).

Hipótesis operativa:

Si se aplica ácido sulfúrico o hidróxido de potasio en la transesterificación de aceites vegetales distintos, se observarán diferencias en la proporción relativa de metil ésteres saturados e insaturados en el biodiésel, siendo estas diferencias dependientes del tipo de aceite (palma o girasol) y del tipo de catalizador.

Variable independiente: Tipo de catalizador (ácido vs. base)

Variable dependiente: Perfil de metil ésteres del biodiésel

Variables controladas: Tipo de aceite (palma, girasol), relación molar metanol: aceite, tiempo de reacción, temperatura, procedimiento de lavado y secado.

C. *Objetivos del estudio*

Objetivo general:

Evaluar y comparar el efecto de los catalizadores ácido (H_2SO_4) y básico (KOH) sobre el perfil de metil ésteres del biodiésel obtenido a partir de aceites de palma y de girasol.

Objetivos específicos:

a. Calcular el rendimiento del biodiésel producido a partir de cada tipo de aceite bajo ambas condiciones catalíticas.

b. Comparar los perfiles de metil ésteres obtenidos en biodiésel de aceites girasol y palma en presencia de catalizador ácido frente a básico.

c. Establecer cuál combinación aceite-catalizador resulta más favorable en términos de composición y calidad del biodiésel según criterios técnicos.

III. DISEÑO METODOLÓGICO

1. Cálculo de reactivos

Se investigaron los gramos moleculares de los aceites utilizados, obteniéndose 883.45 g/mol para el aceite de palma

y 885 g/mol para el aceite de girasol. Con estos valores, se determinó la cantidad de metanol necesaria para la reacción de transesterificación, empleando una relación molar de 6:1. A partir de los cálculos, se obtuvo el volumen de metanol requerido para cada tratamiento, obteniendo 29.14 ml para 100 g del aceite de palma y 27.43 ml para 100 g del aceite de girasol. Los resultados iniciales fueron obtenidos en gramos y posteriormente convertidos a mililitros para su uso en la reacción.

2. Preparación de catalizadores

Se prepararon las soluciones catalíticas a una concentración de 1.30% disolviendo hidróxido de potasio (KOH) y ácido sulfúrico (H_2SO_4) en metanol. Estas soluciones se mantuvieron refrigeradas hasta su utilización. Paralelamente, se pesaron y separaron las cantidades de aceite correspondientes para cada unidad experimental (100 gramos).

3. Transesterificación

Los aceites se calentaron en un agitador y calentador magnético hasta alcanzar un rango de temperatura de 50 a 55 °C. Una vez alcanzada la temperatura, se añadió la solución de metóxido o ácido sulfúrico preparada, asegurando que la mezcla sea homogénea. La reacción se mantuvo en agitación constante durante 60 minutos, controlando que la temperatura no excediera los 55 °C, ya que una temperatura superior podría hacer formación de jabones en el caso de la catálisis alcalina. Finalizado el tiempo de la reacción, las mezclas fueron retiradas del agitador.

4. Decantación

Las mezclas de las reacciones obtenidas se colocaron en decantadores y se dejaron reposar durante 24 horas para permitir la separación de fases. Pasado este tiempo, se retiró la fase inferior, correspondiente al glicerol, y se colectó la fase superior, que contenía el biodiesel.

5. Lavado del biodiesel

El biodiesel decantado se sometió a un lavado con agua destilada, adicionando el agua, agitando y dejando decantar durante 5 minutos. Este procedimiento se repitió en cuatro ciclos para asegurar la eliminación de impurezas y residuos de glicerol. Finalmente, el biodiesel lavado fue llevado al Erlenmeyer y se secó en horno durante aproximadamente dos horas.

6. Diseño experimental

Se utilizó un diseño factorial 2x2 con cuatro tratamientos, dos tipos de aceite (palma y girasol) y dos tipos de catálisis (ácida con H_2SO_4 y alcalina con KOH). Cada tratamiento se realizó con tres repeticiones, para un total de 12 unidades experimentales.

