

## Síntesis de biodiésel mediante transesterificación del aceite de girasol con óxido de calcio y etanol

### Biodiesel synthesis via transesterification of sunflower Oil using calcium oxide and ethanol

Gonzalo Benito Perez Serrudo <sup>2</sup> • Jose Manuel Diaz Jiron <sup>1</sup> • Valeria Karla Garnica-Campos <sup>1</sup>✉ • Francisco Caba <sup>3</sup>

Recibido: 17 Julio 2025 / Revisado: 16 Septiembre 2025 / Aceptado: 4 Octubre 2025 / Publicado: 7 Noviembre 2025

#### Resumen

El biodiésel producido por la transesterificación de triglicéridos con alcohol es considerado un combustible de transición que ha captado el interés de numerosos investigadores debido a las múltiples ventajas relacionadas con su aplicación. Es por ello que una metodología de superficie de respuesta, basada en un diseño central compuesto en las caras de tres niveles y una variable de respuesta, se empleó para analizar el efecto de la interacción de las variables de la reacción de transesterificación de aceite crudo de girasol, como la temperatura, la relación molar de etanol a aceite y la concentración del catalizador sobre el rendimiento de biodiésel. La caracterización de la materia prima involucrada en la reacción se encontró dentro de los parámetros de referencia, indicando su idoneidad para la transesterificación. De la misma forma, con lo que respecta a la caracterización del catalizador, este revela que la cal apagada puede

Gonzalo Benito Perez Serrudo

<https://orcid.org/0000-0003-0468-0050>

Jose Manuel Diaz Jiron

<https://orcid.org/0009-0006-7221-4421>

Francisco Caba

<https://orcid.org/0009-0001-7938-4574>

✉ Valeria Karla Garnica - Campos / [garnica.valeria@usfx.bo](mailto:garnica.valeria@usfx.bo)  
<https://orcid.org/0009-0003-8421-0848>

- 1 Universidad Mayor Real y Pontificia San Francisco Xavier de Chuquisaca, Facultad de Ciencias y Tecnología. Ingeniería Química. Centro de investigación y desarrollo de procesos químicos (CIDEPROQ).
- 2 Universidad Mayor Real y Pontificia San Francisco Xavier de Chuquisaca, Facultad de Ciencias y Tecnología. Ingeniería en Industrias Alimentarias.
- 3 Universidad Mayor Real y Pontificia San Francisco Xavier de Chuquisaca, Facultad de Ciencias y Tecnología. Instituto de Tecnología de Alimentos (ITA).

activarse mediante calcinación para transformar los carbonatos y los hidratos de calcio en formas de óxido para dar lugar a un catalizador económico y reutilizable. El máximo rendimiento alcanzado fue igual a 91.86%, que fue obtenido con una temperatura de 70°C, una relación molar etanol-aceite de 20:1 y una concentración de catalizador de 15% p/p, revelando la gran influencia que poseen la temperatura y la relación molar en la reacción catalítica, pero al optimizar las condiciones de operación subiendo la relación molar a 30:1, se pueden alcanzar rendimientos cercanos al 98.24%.

**Palabras claves:** Biocombustible, Concentración de catalizador, Ester étilico, Rendimiento, Superficie de respuesta.

## Abstract

Biodiesel produced by the transesterification of triglycerides with alcohol is considered a transition fuel that has captured the interest of numerous researchers due to the multiple advantages related to its application. For this reason, a response surface methodology, using a central composite on face-centered design with three levels and one response variable was employed to analyze the effect of the interaction among the factors involved in the transesterification of crude sunflower oil, such as temperature, molar ratio of ethanol to sunflower oil and catalyst concentration on biodiesel yield. The characterization of the raw material involved in the reaction was found to be within the reference parameters, indicating its suitability for transesterification. Furthermore, the characterization of the catalyst, revealed that lime can be activated by calcination to transform calcium carbonates and calcium hydrates into oxide forms to give rise to an economical and reusable catalyst. The maximum yield obtained was 91.86%, achieved at a temperature of 70°C, an ethanol-oil molar ratio of 20:1 and a catalyst concentration of 15% w/w, revealing the great influence that temperature and the molar ratio have in the catalytic reaction, but by optimizing the operating conditions by raising the molar ratio to 30:1, yields close to 98.24% can be achieved.

**Keywords:** Biofuel, Catalyst concentration, Ethyl ester, Yield, Response surface.

## Introducción

El crecimiento de la población mundial, que se incrementará en casi 2000 millones de personas en los próximos 30 años, impulsa la demanda energética global y refuerza la dependencia del petróleo, un recurso no renovable altamente explotado y con elevados niveles de emisiones de gases de efecto invernadero (Díaz-Arias, 2022).

