

# Optimización de los Parámetros de Producción del Biodiésel a Partir de Aceite Usado de las Pollerías

## Optimization of Biodiesel Production Parameters from Used Oil from Poultry Farms

Juan Carlos Terres León<sup>1</sup> , Tarcila Alcarraz Alfaro<sup>2</sup>  & Gloria Inés Barboza Palomino<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Nacional Autónoma de Huanta, Ayacucho, Perú

<sup>2y3</sup>Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú

Autor corresponsal:

Juan Carlos Terres León  
[jkarlostl@gmail.com](mailto:jkarlostl@gmail.com)

Citar como: Terres León, J., Alcarraz Alfaro, T., & Barboza Palomino, G. I. (2024). Optimización de los Parámetros de Producción del Biodiésel a Partir de Aceite Usado de las Pollerías. Ambiente, Comportamiento y Sociedad, 7(1), 20 - 35. <https://doi.org/10.51343/racs.v7i1.1481>

Recibido: 02 de septiembre de 2024  
Aceptado: 06 de diciembre de 2024



©Los autores. Este artículo es publicado por la revista Ambiente, Comportamiento y Sociedad (RACS) de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>] que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.

### Resumen

En el presente estudio se determinó los parámetros óptimos para producir biodiésel mediante transesterificación de aceite usado con metanol, utilizando NaOH como catalizador. El aceite usado fue recolectado de pollerías en el distrito de Pichari, provincia de La Convención, en el departamento del Cusco. Se utilizó un diseño de Box-Benhken de 4 factores a tres niveles, con cuatro réplicas en el centro, y el método de superficie de respuesta para optimizar las condiciones del proceso de trans-esterificación. Los factores seleccionados fueron la proporción molar metanol-aceite (6:1, 9:1 y 12:1), concentración de NaOH (0.5, 1.25 y 2.0), temperatura (35 °C, 45 °C y 55 °C) y tiempo de reacción (30 min, 60 min y 90 min). La respuesta seleccionada fue el rendimiento del biodiésel. Las condiciones óptimas de producción fueron: proporción molar de metanol a aceite; 9:1, concentración de NaOH; 1.21%; temperatura, 57 °C; y tiempo, 62 min a una frecuencia de agitación de 700 rpm. El rendimiento estimado bajo estas condiciones fue del 94%. Tres ensayos de verificación en estas condiciones mostraron un rendimiento del 94.6%, lo que indica que el rendimiento experimental está muy cerca del rendimiento estimado, con un margen de error del 1.5%, considerado aceptable. El biodiésel producido en estas condiciones cumple con las especificaciones de las normas ASTM D6751 en cuanto a punto de inflamación, contenido de agua y sedimentos, viscosidad cinemática, índice de acidez y contenido de azufre, lo que lo convierte en un combustible alternativo al diésel.

**Palabras clave:** Biodiésel, transesterificación, aceite usado, optimización, método de superficie respuesta.

### Abstract

In the present study, the optimal parameters for producing biodiesel by transesterification of used oil with methanol, using NaOH as a catalyst, were determined. The used oil was collected from poultry farms in the district of Pichari, province of La Convención, in the department of Cusco. A three-level, 4-factor Box-Benhken design with four replicates in the center and the response surface method were used to optimize the conditions of

the trans-esterification process. The selected factors were the methanol-oil molar ratio (6:1, 9:1 and 12:1), NaOH concentration (0.5, 1.25 and 2.0), temperature (35 °C, 45 °C and 55 °C) and reaction time (30 min, 60 min and 90 min). The selected response was the biodiesel yield. The optimal production conditions were: methanol to oil molar ratio; 9:1, NaOH concentration; 1.21%; temperature, 57 °C; and time, 62 min at a stirring frequency of 700 rpm. The estimated yield under these conditions was 94%. Three verification tests under these conditions showed a yield of 94.6%, indicating that the experimental yield is very close to the estimated yield, with a margin of error of 1.5%, considered acceptable. The biodiesel produced under these conditions meets the specifications of ASTM D6751 standards for flash point, water and sediment content, kinematic viscosity, acid number and sulfur content, making it an alternative fuel to diesel.

*Keywords: Biodiesel, transesterification, used oil, optimization, response surface method.*

## **Introducción**

El crecimiento constante de la población mundial, la industria, el calentamiento global causado por los gases de efecto invernadero y la demanda de energía están aumentando, mientras que las reservas de combustibles fósiles están disminuyendo (Foroutan et al. 2018; Atapour et al. 2014; Kumar & Prasad 2018; Singh et al. 2018; Rajesh et al. 2019).