Se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) para determinar si existen relaciones con significancia entre los factores evaluados, además se realizó una separación de medias Duncan con el propósito de observar diferencias significativas entre tratamientos para todas las variables evaluadas. Se analizó con una significancia de 95% ($P \leq 0.05$) y se utilizó el paquete de análisis estadístico "Statistical Analysis Software" (SAS®).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Previamente, investigaciones recientes han desarrollado de manera independiente la temática de la eficiencia de catalizadores ácidos o básicos en la producción de biodiesel, sin embargo, existe todavía poco seguimiento con respecto a evaluaciones que integren simultáneamente el análisis de cómo el tipo de catalizador y la naturaleza de la materia prima tienen un impacto no solo en el rendimiento general, sino también sobre la distribución específica de metil ésteres obtenidos. En seguimiento a esta necesidad, este estudio propone una comparación experimental directa entre la catálisis ácida (H_2SO_4) y básica (KOH) aplicada sobre aceites de palma y girasol.

Esta investigación persigue responder si la selección del catalizador puede emplearse como herramienta de conversión química y su efectividad en la transesterificación total del perfil lipídico según el aceite utilizado. De este modo, la novedad de este aporte radica en demostrar que la interacción catalizador-materia prima es un aspecto que se debe tomar en cuenta durante el diseño de biocombustibles a base de matrices oleosas, además, considerar que esto puede llegar a impactar diversas propiedades funcionales, tales como: estabilidad oxidativa, comportamiento a temperaturas bajas o índice de cetano. Este enfoque va más allá de centrarse solo en rendimiento y propone una manera de optimización basada en la calidad de la composición del biocombustible.

A partir del análisis de varianza realizado, fue posible evaluar la significancia estadística del efecto individual y combinado de los factores estudiados sobre las variables de respuesta. Los resultados mostraron, en primer lugar, que el rendimiento del proceso de transesterificación presentó diferencias atribuibles tanto al tipo de tratamiento catalítico empleado (KOH frente a H_2SO_4) como a la interacción entre dicho tratamiento y el origen del aceite utilizado (girasol o palma). Las significancias obtenidas ($p=0.0050$ y $p=0.0305$, respectivamente) indican que ambos efectos son estadísticamente relevantes, por lo que pueden considerarse factores determinantes en la eficiencia del proceso para la obtención de biodiésel.

En contraste, la densidad del biodiésel no mostró variaciones asociadas a ninguno de los factores evaluados, ya que no se registraron valores de significancia inferiores o iguales a 0.05 que permitieran atribuirles una influencia estadísticamente importante sobre esta propiedad.

En cuanto a la composición de los metil ésteres, se observó que el porcentaje de metil éster de ácido esteárico estuvo condicionado por el tipo de tratamiento aplicado a los aceites, con una significancia de $p=0.0198$. Este resultado confirma que el tratamiento catalítico ejerció un efecto significativo sobre la presencia de este compuesto en los biodiésels obtenidos.

Por otro lado, las proporciones de metil éster de ácido oleico dependieron principalmente del tipo de aceite empleado, aunque también se vieron afectadas por la interacción entre el origen del aceite y el tratamiento catalítico. Las significancias asociadas a estos efectos ($p=0.0036$ y $p=0.0225$, respectivamente) respaldan su influencia estadísticamente significativa.

De manera similar, la presencia de metil éster de ácido linoleico estuvo influenciada tanto por el tipo de aceite como por el tipo de tratamiento, de forma independiente. Las significancias de $p=0.0008$ y $p=0.0201$ confirman la relevancia de ambos factores en la variación de este componente.

Finalmente, los metil ésteres de los ácidos palmítico y pentadecenoico no fueron considerados como variables independientes dentro del análisis, debido a que el ácido palmítico no estuvo presente en el aceite de girasol y el ácido pentadecenoico no se encontró en el aceite de palma, lo que imposibilitó evaluar su variabilidad entre tratamientos y orígenes.

Los cuadros siguientes presentan los porcentajes de metil ésteres en biodiésel a partir del aceite de girasol y palma, comparando el uso de catalizadores KOH (básico) y H_2SO_4 (ácido). Estos porcentajes se calcularon a partir del área bajo la curva de los picos cromatográficos, un método estándar en la caracterización de FAMES (ésteres metílicos de ácidos grasos) en biodiésel.