Ante este panorama, los biocombustibles vegetales son una alternativa prometedora para reducir el impacto ambiental de las actividades humanas y reemplazar el uso de combustibles fósiles (Cruel Preciado & Vernaza Arroyo, 2022). La creciente urbanización, el desarrollo industrial, las regulaciones ambientales y la preocupación ecológica impulsan particularmente el uso del biodiésel como opción sostenible. (Ellappan & Rajendran, 2021)

Según Kober et al. (2020) para 2060 se proyectan distintos escenarios de consumo energético; uno de ellos plantea la cooperación internacional entre gobiernos para avanzar hacia la sostenibilidad, donde el consumo energético global se distribuiría en un 60% proveniente de fuentes renovables, un 13% de energía nuclear y un 27% de combustibles fósiles.

El biodiésel, derivado de biomasa, se presenta como una fuente de energía renovable y sostenible. Su producción puede contribuir a mitigar los desechos ambientales, ya que contiene oxígeno y nitrógeno y carece de azufre, por lo que genera residuos mínimos en comparación con el diésel fósil (Mahlia et al., 2020). Los análisis de ciclo de vida muestran que su huella de carbono depende del tipo de materia prima y de las prácticas agrícolas empleadas, siendo menor cuando se utilizan cultivos gestionados bajo esquemas de baja emisión (Xu et al., 2022).

El biodiésel según las especificaciones de la American Society for Testing and Material Standard (A.S.T.M., 2023) se describe como ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga, derivados de aceites vegetales o grasas animales. Este mismo se obtiene por transesterificación, donde un aceite vegetal o grasa animal reacciona con alcohol (metanol o etanol) y un catalizador, produciendo ésteres de ácidos grasos y glicerina como subproducto. (Pérez-Bravo et al., 2022)

Bolivia produce una variedad de oleaginosas, donde destacan la soya y el girasol, que para una producción del año agrícola del 2021 alcanzó

un total de 192,306.00 toneladas métricas de girasol, siendo superada solo por la soya con una producción de 3,318,169.00 toneladas métricas. (Saavedra Yujra, 2023). Sin embargo, el 92% del aceite de girasol se exporta en estado bruto y solo un 8% como refinado (I.B.C.E., 2023), lo que evidencia una oportunidad de generar valor agregado transformándolo en biodiésel.

Diversos estudios respaldan el potencial del aceite de girasol como materia prima. İlgen (2022) reportó un 82% de contenido en ésteres metílicos empleando óxido de calcio soportado con óxido de zinc, mientras que Todorović et al. (2019) demostraron que el rendimiento mejora al añadir biodiésel crudo a la reacción.

El óxido de calcio (CaO), además de ser económico y eficiente, destaca por su carácter respetuoso con el medioambiente y se ha consolidado como catalizador heterogéneo viable (Almadani et al., 2023). (Zul et al., 2021) corroboraron rendimientos cercanos al 90% utilizando CaO obtenido de cal en relación a distintas fuentes, concluyendo que la temperatura es el factor más influyente en la reacción, seguido de la relación molar y la concentración del catalizador.

En este contexto, el objetivo de esta investigación fue producir biodiésel a partir de aceite crudo de girasol, una fuente poco explorada para este tipo de procesos, mediante la reacción de transesterificación con etanol y con un catalizador de bajo costo, evaluando el efecto de variables como la temperatura, la relación molar etanol-aceite y la concentración de catalizador.

## **Materiales y métodos**

### **Acondicionamiento de materias primas**

**Preparación y caracterización de aceite desgomado:** La materia prima para la síntesis de biodiésel fue proporcionada por la empresa

ALICORP (NIT 1023233029), que donó aceite crudo de girasol, no apto para consumo humano. Para el proceso de desgomado, se colocaron 1000 g de aceite en un matraz Erlenmeyer y se adicionó un 3% de agua destilada, respecto de la masa del aceite, manteniendo una agitación constante a 65 °C durante 1 hora. Finalizado este tiempo, la mezcla fue centrifugada a 2400 rpm durante 10 minutos, según el procedimiento descrito por Lamas et al. (2016). Posteriormente, se filtró la fase resultante para eliminar los fosfolípidos solubles. El aceite desgomado fue caracterizado conforme a las normas técnicas bolivianas vigentes, determinando los siguientes parámetros: densidad (NB 34021), contenido de humedad (NB 34010), índice de saponificación (NB 34005), índice de refracción (NB 34003), índice de acidez y porcentaje de ácidos grasos libres (NB 34004). Los procedimientos se realizaron por duplicado para cada parámetro.

**Preparación del etanol anhidro:** El etanol (95%) de las marcas Caimán y Ceibo empleado en la reacción de transesterificación fue deshidratado mediante tamices moleculares durante 14 días, alcanzando una pureza del 97.5% y una densidad de 0.803 g/ml.