El diésel, un combustible derivado del petróleo, es utilizado por los motores de encendido por compresión y se emplea ampliamente en los sectores de transporte, industrial, así como en aplicaciones agrícolas debido a su alta eficiencia de conversión de combustible y facilidad de operación. Estos motores, que funcionan con diésel derivado del petróleo, emiten grandes cantidades de gases de efecto invernadero (Tanzer et al. 2018).

La disminución de las reservas de combustibles fósiles y el aumento de la demanda de energía están impulsando al mundo a buscar fuentes de energía alternativas, renovables y respetuosas con el medio ambiente para contrarrestar las emisiones de los motores de encendido por compresión, los cambios en el calentamiento global y su impacto ambiental (Rajesh et al. 2019; Tanzer et al. 2018; Singh et al. 2018; Ayoola et al. 2016).

El biodiésel es una fuente de energía alternativa que puede sustituir parcialmente al diésel derivado del petróleo fósil (Singh et al. 2018; Zavaleta et al. 2018). Entre sus ventajas se encuentran la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, su respeto por el medio ambiente, su carácter renovable y sostenible, y el hecho de que no requiere modificaciones en los motores diésel existentes. Además, el biodiésel posee propiedades similares al diésel convencional, ofrece oportunidades financieras a los productores locales y contribuye al crecimiento económico de un país (Rajesh et al. 2019; Singh et al. 2018; Ayoola et al. 2016; Atapour et al. 2014).

El biodiésel es una mezcla de ésteres metílicos de ácidos grasos (Singh et al. 2018) que se puede obtener de aceites vegetales, grasas animales y aceite de cocina usado (Singh et al. 2018; Zavaleta et al. 2018; Hsiao et al. 2018).

El aceite de cocina usado es adecuado para la producción de biodiésel, ya que permite reciclar desechos sin competir con los aceites vegetales comestibles. Además, es fácilmente accesible y económico (Atapour et al. 2014; Kumar & Prasad, 2018; Rajesh et al. 2019). Además, los aceites de cocina usados causan inconvenientes al ser vertidos en el sistema de alcantarillado, lo que provoca bloqueos, malos olores en los desagües, aumento de los costos de tratamiento del agua y problemas ambientales debido a la contaminación de las aguas subterráneas y superficiales. (Rodríguez & Villanueva, 2011). En Pichari, los aceites usados son vertidos directamente en el sistema de alcantarillado, lo cual se debe a la falta de una gestión e investigación adecuadas por parte de los empresarios y las autoridades locales.

El proceso de transesterificación básica con metanol convierte los aceites usados en biodiésel (Ayoola et al. 2016; Tanzer et al. 2018; Atapour et al. 2014). Para producir biodiésel de manera económicamente viable y obtener el máximo rendimiento, es necesario optimizar los parámetros de producción mediante diseños experimentales (Rajesh et al. 2019).

Por lo tanto, esta investigación busca optimizar los parámetros de producción de biodiésel (proporción molar metanol-aceite, concentración de hidróxido de sodio, temperatura y tiempo de reacción) utilizando aceite usado proveniente de las pollerías ubicadas en la localidad de Pichari.

## **Materiales y Métodos**

La investigación es de tipo aplicado, de nivel explicativo y presenta un diseño de carácter experimental.

### ***Materiales***

El aceite usado fue recolectado de las pollerías ubicadas en la localidad de Pichari. Los reactivos utilizados fueron metanol grado reactivo EMSURE® e hidróxido de sodio con una pureza del 98.5% EMSURE®. Los materiales utilizados para este estudio incluyen: materiales volumétricos, tamiz estándar de 200" (0.075 mm) de diámetro, embudo de separación, baño de agua, agitador mecánico, termómetro digital, condensador Graham (Serpentin), balanza digital, agitador magnético con calentador y mechero de Bunsen.

### ***Pre-Tratamiento del Aceite Usado***

El aceite usado se filtró utilizando un colador y un tamiz. Luego, se calentó en un calentador eléctrico a una temperatura de entre 100 y 120 °C durante 10 minutos.

**Figura 1**

*Izquierda, filtración del aceite usado. Derecha, evaporación del agua del aceite usado*



### ***Caracterización del Aceite Usado***

El aceite usado fue caracterizado mediante las siguientes propiedades: valor ácido, valor de saponificación, masa molar y densidad. Luego, se determinó que el contenido de ácidos grasos libres era inferior al 2%, por lo tanto se llevó a cabo el acondicionamiento ácido.

### ***Diseño Experimental***

Para construir la matriz experimental, se empleó el diseño de Box-Behnken con tres niveles y cuatro factores usando el programa Design Expert 12. Los factores elegidos fueron: la proporción molar metanol-aceite, la concentración de hidróxido de sodio, la temperatura y el tiempo. La variable de respuesta elegida fue el rendimiento del éster metílico, expresado como porcentaje en peso.