El porcentaje de cada metil éster se obtiene dividiendo el área de su pico entre la suma total de áreas de todos los picos, multiplicado por 100. Este método es ampliamente aceptado para cuantificar la composición de FAMES en biodiésel.

• Comparación entre catalizadores:

El catalizador KOH promueve una mayor formación de ácidos grasos monoinsaturados, como el oleico (C18:1, n9), así como del ácido cis-10-pentadecenoico (C15:1, n10), en comparación con el uso de H_2SO_4 . En contraste, el catalizador H_2SO_4 favorece la síntesis de metil ésteres poliinsaturados, destacando el cis-9,12-linoleico (C18:2, n9,12), que alcanza valores cercanos al 59 % en cada una de las réplicas, frente a un máximo aproximado del 44 % en presencia de KOH. Asimismo, el contenido de ácido esteárico (C18:0) se mantiene consistentemente más elevado con KOH que con H_2SO_4 (datos no mostrados).

El metil éster ácido palmítico (C16:0) no fue detectado o estuvo por debajo del límite de cuantificación, lo que puede deberse a la materia prima o a la eficiencia del proceso [7]. Según un estudio de Udayakumar, et al., la proporción de metil ésteres insaturados como oleico y linoleico influye en la calidad

del biodiésel, afectando propiedades como la estabilidad oxidativa y el punto de congelación [8].

Los calculados a partir del área bajo la curva cromatográfica, demuestra que el tipo de catalizador que sea básico (KOH) o ácido (H_2SO_4), modifica significativamente la composición del biodiésel de girasol. También, las tres réplicas por catalizador muestran baja variabilidad, lo que indica buena reproducibilidad del método cromatográfico y del proceso de transesterificación. Sigue siendo un enfoque esencial para optimizar la calidad y las propiedades del biocombustible.

En el análisis de biodiesel a base de palma tratado con KOH y H_2SO_4 , no se detectó metil éster ácido cis-10-pentadecanoico en ninguno de los tratamientos, esto se debe a que la transesterificación no genera nuevos ácidos grasos. Asimismo, las repeticiones bajo el tratamiento de KOH presentaron una mayor eficiencia en la conversión de metil ésteres saturados como el palmítico ($40.57 \pm 0.59\%$) y el esteárico ($5.37 \pm 0.09\%$), puesto que el medio alcalino propicia su recuperación y estabilidad estructural.

En contraste, el tratamiento con H_2SO_4 potenció la liberación de metil ésteres insaturados como el oleico ($50.30 \pm 0.09\%$) y el linoleico ($11.97 \pm 0.38\%$), debido a su mayor eficiencia en la hidrólisis completa de triglicéridos y su capacidad de disminuir la oxidación de dobles enlaces. Esto evidencia el efecto diferencial del tipo de catalizadores sobre la composición final de perfil de metil ésteres.

En justificación del actuar del KOH y H_2SO_4 , [10] asevera que el perfil de metil ésteres en el biodiesel de palma tratado con KOH o H_2SO_4 depende tanto del aceite original como del tipo de catalizador, observándose que el metil éster ácido oleico suele ser el componente más abundante, y que el medio ácido puede favorecer la preservación de metil ésteres insaturados como el linoleico, incrementando su proporción en el biodiesel obtenido. Los catalizadores ácidos, como el H_2SO_4 , son especialmente efectivos para la conversión de ácidos grasos libres en biodiesel, pero muestran menor actividad en la transesterificación de triglicéridos saturados, lo que puede resultar en menores concentraciones de ésteres de metilo saturados como el palmítico en el producto final.

Además, según el estudio de Okpala y Dibia, [9] la transesterificación catalizada por KOH soportado en hueso animal calcinado permitió alcanzar un rendimiento óptimo de biodiesel (96.67%) a partir de una mezcla de aceites vegetales, lo que evidencia una conversión rápida y eficiente de los triglicéridos presentes, incluidos aquellos con ácidos grasos saturados como el palmítico, bajo condiciones optimizadas de reacción.

TABLA I
PERFIL DE METIL ÉSTERES EN BIODIÉSEL A PARTIR DEL ACEITE DE GIRASOL Y ACEITE DE PALMA.