**Preparación del catalizador:** Para la obtención del catalizador, se utilizó hidróxido de calcio  $[Ca(OH)_2]$  procedente de cal comercial, una materia prima económica, accesible y reutilizable. Este compuesto fue activado térmicamente para obtener óxido de calcio (CaO), de acuerdo con el procedimiento reportado por (Roschat et al., 2016). La calcinación del  $Ca(OH)_2$  se realizó en una mufla (marca Nobertherm) a 800 °C durante 3 horas. Posterior a la activación, el catalizador fue almacenado en un desecador con suficiente desecante, siguiendo las recomendaciones de (Mazaheri et al., 2021), para evitar su desactivación por absorción de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) atmosférico, principal causante de pérdida de actividad catalítica.

## Reacción catalítica

La reacción catalítica se realizó en un reactor tipo *batch* de 3L (balón de fondo plano) acoplado a un sistema de reflujo para evitar la pérdida de etanol por evaporación. La mezcla de aceite, etanol y catalizador fue calentada mediante una manta calefactora con agitación magnética. Se utilizó un agitador magnético de 5 cm a 600 rpm durante 3 horas, en similitud al trabajo realizado por Roschat et al. (2016). La temperatura se controló mediante un termómetro interno para condiciones de 50°C y 60°C, mientras que para reacciones a 70°C se empleó un reflujo tipo serpiente con sensor de temperatura.

Finalizada la reacción, la mezcla fue filtrada al vacío para separar la fase sólida (catalizador) de la fase líquida. La fracción líquida se sometió a centrifugación (centrífuga Centurion, 4000 rpm, 20 min) para facilitar la separación entre biodiésel, glicerina y restos de catalizador. Las fases fueron extraídas mediante pipetas y almacenadas en embudos de decantación.

El catalizador recuperado de los filtros y tubos de centrifugación fue secado en hornilla eléctrica para eliminar residuos orgánicos, obteniéndose una masa sólida seca. Esta se pulverizó, se calcinó a 800°C durante 3 horas y posteriormente se pesó para su reutilización.

La recuperación del etanol presente en el biodiésel y la glicerina se llevó a cabo mediante un rotaevaporador. Posteriormente, el biodiésel fue lavado con agua destilada a 40°C, empleando un volumen de agua igual al del biodiésel, utilizando un embudo de decantación para eliminar impurezas y residuos de etanol.

## Caracterización del biodiésel

Para la caracterización del biodiésel obtenido, se envió una muestra al Laboratorio de Química Avanzada en La Paz, Bolivia, donde se realizó un

análisis mediante cromatografía de gases para la identificación del contenido de ésteres etílicos del biodiésel.

La viscosidad cinemática se determinó por duplicado utilizando un viscosímetro de Ostwald, marca Koehler, tamaño 100, con una constante de calibración de 0.1469 (mm<sup>2</sup>/s)/s, a temperatura controlada. Para este viscosímetro que se emplea para la siguiente fórmula:

$$v=C*t$$

Donde “C” representa la constante de calibración y “t” es el tiempo en segundos, donde en este caso el tiempo fue igual a: 4 minutos con 38 segundos.

La densidad se midió por duplicado mediante un picnómetro de vidrio de 25 mL, el cual fue llenado con biodiésel. Posteriormente, se determinó la masa del volumen conocido, siguiendo el procedimiento estándar para este tipo de medición.

## Diseño experimental

Para el estudio de la síntesis de biodiésel a partir de aceite de girasol crudo, se empleó la metodología de superficie de respuesta con un diseño experimental de tipo central compuesto en las caras mediante el software *Design Expert* versión 13. Este enfoque permite explorar de manera sistemática la influencia de los factores que son la temperatura, la relación molar etanol: aceite y la concentración de catalizador.

El diseño experimental está comprendido por 8 puntos factoriales, 6 axiales y 6 puntos centrales, donde la rotabilidad ( $\alpha = (2^k)^{1/4}$ ) en el caso del presente proyecto es igual a 1, dando lugar a 3 niveles con 3 factores, como se muestra en la tabla 1.

Se incluyeron seis réplicas en el punto central para estimar el error puro y evaluar la repetibilidad del sistema, garantizando la validez estadística del diseño.

**Tabla 1. Variables independientes para el diseño Central compuesto en las caras**

Variables	Símbolo	Niveles		
		-1	0	1
Temperatura (°C)	A	50	60	70
Relación molar etanol : aceite (mol)	B	10	20	30
Concentración de catalizador (%p/p)	C	5	15	25

## Resultados

### Caracterización del aceite desgomado

El aceite desgomado fue caracterizado según las normas técnicas bolivianas vigentes. Los

resultados obtenidos se resumen en la Tabla 2, evidenciando que el aceite presenta propiedades adecuadas para su uso como materia prima en la producción de biodiésel.