**Tabla 1**

*Rango y nivel de los factores*

Factor	Unidad	Código	Nivel		
			-1	0	1
Proporción molar metanol-aceite	--	A	6:1	9:1	12:1
Concentración de NaOH	% peso	B	0.50	1.25	2.00
Temperatura	°C	C	45	55	65
Tiempo	min	D	30	60	90

### ***Transesterificación***

La reacción transesterificación se llevó a cabo en un matraz de tres bocas de 500 mL, equipado con un termómetro, un condensador tipo serpentín y un agitador mecánico. Todo el reactor se sumergió en un baño de agua, manteniendo la temperatura constante con una precisión de  $\pm 0.2$  °C. Se pesaron y vertieron 200 g de aceite usado en el matraz, calentándolo a tres temperaturas diferentes (45, 55 y 65 °C). En cada tratamiento, se combinó una cantidad de NaOH y metanol en un Erlenmeyer, agitando constantemente hasta su completa disolución. La solución obtenida, metóxido de sodio, se calentó a 50 °C. Luego, esta solución se vertió lentamente sobre el aceite calentado, iniciando así la transesterificación. La mezcla de reacción se calentó y se agitó a 700 rpm durante tres intervalos de tiempo (30, 60 y 90 minutos) para finalmente producir biodiésel.

**Figura 2**

*Configuración experimental para la transesterificación*



### ***Purificación***

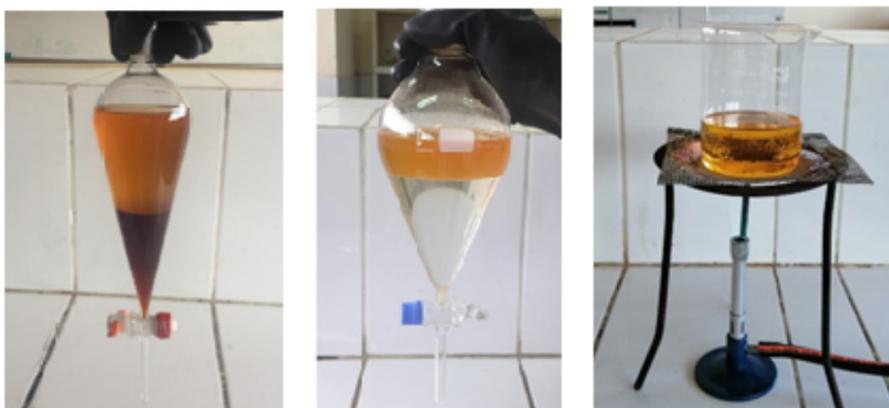
Después de la reacción, la mezcla obtenida se vertió en un embudo de separación y se dejó reposar durante 2 horas para que el glicerol y el biodiésel se separó por gravedad. El biodiésel se lavó varias veces con una cantidad igual de agua destilada a 50 °C en un embudo de separación, dejándolo reposar durante 1 hora hasta que el agua estuviera clara. Luego, el biodiésel se calentó a 100 °C durante 10 minutos en un mechero de Bunsen para eliminar el agua remanente. Finalmente, se pesó el biodiésel recolectado y se calculó su rendimiento.

### Caracterización

Luego, se produjo biodiésel en condiciones óptimas en tres ocasiones. A este biodiésel se le realizaron pruebas de punto de inflamación, contenido de agua y sedimentos, viscosidad cinemática, número ácido y contenido de azufre, de acuerdo con las normas ASTM D6751.

### Figura 3

*Izquierda, separación del biodiésel y glicerol. Centro, lavado del biodiésel con agua. Derecha, secado del biodiésel*



### Figura 4

*Muestras de biodiésel obtenido*



Finalmente, el rendimiento del biodiésel obtenido en los experimentos se calculó dividiendo la masa de biodiésel obtenida por la masa de aceite utilizada en cada tratamiento, como se muestra en la ecuación (1).

$$\text{Rendimiento}(y) = \frac{\text{masa de biodiesel}}{\text{masa de aceite}} \times 100\% \quad (1)$$

### Resultados y discusión

La Figura 3 (izquierda) presenta dos fases: la fase inferior, compuesta por glicerina, hidróxido de sodio, metanol y agua, y la fase superior, que corresponde al “biodiesel” e incluye metanol, jabón, hidróxido de sodio y algo de glicerina libre.

En la Figura 3 (centro) se observan nuevamente dos fases: la fase inferior, predominantemente acuosa, y la fase superior, principalmente de “biodiesel”, con pequeñas cantidades de agua. Finalmente, la Figura 3 (derecha) muestra el biodiesel “libre de agua”.

La Figura 4 muestra la cantidad de “biodiesel” obtenida, destacando la variación en su cantidad. En el recipiente de la derecha se puede observar la glicerina recolectada, de color oscuro.