		Metil éster promedio (%) $\pm$ D.E.			
		C15: 1, n10	C16: 0	C18: 1, n9 (ω - 9)	C18: 2, n9, 12 (ω - 6)
Girasol	KOH	9.63 $\pm$ 1.14 ^a	-	38.35 $\pm$ 2.76 ^c	46.87 $\pm$ 4.43 ^b
	H_2SO_4	6.71 $\pm$ 0.08 ^b	-	30.11 $\pm$ 0.36 ^d	59.47 $\pm$ 0.47 ^a
	KOH	-	40.57 $\pm$ 0.59 ^a	47.12 $\pm$ 0.18 ^b	7.39 $\pm$ 0.83 ^c
	H_2SO_4	-	33.28 $\pm$ 0.49 ^b	50.30 $\pm$ 0.09 ^a	11.97 $\pm$ 0.38 ^c
Palma	KOH	-	-	-	-
	H_2SO_4	-	-	-	-
	KOH	-	-	-	-
	H_2SO_4	-	-	-	-
C.V.(%)		9.53	1.87	3.38	7.57
R ²		0.92	0.99	0.98	0.99
P		0.1154	0.0196	<0.0001	<0.0001

Cada medición representa la media de tres repeticiones. P: probabilidad C.V.: coeficiente de variación en porcentaje. D.E.: desviación estándar. R: ajuste del modelo. ^{A-D}: letras diferentes en cada indican diferencia significativa ($P \leq 0.05$) entre tratamientos.

Los resultados demuestran que el método de transesterificación básica utilizando KOH es más efectivo para transformar los ácidos grasos del aceite de girasol en metil ésteres, en comparación con la transesterificación ácida que emplea H_2SO_4 . Esta situación está en la hilera con estudios anteriores, como el de Lin et al. [13], que evidenciaron que la aplicación de catalizadores alcalinos, tales como líquidos iónicos básicos, incrementa notablemente el rendimiento del biodiésel derivado del aceite de girasol, gracias a su mejor capacidad para descomponer enlaces éster y favorecer la creación de metil ésteres. En particular, la transformación a metil ésteres como Cis - 10 - Pentadecenoico, Esteárico y Oleico fue mucho más inferior en condiciones ácidas, lo que resalta la vulnerabilidad de estos compuestos ante las condiciones del proceso y el tipo de catalizador empleado.

TABLA II
FRACCIÓN DE ÁCIDOS GRASOS NO TRANSESTERIFICADOS CON LA APLICACIÓN DE CATÁLISIS ÁCIDA EN ACEITE DE GIRASOL.

Metil éster	Nomenclatura	Promedio (%) $\pm$ D.E.	C.V. (%)
C15: 1, n10	Cis - 10 - Pentadecenoico	56.10 $\pm$ 15.63	27.38
C18: 0	Esteárico	54.64 $\pm$ 15.87	29.05
C18: 1, n9 (ω - 9)	Oléico	51.12 $\pm$ 15.25	29.82
C18: 2, n9, 12 (ω - 6)	CIS - 9,12 - Linoleico	22.72 $\pm$ 11.91	52.43

Cada medición representa la media de tres repeticiones. P: probabilidad C.V.: coeficiente de variación en porcentaje. D.E.: desviación estándar.

Además, la disminución de la eficacia que se observó con H_2SO_4 podría relacionarse con la menor capacidad de reacción de los triglicéridos en un ambiente ácido, así como a la producción de subproductos como agua, que puede obstaculizar la reacción,

tal como lo mencionan [14] en su estudio sobre el desempeño de catalizadores bifuncionales. Asimismo, investigaciones como la de [15] enfatizan la relevancia de gestionar los subproductos, como el glicerol residual, que podría acumularse y disminuir la eficiencia general del proceso de reacción. Estos resultados apoyan la inclinación hacia la catálisis básica en la elaboración de biodiésel a partir de aceites vegetales como el de girasol, sobre todo cuando se busca una transformación más completa y efectiva de los ácidos grasos insaturados.

TABLA III
 FRACCIÓN DE ÁCIDOS GRASOS NO TRANSESTERIFICADOS CON LA APLICACIÓN DE CATALISIS ÁCIDA EN ACEITE DE PALMA.