**Tabla 2. Caracterización del aceite crudo de girasol desgomado**

Análisis	unidades	Valor registrado	Referencia
Índice de acidez	mg KOH/g de aceite	1.4875	0.615-1.5 <sup>a</sup>
Porcentaje de ácidos grasos libres	%	0.577	0.31-0.60 <sup>a</sup>
Viscosidad	cSt	39.46	34.5 <sup>b</sup>
Densidad	g/ml	0.91748	0.92-0.1 <sup>c</sup>
Humedad	% p/p	0.18	0.1 ± 0.02 <sup>a</sup>
Índice de refracción	ND 40 <sup>e</sup>	1.4728	1.461-1.468 <sup>b</sup>
Índice de saponificación	mg KOH/g de aceite	196.166	188-197 <sup>b</sup>
Peso Molecular	g/mol	285.2639	-

<sup>a</sup>(Baldovino, 2022); <sup>b</sup>(Codex, 1999); <sup>c</sup> (Machate et al., 2022)

## Rendimiento de la reacción

El rendimiento óptimo obtenido fue igual a 91.86 % a una temperatura de 70°C, una relación molar de 20:1 y una concentración de catalizador igual a 15% p/p, también se obtuvo un rendimiento mínimo de 22.26%, como se puede observar en la tabla 3.

**Tabla 3. Resultados del rendimiento de reacción**

Corrida	Factor 1 A: Temperatura (°C)	Factor 2 B: Relación Molar	Factor 3 C: % Catalizador (%p/p)	Respuesta % Rendimiento
1	50	10	25	27.99
2	60	20	5	64.99
3	60	10	15	59.24
4	60	20	15	74.51
5	60	20	15	77.63
6	60	20	15	76.34
7	50	30	5	31.08
8	70	30	25	88.41
9	60	30	15	80.29
10	50	10	5	22.26*
11	70	10	25	50.57
12	50	20	15	48.57
13	60	20	25	68.86
14	60	20	15	72.15
15	50	30	25	39.89
16	60	20	15	79.89
17	70	10	5	52.91
18	70	20	15	91.86**
19	70	30	5	83.73
20	60	20	15	78.04

\*Rendimiento mínimo, \*\*Rendimiento óptimo.

Se empleó un Diseño Compuesto Central en las Caras (CCF) para la metodología de Superficie de Respuesta, para optimizar la información obtenida con un número limitado de corridas experimentales. En este contexto, se incluyeron seis réplicas en el punto central, cuya finalidad fue estimar el error puro y evaluar la repetibilidad del sistema, brindando un control

estadístico más sólido que la duplicación sistemática de todas las corridas.

El Análisis de Varianza (ANOVA) confirmó la validez del modelo, mostrando alta significancia global ( $p < 0.0001$ ). La prueba de falta de ajuste resultó no significativa ( $p = 0.7496$ ), lo que indica que las discrepancias entre valores observados y predichos corresponden al error experimental.

Asimismo, los indicadores de ajuste refuerzan esta conclusión:  $R^2 = 0.993$ ,  $R^2$  ajustado = 0.9867 y  $R^2$  predicho = 0.9753, con un coeficiente de variación (3.8%) y desviación estándar (2.41) que validan la precisión en los resultados.

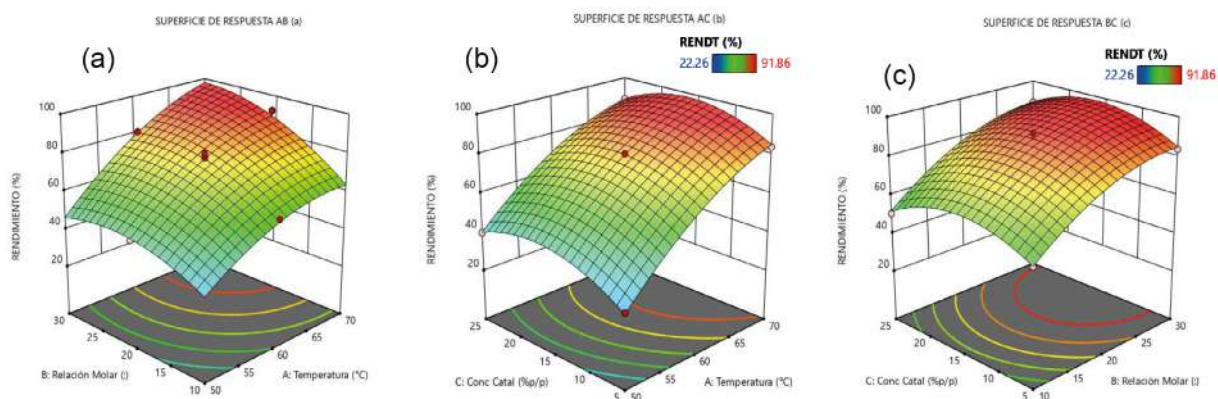
La temperatura y la relación molar fueron los factores más influyentes en el rendimiento de la reacción, mientras que la concentración de catalizador mostró un efecto menor y limitado a un punto óptimo. Entre las interacciones dobles, solo la combinación temperatura-relación molar fue significativa, en tanto que las interacciones restantes y los términos cuadráticos no tuvieron un impacto relevante, lo que indica independencia de esos factores en el rango estudiado.