La caracterización del aceite usado se realizó midiendo las siguientes propiedades: valor ácido, valor de saponificación, masa molar del aceite y densidad.

**Tabla 2**

*Caracterización del aceite usado*

Descripción	Unidad	Valor
Valor ácido	mg KOH/g	3.333
Valor de saponificación	mg KOH/g	182.002
Masa molar	g/mol	942.049
Densidad	g/mL	0.919

De acuerdo con la Tabla 2, el valor ácido fue de 3.333 mg KOH/g. Con este dato se calculó la cantidad de ácidos grasos libres, resultando en un 1.67%. El valor es inferior al 5%, lo que significa que el contenido de ácidos grasos libres del aceite es bajo, por lo que se omitió el acondicionamiento ácido y se procedió directamente a la transesterificación básica. El valor de saponificación es 182.002 mg KOH/g. Este valor bajo sugiere la presencia de una gran cantidad de ácidos grasos (libres o esterificados), un alto contenido de enlaces éster, un alto peso molecular del aceite y la necesidad de una gran cantidad de metanol para obtener biodiésel. La masa molar del aceite fue de 942.049 g/mol. La densidad del aceite usado fue de 0.919 g/mL, lo que indica que se debe medir 217.6 mL para obtener de 200 g de aceite.

La Tabla 3 presenta el rendimiento de biodiésel para cada tratamiento experimental.

**Tabla 3***Matriz de diseño experimental Box-Behnken y rendimiento de biodiésel*

Tratamiento	A	B	C	D	y
1	12	1.25	45	60	48.6
2	9	1.25	65	30	73.0
3	9	2.00	55	90	79.1
4	9	1.25	45	90	77.3
5	6	1.25	65	60	55.6
6	9	1.25	55	60	93.24
7	12	1.25	55	30	65.8

**Tabla 3***Matriz de diseño experimental Box-Behnken y rendimiento de biodiésel (continua)*

Tratamiento	A	B	C	D	y
8	12	1.25	65	60	55.6
9	9	2.00	65	60	77.9
10	6	2.00	55	60	53.8
11	6	0.50	55	60	58.6
12	9	1.25	55	60	95.3
13	9	1.25	45	30	77.6
14	6	1.25	55	90	53.3
15	12	0.50	55	60	54.3
16	9	1.25	55	60	94.0
17	9	1.25	55	60	94.0
18	9	0.50	55	90	74.0
19	6	1.25	55	30	55.9
20	12	2.00	55	60	48.5
21	12	1.25	55	90	49.1
22	9	1.25	65	90	85.6
23	6	1.25	45	60	55.6
24	9	2.00	45	60	58.7
25	9	1.25	55	60	93.24
26	9	2.00	55	30	69.2
27	9	0.50	45	60	70.0
28	9	0.50	55	30	76.5
29	9	0.50	65	90	71.9

Según la Tabla 3, el rendimiento varía entre un 49.1% (en el tratamiento 20) y un 93.7% (en el tratamiento 12). El rendimiento más bajo se registró en el tratamiento 20, bajo las siguientes condiciones: proporción molar de metanol a aceite de 12:1, concentración de NaOH del 2%, temperatura de 55 °C y tiempo de reacción de 60 minutos. En contraste, el rendimiento más alto se alcanzó en el tratamiento 12, con las siguientes condiciones: proporción molar de metanol a aceite de 9:1, concentración de NaOH del 1.25%, temperatura de 55 °C y tiempo de reacción de 60 minutos.

Para evaluar la influencia de los parámetros del proceso en el rendimiento del biodiesel, se realizó un análisis de varianza (ANOVA). Los resultados del ANOVA se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4**

*Análisis de varianza (ANOVA) aplicado al modelo de regresión cuadrático*

Fuente	Suma de Cuadrados	df	Cuadrado Medio	Valor F	Valor p
Modelo	6 377.79	14	455.56	21.32	< .0001
A	9.90	1	9.90	0.4633	.5072
B	41.21	1	41.21	1.93	.1866
C	105.65	1	105.65	4.94	.0432
D	0.96	1	0.9606	0.0450	.8351
AB	0.25	1	0.2500	0.0117	.9154
AC	12.25	1	12.25	0.5733	.4615
AD	49.70	1	49.70	2.33	.1495
BC	34.57	1	34.57	1.62	.2241
BD	24.42	1	24.42	1.14	.3032
CD	68.61	1	68.61	3.21	.0948
A2	5 604.22	1	5 604.22	262.26	< .0001
B2	907.99	1	907.99	42.49	< .0001
C2	644.68	1	644.68	30.17	< .0001
D2	274.20	1	274.20	12.83	.0030
Residual	299.17	14	21.37		
Falta de ajuste	296.33	10	29.63		
Error puro	2.84	4	0.7089	41.80	.0013
Total	6 676.96	28			