Metil éster	Nomenclatura	Promedio (%) ± D.E.	C.V. (%)
C16: 0	Palmitico	51.80 ± 3.77	7.28
C18: 0	Estearico	51.88 ± 3.55	6.83
C18: 1, n9 (ω - 9)	Oléico	37.91 ± 5.75	15.17
C18: 2, n9, 12 (ω - 6)	CIS - 9,12 - Linoleico	*	*

Cada medición representa la media de tres repeticiones. P: probabilidad C.V.: coeficiente de variación en porcentaje. D.E.: desviación estándar. *: dato perdido.

Los resultados obtenidos con el aceite de palma demostraron una conversión más alta de ácidos grasos a metil ésteres por medio la transesterificación alcalina utilizando KOH, al contrario, con el método ácido que se empleó con el H₂SO₄. Esto concuerda con lo que reportaron [11], quienes identificaron una mayor efectividad y una reducción de ácidos grasos libres en procesos alcalinos, especialmente en aceites como el de palma. Además [12], afirmaron que los procesos alcalinos mejorados son más efectivos, aun en aceites que contienen altos niveles de agua y ácidos grasos, tal como ocurre con los aceites crudos o residuales. Finalmente, la conversión baja que se observó en condiciones ácidas podría estar relacionada con la generación de subproductos como el glicerol, lo que afecta la eficiencia del procedimiento, según [14].

Igualmente, [13] señalaron que variables como la humedad y el tipo de catalizador pueden tener un efecto no deseado en la cinética de reacción, sobre todo en aceites que poseer un alto contenido de triglicéridos saturados, como el de palma.

El rendimiento real de la conversión de aceites de girasol y palma a biodiésel mostró diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. En el caso del aceite de palma utilizando el catalizador alcalino de KOH, se obtuvo un rendimiento del 91 ± 2%, siendo este un 40% mayor al del biodiésel obtenido mediante la catálisis ácida con H₂SO₄. Estudios previos respaldan este comportamiento, por ejemplo, se ha reportado en, algunos estudios que los catalizadores alcalinos homogéneos comunes incluyendo el hidróxido de potasio (KOH) exhiben una excelente actividad catalítica a temperaturas entre 60 y 65 °C, completando típicamente la reacción de transesterificación dentro de 30 a 60 min, con rendimientos de FAME's superiores al 90 por ciento [17].

TABLA IV
 RENDIMIENTO REAL DE CONVERSIÓN A BIODIESEL.

Aceite	Catalizador	Promedio ± D.E. (%)
Palma	KOH	90.67 ± 1.53 ^a
	H ₂ SO ₄	50.6 ± 5.18 ^c
Girasol	KOH	73.67 ± 15.01 ^{ab}
	H ₂ SO ₄	56.33 ± 15.98 ^{bc}
C.V (%)		13.08
R ²		0.88
P		0.0096

Cada medición representa la media de tres repeticiones. P: probabilidad C.V.: coeficiente de variación en porcentaje. D.E.: desviación estándar. R: ajuste del modelo. A-C: letras diferentes en cada columna indican diferencia significativa (P ≤ 0.05) entre tratamientos.

El rendimiento real de la conversión de aceites de girasol y palma a biodiésel mostró diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. En el caso del aceite de palma utilizando el catalizador alcalino de KOH, se obtuvo un rendimiento del 91 ± 2%, siendo este un 40% mayor al del biodiésel obtenido mediante la catálisis ácida con H₂SO₄. Estudios previos respaldan este comportamiento, por ejemplo, se ha reportado en, algunos estudios que los catalizadores alcalinos homogéneos comunes incluyendo el hidróxido de potasio (KOH) exhiben una excelente actividad catalítica a temperaturas entre 60 y 65 °C, completando típicamente la reacción de transesterificación dentro de 30 a 60 min, con rendimientos de FAME's superiores al 90 por ciento [17].

Por otro lado, el rendimiento del proceso depende de catalizador depende también en gran medida de la calidad de la materia prima, especialmente del contenido de ácidos grasos libres, que debe mantenerse por debajo del 1 por ciento para evitar reacciones de saponificación con el catalizador alcalino, lo que resulta en la formación de subproductos de jabón [18].