### Superficies de respuesta

Las superficies de respuestas que se muestran

en la figura 1, que exhiben el porcentaje de rendimiento en función de los factores, donde en (a), la concentración de catalizador es constante con un valor de 15% p/p, y se observa el comportamiento de la temperatura junto con la relación molar, es muy influyente en la variable de respuesta, donde se nota que el rendimiento es directamente proporcional a la temperatura y a la relación molar. Por otro lado, en (b), donde la relación molar es constante con 30:1, se ve esa influencia que tiene la temperatura en el rendimiento, pero la concentración de catalizador exhibe un comportamiento en el cual con cargas de catalizador del 5% o 25% se presentan rendimientos bajos, pero solo para el 15% hay buenos rendimientos. Una tendencia similar se observa en (c), donde a 70°C se obtienen rendimientos elevados en general.

**Figura 1. Interacción de los factores experimentales en función del rendimiento a) Superficie de respuesta variables AB. b) Superficie de respuesta variables AC. c) Superficie de respuesta variables BC**



En la Figura 1a, con una concentración de catalizador fija del 15% p/p, se observa que tanto la temperatura como la relación molar influyen positivamente en el rendimiento. A mayores valores de ambos factores, el rendimiento aumenta de forma proporcional.

En la Figura 1b, manteniendo constante la relación molar en 30:1, la temperatura continúa mostrando una influencia positiva, mientras que la concentración de catalizador presenta un comportamiento no lineal. Se evidencian bajos rendimientos con concentraciones de 5% y 25%, siendo el 15% la condición óptima.

Finalmente, en la Figura 1c, con la temperatura fija en 70°C, se confirma que los mejores rendimientos se alcanzan cuando la concentración de catalizador está en torno al 15% p/p, independientemente de la relación molar.

### Optimización de las condiciones de operación

La figura 2a permite comparar los efectos de todos los factores en el diseño experimental.

Una mayor pendiente indica una mayor sensibilidad de la respuesta al cambio en ese factor, mientras que una línea plana refleja escasa o nula influencia.

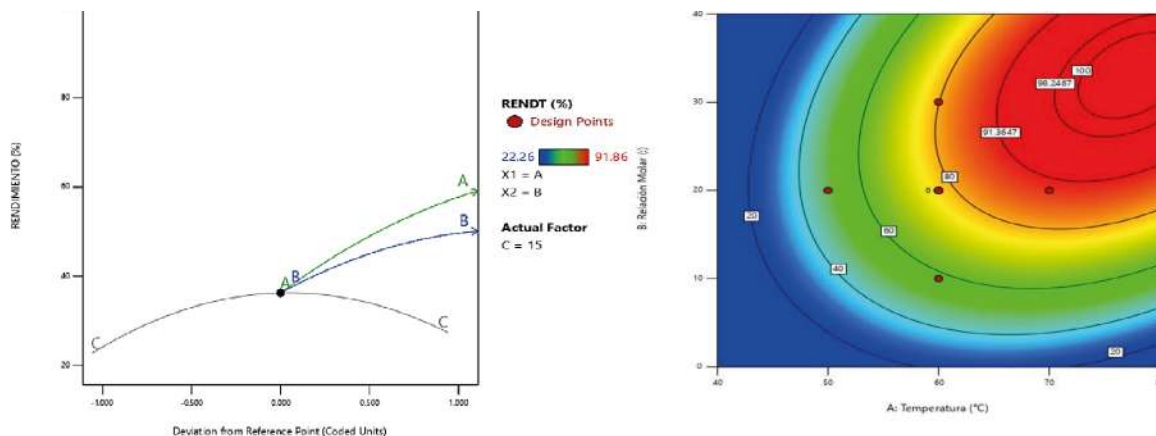
En este estudio, la temperatura (A) es el factor que más afecta el rendimiento de la reacción, seguida por la relación molar etanol-aceite (B).

La concentración de catalizador (C) presenta una influencia menor, mostrando rendimientos óptimos únicamente alrededor del 15% p/p, mientras que concentraciones del 5% o 25% p/p resultan en menores rendimientos.

La Figura 2b muestra la variación del rendimiento con una concentración de catalizador constante de 15% p/p, evaluando el efecto combinado de la temperatura y la relación molar etanol-aceite. Como se evidenció en la figura 2a, esta concentración de catalizador es óptima para maximizar el rendimiento.

El modelo predice un rendimiento máximo de 98.2467% bajo condiciones de alta temperatura (70°C) y elevada relación molar (30:1), pero concentraciones de catalizador moderadas (15% p/p.)

Figura 2. a) Gráfica de perturbación de los factores. b) Diagrama de contorno de las condiciones de operación optimizadas.