Según la Tabla 4, el valor F del modelo cuadrático es 21.3, lo que indica que el modelo es adecuado. Esto significa que al menos un factor del modelo tiene un efecto significativo en la variación del rendimiento. El valor p del modelo cuadrático muestra que hay menos de un 0.01% de probabilidad, con un nivel de confianza del 95%, de que el valor F sea resultado del azar. Los altos valores F y los valores p menores a 0.0500 demuestran que los términos C, A<sup>2</sup>, B<sup>2</sup>, C<sup>2</sup> y D<sup>2</sup> del modelo cuadrático son significativos al 95% de confianza, es decir, contribuyen de manera importante a explicar las diferencias de rendimiento. El efecto significativo de la variable C (Temperatura) se debe a que favorece la reacción de transesterificación.

El modelo cuadrático que estima el rendimiento en función de los factores sin codificar es:

$$y = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 C + \beta_4 D + \beta_{12} AB + \beta_{13} AC + \beta_{14} AD \quad (2)$$

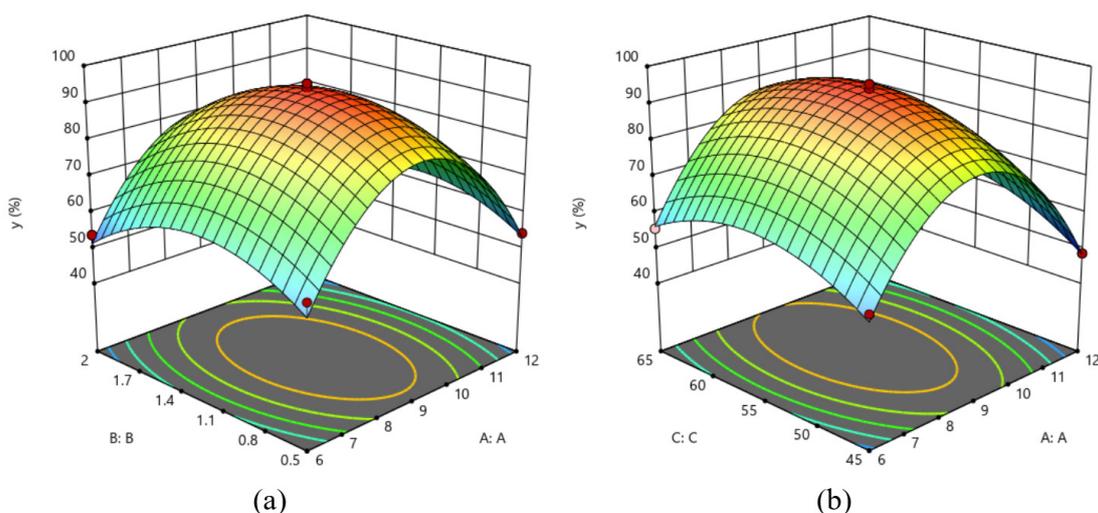
$$+ \beta_{23} BC + \beta_{24} BD + \beta_{34} CD + \beta_{11} A^2 + \beta_{22} B^2 + \beta_{33} C^2 + \beta_{44} D^2$$

Donde y representa el rendimiento de biodiésel, A, B, C y D son los factores no codificados y 0, i, j y ij son los coeficientes de regresión.

La Figura 5a muestra cómo la proporción molar de metanol-aceite y la concentración de NaOH afectan el rendimiento a 55 °C durante 60 minutos. Por otro lado, la Figura 5b muestra la influencia de la proporción molar de metanol-aceite y la temperatura en el rendimiento, manteniendo una concentración de NaOH del 1.25% durante 60 minutos.

### Figura 5

*Superficie respuesta del rendimiento en proporción a las variables del proceso: (a) proporción molar metanol-aceite y la concentración de NaOH, (b) proporción molar metanol-aceite y la temperatura*