En cambio, el aceite de girasol presento un rendimiento 17% menor en la conversión por catálisis ácida con respecto a la alcalina, esto debido a que, las reacciones de esterificación/transesterificación catalizadas por ácidos suelen requerir condiciones de reacción drásticas, como una relación molar M/O alta, carga de catalizador, temperatura y un tiempo de reacción prolongado, en comparación con las reacciones de transesterificación catalizadas por bases [19], además este resultado de mayor rendimiento en la catálisis alcalina se asemeja en estudios como el de Zheng & Cho [20] donde mencionan que los catalizadores homogéneos ácidos como el ácido sulfúrico (H₂SO₄) y el ácido clorhídrico (HCl) exhiben velocidades de reacción más lentas y una actividad catalítica relativamente menor, pero ofrecen ventajas distintivas cuando se procesan materias primas con alto contenido de ácidos grasos libres (FFA), como aceite de cocina usado y grasas animales.

TABLA V
DENSIDAD REAL DEL BIODIESEL.

Aceite	Catalizador	Promedio $\pm$ D.E. (g/ml)
Palma	KOH	0.87 ± 0.01^b
	H ₂ SO ₄	0.89 ± 0.01^{ab}
Girasol	KOH	0.89 ± 0.01^{ab}
	H ₂ SO ₄	0.90 ± 0.01^a
C.V (%)		1.17
R ²		0.62
P		0.22

Cada medición representa la media de tres repeticiones. P: probabilidad C.V.: coeficiente de variación en porcentaje. D.E.: desviación estándar. R: ajuste del modelo. A-B: letras diferentes en cada columna indican diferencia significativa ($P \leq 0.05$) entre tratamientos.

Se obtuvo mediante el cálculo de densidad (masa del ácido graso/volumen del ácido graso), que en la transesterificación ácida del aceite de palma con H₂SO₄ (0.89 g/ml) es mayor un 0.02 g/ml en su promedio de densidad, en comparación con el valor obtenido en la transesterificación alcalina (0.87 g/ml).

La densidad de un biodiesel depende principalmente de la conversión de los triglicéridos a metil-ésteres mediante las transesterificaciones y la eliminación de impurezas, si se realizan de manera correcta alguno de estos dos métodos se baja la calidad del biodiesel, para esto existen los límites en las normas de biodiesel como norma ASTM (American Society for Testing and Materials) D6751 [21] que nos mencionan algunos parámetros para un biodiesel de calidad.

Lo que más influye en la densidad es la proporción de ácidos grasos saturados o insaturados que poseen los aceites, el aceite de palma contiene un mayor contenido de ácidos grasos saturados en comparación con el aceite de girasol. Las densidades encontradas en los dos tipos de transesterificación alcalina de ambos tipos de aceites (palma y girasol) se encuentran dentro del rango de densidades de biodiesel presentadas por las NTE INEN 2482,2009 [22] son 0.860 y 0.9 g/ml.

I. CONCLUSIONES

Esta investigación afirma que fue posible detectar una superior eficiencia del catalizador KOH con respecto a los rendimientos, en especial, en el biodiesel a base de aceite de palma donde obtuvo una mejor conversión y menos variabilidad. Sin embargo, el catalizador H₂SO₄ presentó rendimientos menores, esto fue de la mano con una mayor dispersión. La alcalinidad del KOH hace posible que los procesos de transesterificación sean más eficientes y consistentes a nivel general, y con mayor efecto en aceites con alto contenido de triglicéridos con ácidos grasos saturados como el que se elabora de la palma.

Asimismo, es importante determinar que la conservación de los ácidos grasos insaturados como linoleico y oleico en el biodiesel a base de aceite de girasol es facilitada por el tratamiento de KOH, no obstante, el H₂SO₄ ha demostrado que

puede incrementar de manera selectiva el contenido de ácido oleico en el biodiesel a base de aceite de palma. Estos comportamientos distintos hacen posible subrayar cómo el mecanismo de los catalizadores ácido y alcalino se relaciona de manera particular con los grupos funcionales de cada ácido graso, influyendo significativamente en la composición final de cada biodiesel correspondiente a la materia prima utilizada.