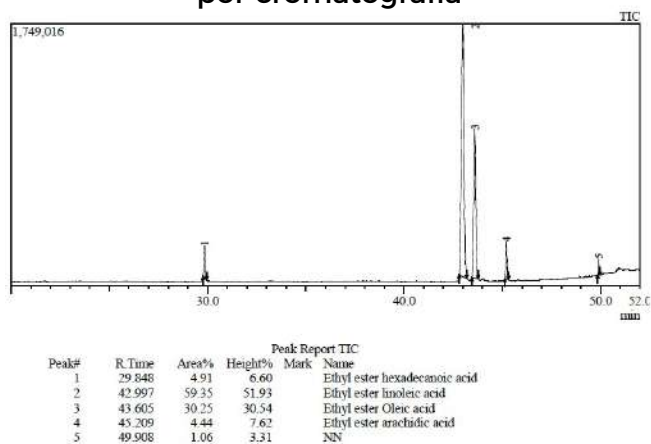




## Caracterización del biodiésel

Los resultados del análisis mediante cromatografía de gases para la identificación de componentes están presentados en la Figura 5 e indican que los principales componentes son el éster etílico del ácido linoleico y el éster etílico del ácido oleico. También se identificaron en menor proporción el éster etílico del ácido hexadecanoico (palmítico) y el éster etílico del ácido araquídico. El compuesto minoritario (NN) fue identificado como Panaxydol.

**Figura 3. Determinación de componentes por cromatografía**



Se determinó una densidad de  $875.15 \text{ kg/m}^3$  que se encuentra dentro del parámetro de referencia de la norma EN 14214, y la viscosidad, cuyo valor es de  $4.084 \text{ mm}^2/\text{s}$ , entra dentro del rango de  $3.5 \text{ mm}^2/\text{s} - 5.0 \text{ mm}^2/\text{s}$  según lo establece la norma.

## Discusión

Los resultados obtenidos en la caracterización del aceite de girasol desgomado indican que este presenta propiedades fisicoquímicas adecuadas para su empleo como materia prima en la producción de biodiésel. El bajo contenido de humedad (0.18% p/p) y de ácidos grasos libres (0.577%) sugiere una menor probabilidad de formación de jabones

durante la transesterificación, lo cual favorece la eficiencia del proceso. Esta condición resultó relevante, ya que niveles elevados de humedad o acidez pueden comprometer significativamente el rendimiento de la conversión (Agila Tufino et al., 2024). Asimismo, el índice de acidez (1.4875 mg KOH/g) coincide con valores reportados para aceites desmogados adecuados en la síntesis de biodiésel (Adekunle et al., 2016).

En cuanto al rendimiento de la reacción, se observó un rendimiento máximo de 91.86%, resultado que concuerda con lo reportado por Abdel-Rahman et al. (2017) bajo condiciones de  $70^\circ\text{C}$ , una relación molar etanol-aceite de 20:1 y una concentración de catalizador del 15% p/p. Este resultado evidencia que la combinación de temperaturas elevadas y una alta proporción molar favorece la conversión de triglicéridos en ésteres etílicos, como también lo señalan Monika et al. (2023), debido al incremento en la frecuencia de colisiones efectivas entre reactivos y al desplazamiento del equilibrio químico hacia la formación del producto.

Se predice alcanzar un rendimiento cercano al 98,24% mediante el aumento de la relación molar etanol-aceite a 30:1 y sugiere la existencia de un margen adicional de mejora mediante la optimización de las condiciones operativas.

El análisis estadístico mediante ANOVA demostró la significancia del modelo cuadrático ( $p < 0.0001$ ), lo que valida el diseño experimental utilizado.

Entre las variables estudiadas, la temperatura (A) y la relación molar etanol-aceite (B) fueron los factores más influyentes en el rendimiento, mientras que la concentración de catalizador (C) mostró un efecto menor. Esto puede atribuirse a que, más allá de un punto óptimo, el exceso de catalizador no mejora significativamente la conversión y podría incluso disminuir el rendimiento debido a problemas de mezcla (Ílgen, 2022).

La única interacción significativa entre factores

fue la de temperatura y relación molar (AB), lo que indica que su efecto combinado es relevante para maximizar el rendimiento (Manojkumar et al., 2022), a diferencia de las interacciones AC y BC, que no resultaron significativas.

Las superficies de respuesta y los gráficos de perturbación respaldan estas conclusiones, evidenciando que un aumento simultáneo de la temperatura y la relación molar favorece el incremento del rendimiento, siempre que la concentración de catalizador se mantenga en torno al 15% p/p. A concentraciones inferiores o superiores, se observa una disminución en el rendimiento (İlgen, 2022), lo cual resalta la importancia de mantener este parámetro dentro de un rango óptimo. Esta tendencia podría estar relacionada con la solubilidad limitada del catalizador y la posible formación de emulsiones en exceso, factores que afectan negativamente la eficiencia del proceso de transesterificación.