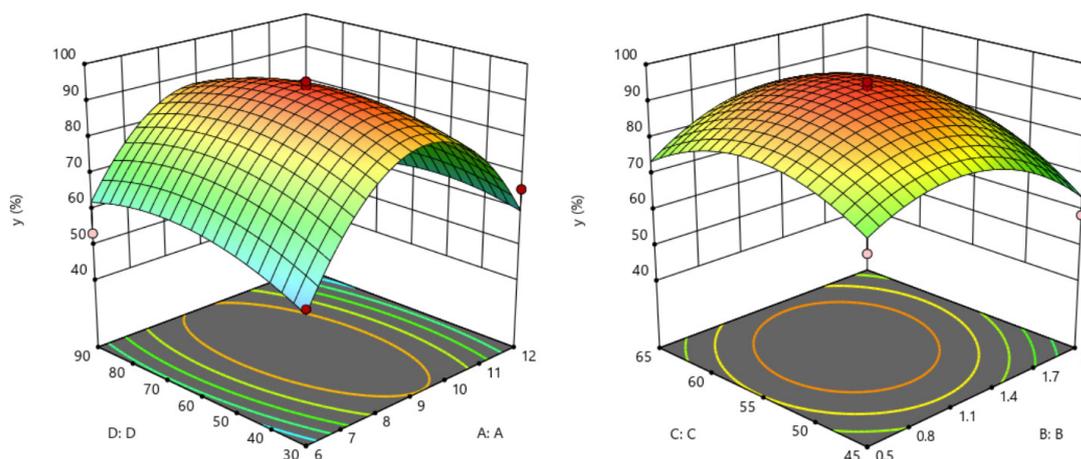


De acuerdo con las Figuras 5a y 5b, el rendimiento del biodiésel disminuye en las siguientes circunstancias: una baja proporción molar de metanol-aceite, donde la escasez de metanol provoca una conversión incompleta; y una alta proporción molar de metanol-aceite, en la que el exceso de metanol diluye la concentración de NaOH e incrementa la cantidad de glicerina, favoreciendo la reacción inversa de transesterificación. Según la Figura 5a, el rendimiento también disminuye en estos casos: baja concentración de NaOH, ya que la falta de este compuesto no favorece la transesterificación, y por una alta concentración de NaOH, que promueve la formación de jabón debido al exceso de NaOH. Según la Figura 5b, el rendimiento se ve afectado por una baja temperatura, que no favorece la transesterificación, y por una alta temperatura, que provoca la evaporación del metanol, reduciendo su disponibilidad para reaccionar con los triglicéridos y el NaOH. Asimismo, según la Figura 5a, el máximo rendimiento de biodiésel (95.3%) se alcanza bajo las siguientes condiciones: una proporción molar de metanol a aceite de 9:1 y una concentración de NaOH del 1.25%. Según la Figura 5b, el máximo rendimiento de biodiésel (95.3%) se logra bajo las siguientes condiciones: una proporción molar de metanol a aceite de 9:1 y una temperatura de 55 °C.

La Figura 6a muestra cómo la proporción molar de metanol-aceite y el tiempo afectan el rendimiento a una concentración de NaOH del 1.25% y 55 °C. Por otro lado, la Figura 6b muestra el efecto de la concentración de NaOH y la temperatura sobre el rendimiento, manteniendo una proporción molar de metanol-aceite de 9:1 durante 60 minutos.

### Figura 6

*Superficie respuesta del rendimiento en proporción a las variables del proceso: (a) proporción molar metanol-aceite y el tiempo, (b) concentración de NaOH y la temperatura*



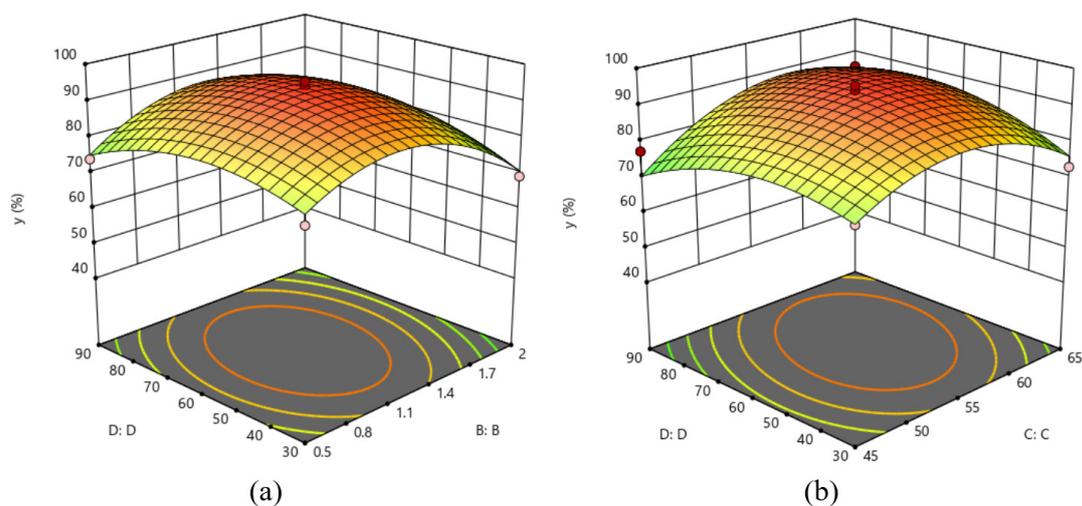
Según la Figura 6a, el rendimiento del biodiésel disminuye en las siguientes condiciones: un período de tiempo breve, que no permite completar la transesterificación, y un período de tiempo prolongado, que favorece la reacción inversa de transesterificación. Según la Figura 6b, el rendimiento también se ve afectado en estos casos: baja concentración de NaOH, donde la falta de este compuesto no favorece