Así también, los resultados permiten aseverar que, al aplicar el tratamiento de KOH en el aceite de girasol, se produce un biodiesel con mayor proporción de ácidos grasos poliinsaturados, mientras que, cuando se le aplica el tratamiento de H₂SO₄ al aceite de palma, se generan perfiles en los que prevalecen los ácidos grasos monoinsaturados. Estas diferencias sugieren que es importante que la elección de catalizador y aceite se base en los parámetros de calidad con mayor prioridad, tomando en cuenta las ventajas específicas en el perfil lipídico que cada uno ofrece.

Por último, es necesario afirmar que, al elegir un método de transesterificación, se debe tener en claro la composición final esperada del biodiesel y la naturaleza del aceite del que se dispone para producirlo. Igualmente, se puede identificar la oportunidad de desarrollar protocolos de catálisis combinada o secuencial para modular a conveniencia el perfil de metil ésteres, basada en los notorios efectos diferenciales que se pudieron notar.

REFERENCIAS

- [1] E. A. Bulla Pereira, F. E. Sierra and C. A. Guerrero, "Producción de biodiesel usando aceites residuales de fritura y etanol por catálisis alcalina", *Ingeniería Solidaria*, vol. 10, n.o 17, diciembre de 2014, pp. 61-69. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.16925/in.v9i17.806>
- [2] M. Ramos, A. P. Soares, J. F. Puna, J. Gomes and J. Bordado, "Biodiesel Production Processes and Sustainable Raw Materials". *Energies*, 2019. consensus.app, <https://doi.org/10.3390/en12234408>
- [3] C. Liu, M. Yang, J. Wang, M. Wang and F. Huang, "Effects of fatty acids on oxidation stability and low temperature fluidity of biodiesel", 2015. consensus.app, <https://consensus.app/papers/effects-of-fatty-acids-on-oxidation-stability-and-low-jiangwei-mingxia/4c2d26e68dd45ee887ca9349a4193855/>.
- [4] L. F. Chuah, J. Klemeš, S. Yusup, A. Bokhari and M. Akbar, "Influence of Fatty Acids in Waste Cooking Oil for Cleaner Biodiesel", *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol.19, n.o 3, abril de 2017, pp. 859-68. Springer Link, <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1274-0>
- [5] Monsalve Paredes, Meribary Margarita, "Transesterificación por catálisis ácida y básica del aceite de las semillas de *Crescentia cujete* L. (MATE)", *Cumbres*, vol. 3, n.o 1, mayo de 2017, pp.161-66. https://www.researchgate.net/publication/362948912_Transesterificacion_por_catalisis_acida_y_basica_del_aceite_de_las_semillas_de_Crescentia_cujete_L_MATE
- [6] D. Alviso, G. Artana and T. Duriez, "Prediction of Biodiesel Physico-Chemical Properties from Its Fatty Acid Composition Using Genetic Programming", *Fuel*, vol. 264, marzo de 2020, p. 116844. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116844>.
- [7] G. Birta, N. Levoshko, V. Knysh, S. Usenko, A. Shostia, T. Ovsiannikova, T. Falalieieva, L. Marushko, Y. Semenko and S. Zygin, "Identifying of Rational Conditions for Etherification of Sunflower Soapstock Fatty Acids". *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 2, n.o 6 (134), abril de 2025, pp. 6-13. [journals.urau.ua, https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.326031](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.326031)
- [8] U. Mohan, S. Selvaraju and S. Selvaraju, "Process optimization of KOH catalyzed biodiesel production from crude sunflower-mahua oil". *Biofuels*, vol. 13, pp. 1031-39, 2022. consensus.app, https://doi.org/10.1080/17597269.2022.2071068?urlappend=%3Futm_sou