La caracterización del biodiésel obtenido mostró una composición mayoritaria de ésteres etílicos de ácidos grasos insaturados, lo cual es coherente con su estructura química, compuesta principalmente por ésteres metílicos o etílicos (Mazaheri et al., 2021).

Destacándose el ácido linoleico (-50%) y el ácido oleico (-30%). Esta distribución es coherente con el perfil lipídico característico del aceite de girasol, tal como lo reporta El-Gendy et al. (2014), donde el ácido linoleico se presenta en mayor proporción. Esta composición confiere al biodiésel propiedades favorables, como una buena fluidez a bajas temperaturas y una combustión más limpia; sin embargo, también puede comprometer su estabilidad oxidativa debido al alto grado de insaturación.

Tanto la viscosidad cinemática (4.084 mm<sup>2</sup>/s) como la densidad (0.87515 g/mL) del biodiésel se encuentran dentro de los rangos especificados por la norma EN 14214. Además, la viscosidad coincide con los valores reportados por Kocakulak (2021) indicando que el producto cumple con los

requerimientos internacionales de calidad para su uso como biocombustible.

En conjunto, los resultados obtenidos confirman que el aceite de girasol desgomado puede ser una materia prima viable para la producción de biodiésel de alta calidad, siempre que se apliquen condiciones óptimas de reacción. Sin embargo, se reconocen algunas limitaciones en este estudio. En primer lugar, la estabilidad de almacenamiento del biodiésel no fue evaluada en profundidad, y debido a la elevada insaturación del aceite de girasol, existe una mayor susceptibilidad a procesos de oxidación y formación de ácido. Además, la investigación se llevó a cabo a escala de laboratorio, lo que hace necesario un posterior escalado y una evaluación económico-operativa en planta piloto.

Finalmente, ciertos parámetros relacionados con la transferencia de masa y la molienda del catalizador, como el tamaño de partícula y el área superficial, no fueron objeto de variación en este estudio, aunque podrían influir de manera importante en la optimización final del rendimiento y la eficiencia del proceso.

Se concluye que se obtuvo biodiésel a partir de aceite crudo de girasol usando etanol y óxido de calcio como catalizador, con un rendimiento máximo de 91.86% bajo condiciones óptimas (70°C, relación molar 20:1 y 15% de catalizador), confirmando al aceite de girasol como materia prima viable y el óxido de calcio utilizado como catalizador resultó ser una alternativa eficiente, económica y sustentable. La temperatura fue el factor más influyente, seguida de la relación molar. El análisis cromatográfico confirmó una alta proporción de ésteres etílicos, especialmente de ácido linoleico, respaldando la calidad del biocombustible. El diseño experimental permitió identificar los factores clave como base para futuras investigaciones.

## Agradecimientos

Los autores del presente trabajo agradecen a la

Dirección de Investigación, Ciencia y Tecnología de la Universidad San Francisco Xavier por el financiamiento del trabajo mediante los proyectos semilla, así como se agradece enormemente a la empresa ALICORP por donar la materia prima para la reacción catalítica.

## Bibliografía

Abdel-Rahman, Z. A., Wiheeb, A. D., & Jumaa, M. M. (2017). Commercial CaO Catalyzed Biodiesel Production Process.

Adekunle, A. S., Oyekunle, J. A. O., Obisesan, O. R., Ojo, O. S., & Ojo, O. S. (2016). Effects of degumming on biodiesel properties of some non-conventional seedoils. *Energy Reports*, 2, 188-193. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2016.07.001>

Agila Tufino, J. A., Moya Reina, I. A., Segundo García, A. M., & Cevallos Cedeno, R. E. (2024). Obtaining and characterization of biodiesel by transesterification from sunflower oil. *Minerva*, 5(14), 19-28. <https://doi.org/10.47460/minerva.v5i14.160>

Almadani, E. A., Abdelghani, K. A., & Omar, F. A. (2023). Calcium Oxide as an Efficient Heterogeneous Catalyst for Production of Biodiesel. *The Scientific Journal of University of Benghazi*, 36(2). <https://doi.org/10.37376/sjuob.v36i2.4303>

A.S.T.M. (2023). Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels. <https://store.astm.org/d6751-20a.html>

Baldovino Tordecilla, W. G. (2022). Efecto de la fertilización orgánica de lombricompost en las propiedades fisicoquímicas del aceite crudo y torta de girasol *Helianthus annuus*. L. híbrido esbela en Montería-Córdoba. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/4770>

Codex. (1999). Norma para aceites vegetales especificados. Organización mundial de la salud.