la transesterificación, y alta concentración de NaOH, que promueve la formación de jabón debido al exceso de NaOH. Además, según la Figura 6b, el rendimiento se ve afectado por: baja temperatura, que no favorece la transesterificación, y una alta temperatura, que provoca la evaporación del metanol y reduce su disponibilidad para reaccionar con los triglicéridos y el NaOH. Asimismo, de acuerdo con la Figura 6a, el máximo rendimiento de biodiésel (95.3%) se obtiene bajo las siguientes condiciones: una proporción molar de metanol a aceite de 9:1 y un tiempo de reacción de 60 minutos. Según la Figura 6b, el máximo rendimiento de biodiésel (95.3%) se alcanza con una concentración de NaOH del 1.25% y una temperatura de 55 °C.

La Figura 7a muestra cómo la concentración de NaOH y el tiempo afectan el rendimiento a una proporción molar de metanol-aceite de 9:1 y 55 °C. Por otro lado, la Figura 7b muestra el efecto de la temperatura y el tiempo sobre el rendimiento, manteniendo la misma proporción molar de metanol-aceite de 9:1 y una concentración de NaOH del 1.25%.

### Figura 7

*Superficie respuesta del rendimiento proporción a las variables del proceso: (a) concentración de NaOH y el tiempo, (b) temperatura y el tiempo*



Según la Figura 7a, el rendimiento disminuye en los siguientes casos: una baja concentración de NaOH, donde la falta de este compuesto no favorece la transesterificación, y una alta concentración de NaOH, que promueve la formación de jabón debido al exceso de NaOH. Según la Figura 7b, el rendimiento se ve afectado por una baja temperatura, que no favorece la transesterificación, y una alta temperatura, que provoca la evaporación del metanol y reduce su disponibilidad para reaccionar con los triglicéridos y el NaOH. Finalmente, tanto en las Figuras 7a como 7b, el rendimiento disminuye cuando el tiempo de reacción es demasiado breve, lo que impide completar la transesterificación, o demasiado prolongado, lo que favorece la reacción inversa de transesterificación. Asimismo, de acuerdo con la Figura 7a, el máximo rendimiento de biodiésel (95.3%) se obtiene con una concentración de NaOH del 1.25% y un tiempo de reacción de 60 minutos. Según la Figura 7b, el máximo rendimiento de biodiésel (95.3%) se logra con una temperatura de 55 °C y un tiempo de reacción de 60 minutos.

De acuerdo con la Tabla 5, las mejores condiciones de los parámetros del proceso para producir biodiésel, utilizando el modelo de regresión (2), fueron: proporción molar de metanol-aceite, 9; concentración de NaOH, 1.21%; temperatura, 57 °C; y tiempo, 62 minutos a una frecuencia de agitación de 700 rpm, logrando un rendimiento estimado del 94%. Se llevaron a cabo 3 pruebas experimentales adicionales bajo estas condiciones óptimas, obteniendo un rendimiento promedio del 96%, muy cercano al valor óptimo, con un margen de error del 0.15%, considerado aceptable.

**Tabla 5**

*Rendimiento experimental y estimado bajo condiciones óptimas*

Nombre	Unidad	Valor
Proporción molar metanol-aceite	.-	9
Concentración de NaOH	% peso	1.21
Temperatura	°C	57
Tiempo	min	62
Rendimiento predicho	%	94.0
Rendimiento experimental	%	94.6

La Tabla 6 proporciona una comparación entre el rendimiento óptimo de biodiesel en condiciones óptimas en investigaciones anteriores y el presente estudio.

El rendimiento experimental de biodiésel obtenido (94.6%) es comparable con los resultados reportados en estudios previos. Por ejemplo, De la Cruz y Trujillo (2017) reportaron un 87%, Atapour (2014) obtuvo un 92.05%, Ayoola et al. (2016) alcanzaron un 97.7%, Kumar y Prasad (2018) reportaron un 96%, y Rajesh et al. (2019) lograron un 96.23%. Además, es similar al valor reportado por Foroutan et al. (2018), que fue de 85%.

Se analizaron las propiedades fisicoquímicas del biodiésel producido y se compararon con los valores estándar de la ASTM.