- [rce%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle](https://www.researchgate.net/publication/352601411)
- [9] C. Okpala and K. Dibia, "Optimized biodiesel production from palm kernel and jatropha curcas oil blend using KOH-supported calcined animal bone catalyst: A Response Surface Methodology and Genetic Algorithm-Bayesian Hybridization", *Cleaner Chemical Engineering*, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.clce.2024.100141>.
 - [10] Punvichai, T., Patisuwan, S., Khamon, P., Peaklin, S., & Pianroj, Y., "Factors Affecting the Quality of Biodiesel from Palm Fatty Acid Distillate at Palm Oil Refining Plant", *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 2021. <https://doi.org/10.33263/briac126.81448151>.
 - [11] V. C. Eze, A. N. Phan and A. P. Harvey, "Intensified one-step biodiesel production from high water and free fatty acid waste cooking oils", *Fuel*, 220, 567-57, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.050>
 - [12] P. Juera-Ong, K. Pongraktham, Y. M. Oo and K. Somnuk, "Reduction in Free Fatty Acid Concentration in Sludge Palm Oil Using Heterogeneous and Homogeneous Catalysis: Process Optimization, and Reusable Heterogeneous Catalysts", *Catalysts*, 12(9), 1007, 2022. <https://doi.org/10.3390/catal12091007>.
 - [13] C. Lin and L. Ma, "Influences of Water Content in Feedstock Oil on Burning Characteristics of Fatty Acid Methyl Esters", *Processes*, 8(9), 1130, 2020. <https://doi.org/10.3390/pr8091130>.
 - [14] S. Elias, A. M. Rabi, B. I. Okeleye, V. Okudoh and O. Oyekola, "Bifunctional Heterogeneous Catalyst for Biodiesel Production from Waste Vegetable Oil", *Applied Sciences*, 10(9), 3153, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10093153>.
 - [15] K. A. V. Miyuranga, U. S. P. R. Arachchige, R. A. Jayasinghe and G. Samarakoon, "Purification of Residual Glycerol from Biodiesel Production as a Value-Added Raw Material for Glycerolysis of Free Fatty Acids in Waste Cooking Oil", *Energies*, 15(23), 8856, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15238856>.
 - [16] A. Navajas, I. Reyero, E. Jiménez-Barrera, F. Romero-Sarria, J. Llorca, and L. M. Gandia, "Catalytic Performance of Bulk and Al₂O₃-Supported Molybdenum Oxide for the Production of Biodiesel from Oil with High Free Fatty Acids Content", *Catalysts*, 10(2), 158, 2020. <https://doi.org/10.3390/catal10020158>.
 - [17] F. Zheng and H. M. Cho, "Study on biodiesel production: Feedstock evolution, catalyst selection, and influencing factors analysis", *Energies*, 18(10), 2533, 2025. <https://doi.org/10.3390/en18102533>
 - [18] R. Mohandassa, K. Ashok, A. Selvaraju and S. Rajagopan. Homogeneous catalysts used in biodiesel production: A review. *Int. J. Eng. Res.* 2016, 5, 264-268. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Homogeneous+catalysts+used+in+biodiesel+production:+A+review&author=Mohandass,+R.&author=Ashok,+K.&author=Selvaraju,+A.&author=Rajagopan,+S.&publication_year=2016&journal=Int.+J.+Eng.+Res.&volume=5&pages=264%E2%80%93268&doi=10.17577/IJERTV5IS050381
 - [19] B. Changmai, C. Vanlalveni, A. P. Ingle, R. Bhagat and S. L. Rokhum, "Widely used catalysts in biodiesel production: A review. *RSC Advances*", 10(68), 41625-41679, 2020. <https://doi.org/10.1039/d0ra07931f>
 - [20] F. Zheng and H. M. Cho, "Study on biodiesel production: Feedstock evolution, catalyst selection, and influencing factors analysis", *Energies*, 18(10), 2533, 2025. <https://doi.org/10.3390/en18102533>
 - [21] G. Knothe, "Calidad del combustible Biodiesel y la norma ASTM. Palmas", 31(especial), 162-171, 2010. Recuperado a partir de <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1563>
 - [22] L. Buestán Guamán and J. E. Ramírez Córdova (s. f.). Obtención de biodiesel a partir de aceite vegetal reciclado mediante transesterificación aplicando NaOH ó KOH como catalizadores [Trabajo de titulación, Universidad de Cuenca]. Repositorio digital de la Universidad de Cuenca. Recuperado de <https://dspace-test.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/40159/1/Trabajo-de-Titulación.pdf>.