Cruel Preciado, M., & Vernaza Arroyo, G. D. (2022). Uso de biocombustibles en Ecuador: Una

mirada desde la protección de los derechos de la naturaleza. *Revista Venezolana de Gerencia*, 27(7), Article 7. <https://doi.org/10.52080/rvgluz.27.7.31>

Díaz-Arias, A.-A. (2022). Biogás: Una fuente de energía para las generaciones futuras en la era post-petrolera. *Agroindustria, Sociedad y Ambiente*, 2, 104-122. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7365402>

El-Gendy, N. Sh., Abu Amr, S. S., & Aziz, H. A. (2014). The Optimization of Biodiesel Production from Waste Frying Sunflower Oil Using a Heterogeneous Catalyst. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 36(15), 1615-1625. <https://doi.org/10.1080/15567036.2014.890977>

Ellappan, S., & Rajendran, S. (2021). A comparative review of performance and emission characteristics of diesel engine using eucalyptus-biodiesel blend. *Fuel*, 284, 118925. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118925>

I.B.C.E. (2023). Bolivia: Exportación de aceite de girasol. IBCE CIFRAS. <https://ibce.org.bo/publicaciones-ibcecifras-pdf.php?id=1109>

Ilgen, O. (2022). Study on Kinetics and Reaction Parameters of Biodiesel Production from Sunflower Oil and Methanol Using Zinc Oxide Supported Calcium Oxide. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 66(2), Article 2. <https://doi.org/10.3311/PPch.19198>

Kober, T., Schiffer, H.-W., Densing, M., & Panos, E. (2020). Global energy perspectives to 2060 – WEC's World Energy Scenarios 2019. *Energy Strategy Reviews*, 31, 100523. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100523>

Kocakulak, M. B.-S. K.-T. (2021). Response Surface Method Based Optimization of the Viscosity of Waste Cooking Oil Biodiesel. *Engineering Perspective*, 1(1), 30-37. <https://doi.org/10.29228/sciperspective.49697>

Lamas, D. L., Constenla, D. T., & Raab, D. (2016). Effect of degumming process on physicochemical properties of sunflower oil. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 6, 138-143. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2016.03.007>

- Machate, D. J., Melo, E. S. P., Oliveira, L. C. S. D., Bogó, D., Michels, F. S., Pott, A., Cavalheiro, L. F., Guimarães, R. D. C. A., Freitas, K. D. C., Hiane, P. A., Caires, A. R. L., Vilela, M. L. B., Oliveira, R. J., & Nascimento, V. A. D. (2022). Oxidative stability and elemental analysis of sunflower (*Helianthus annuus*) edible oil produced in Brazil using a domestic extraction machine. *Frontiers in Nutrition*, 9, 977813. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.977813>
- Mahlia, T. M. I., Syazmi, Z. A. H. S., Mofijur, M., Abas, A. E. P., Bilad, M. R., Ong, H. C., & Silitonga, A. S. (2020). Patent landscape review on biodiesel production: Technology updates. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 118, 109526. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109526>
- Manojkumar, N., Muthukumar, C., & Sharmila, G. (2022). A comprehensive review on the application of response surface methodology for optimization of biodiesel production using different oil sources. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 34(3), 198-208. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.09.012>
- Mazaheri, H., Ong, H. C., Amini, Z., Masjuki, H. H., Mofijur, M., Su, C. H., Anjum Badruddin, I., & Khan, T. M. Y. (2021). An Overview of Biodiesel Production via Calcium Oxide Based Catalysts: Current State and Perspective. *Energies*, 14(13), 3950. <https://doi.org/10.3390/en14133950>
- Monika, Banga, S., & Pathak, V. V. (2023). Biodiesel production from waste cooking oil: A comprehensive review on the application of heterogeneous catalysts. *Energy Nexus*, 10, 100209. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100209>
- Pérez-Bravo, S. G., Aguilera-Vázquez, L., Castañeda-Chávez, M. D. R., & 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*, 25. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.481>
- Roschat, W., Siritanon, T., Yoosuk, B., & Promarak, V. (2016). Biodiesel production from palm oil using hydrated lime-derived CaO as a low-cost basic heterogeneous catalyst. *Energy Conversion and Management*, 108, 459-467. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.11.036>
- Saavedra Yujra, C. J. (2023). Estudio de las especificaciones técnicas de calidad de un diesel renovable obtenido a partir de aceite vegetal crudo bajo la Tecnología HVO en Bolivia. [Thesis]. <https://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/32836>
- Todorović, Z. B., Troter, D. Z., Đokić-Stojanović, D. R., Veličković, A. V., Avramović, J. M., Stamenković, O. S., Veselinović, L. M., & Veljković, V. B. (2019). Optimization of CaO-catalyzed sunflower oil methanolysis with crude biodiesel as a cosolvent. *Fuel*, 237, 903-910. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.10.056>
- Xu, H., Ou, L., Li, Y., Hawkins, T. R., & Wang, M. (2022). Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Biodiesel and Renewable Diesel Production in the United States. *Environmental Science & Technology*, 56(12), 7512-7521. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c00289>
- Zul, N. A., Ganesan, S., Hamidon, T. S., Oh, W.-D., & Hussin, M. H. (2021). A review on the utilization of calcium oxide as a base catalyst in biodiesel production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105741. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105741>