**Tabla 6***Análisis del biodiésel producido bajo condiciones óptimas*

Propiedad	Método	Valor ASTM	Valor
Punto de inflamación (°C)	ASTM D93	$\geq 93$	168
Agua y sedimentos (% volumen)	ASTM D2709	$\leq 0.05$	< 0.01
Viscosidad cinemática a 40 °C (mm <sup>2</sup> /s)	ASTM D445	1.9 - 6.0	4.358
Valor ácido (mg KOH/g)	ASTM D664	$\leq 0.50$	0.61
Azufre (mg/kg)	ASTM D5453	$\leq 50$	1.8

Como se puede observar en la Tabla 6, el punto de inflamación, el contenido de agua y sedimentos, la viscosidad cinemática, el índice de acidez y el contenido de azufre del biodiesel producido en condiciones óptimas cumplen con los estándares establecidos por la ASTM D6751. El valor ácido, aunque ligeramente por encima del límite permisible, se atribuyó al almacenamiento prolongado, lo que facilitó la degradación del biodiésel. Se encontró que las propiedades del biodiésel obtenido están en gran medida alineadas con las especificaciones requeridas, lo que sugiere que es adecuado para su uso como combustible alternativo al diésel.

En conclusión, las condiciones óptimas para producir biodiésel económico a partir de aceite usado fueron: una proporción molar de metanol-aceite de 9:1, una concentración de NaOH del 1.21%, una temperatura de 57 °C y un tiempo de 62 minutos a una frecuencia de agitación de 700 rpm. Se obtuvo un rendimiento experimental máximo del 94.6%, lo cual se considera adecuado para la producción de biodiésel.

#### **Declaración de Conflicto de Intereses**

Los autores declaran no presentar ningún tipo de conflicto de intereses.

## Referencias

- Atapour, M., Kariminia, H., & Moslehabadi, P. M. (2014). Optimization of biodiesel production by alkali-catalyzed transesterification of used frying oil. *Process Safety and Environmental Protection*, 92 (2), 179-185. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2012.12.005>
- Ayoola, A. A., Hymore, K. F., & Omonhinmin, C. A. (2016). Optimization of Biodiesel Production from Selected Waste Oils Using Response Surface Methodology. *Biotechnology(Faisalabad)*, 16 (1), 1-9. <https://doi.org/10.3923/biotech.2017.1.9>
- De la cruz, C. J. & Trujillo, C. A. (2017). *Obtención de biodiesel a partir de aceite comestible residual del comedor de la UNAC*. [Tesis de grado, Universidad Nacional del Callao]. Repositorio de tesis de la Universidad Nacional del Callao. <https://hdl.handle.net/20.500.12952/3595>
- Foroutan, R., Esmaeili, H. & Ghyasi, F. (2018). Optimization of Biodiesel Production from Waste Cooking Oil by Alkaline Catalysts. *Journal of Food Technology and Food Chemistry*, 1 (1), 1-7. ISSN: 8118-2641. <https://www.scholarena.com/article/Optimization-of-Biodiesel-Production-from-Waste-Cooking-Oil-by-Alkaline-Catalysts.pdf>
- Hsiao, M., Hou, S., Kuo, J., & Hsieh, P. (2018). Optimized Conversion of Waste Cooking Oil to Biodiesel Using Calcium Methoxide as Catalyst under Homogenizer System Conditions. *Energies*, 11 (10), 2622. <https://doi.org/10.3390/en11102622>
- Kumar, K. V., & Prasad, V. V. S. (2018). Production and characterization of used cooking oil as an alternative fuel: optimization by response surface methodology. *Mathematical Models in Engineering*, 4 (1), 18-28. <https://doi.org/10.21595/mme.2018.19737>
- Rajesh, Y., Kolakoti, A., Sheakar, B. C., & Bhargavi, J. (2019). Optimization of biodiesel production from waste frying palm oil using definitive screening design. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 11 (2), 48-57. <https://doi.org/10.4314/ijest.v11i2.4>
- Singh, G., Jeyaseelan, C., Bandyopadhyay, K. K., & Paul, D. (2018). Comparative analysis of biodiesel produced by acidic transesterification of lipid extracted from oleaginous yeast *Rhodospiridium toruloides*. *3 Biotech*, 8 (10), 434-448. <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1467-9>

- Tanzer, E., Fatih, A., Lacine, A., Huseyinb, B., Faruk, A., Seda, S. & Murat, Y. (2018). Process optimization for biodiesel production from neutralized waste cooking oil and the effect of this biodiesel on engine performance. *T&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 8 (1), 121-127. <https://doi.org/10.29047/01225383.99>
- Zavaleta, L. N. & Suavo, J. P. A. (2016). Obtención de biodiesel por transesterificación alcalina a partir de aceites vegetales residual en Lima. *Tecnia*, 26 (1), 107-114. <https://doi.org/10.21754/tecnia.v26i1.116>