

Tecnologías para la producción de biodiesel: materias primas y catalizadores

Technologies for biodiesel production: raw materials and catalysts.

Gloria María Aponte Figueroa
Universidad Católica Andrés Bello, Venezuela.
<https://orcid.org/0000-0002-1029-8264>
gapontef@ucab.edu.ve

Palabras claves: biodiesel, catalizadores, tecnologías, investigación y desarrollo, materias primas. **Recibido:** 11 de enero de 2026

Keywords: Biodiesel, catalyst, technology, research and development, feedstocks **Aceptado:** 09 de abril de 2026

RESUMEN

El presente trabajo analiza las tendencias tecnológicas y de mercado en la producción de biodiésel, justificándose en la urgente necesidad de fuentes energéticas sostenibles ante el agotamiento de los combustibles fósiles. El objetivo principal es identificar el posicionamiento de la comunidad científica y el desarrollo de innovaciones en materias primas y catalizadores durante el periodo 2016-2025. La metodología empleada consistió en una vigilancia tecnológica y un análisis bibliométrico utilizando la base de datos Lens.org, evaluando las publicaciones científicas y solicitudes de patentes a nivel mundial. Los resultados revelan un dominio absoluto de China en el desarrollo de tecnologías (53% de las patentes), mientras que la India lidera la producción académica. Se observa una transición hacia materias primas de segunda generación, como aceites usados de cocina y microbios, debido a su viabilidad económica y circular. Las principales conclusiones destacan que, aunque la catálisis homogénea es predominante por su bajo costo inicial, la investigación actual se orienta hacia sistemas heterogéneos y enzimáticos para mejorar la sostenibilidad operativa. Finalmente, se proyecta un mercado global en expansión, aunque con una tendencia hacia la autosuficiencia regional impulsada por políticas de descarbonización local.

ABSTRACT

This paper analyzes technological and market trends in biodiesel production, justified by the urgent need for sustainable energy sources in the face of fossil fuel depletion. The main objective is to identify the positioning of the scientific community and the development of innovations in feedstocks and catalysts during the 2016-2025 period. The methodology employed consisted of technological monitoring and bibliometric analysis using the Lens.org database, evaluating scientific publications and patent applications worldwide. The results reveal an absolute dominance by China in technology development, accounting for 53% of patents, while India leads in academic production. A transition toward second-generation feedstocks, such as waste cooking oils and microbes, is observed due to their economic and circular viability. The main conclusions highlight that although homogeneous catalysis remains predominant due to its low initial cost, current research is shifting toward heterogeneous and enzymatic systems to improve operational sustainability. Finally, a global market expansion is projected, albeit with a trend toward regional self-sufficiency driven by local decarbonization policies.

INTRODUCCIÓN

La demanda mundial de energía sigue dependiendo principalmente de los combustibles fósiles convencionales. Con el continuo crecimiento del consumo energético y la disminución de las reservas de combustibles fósiles, la seguridad energética se ha convertido en un problema cada vez más importante (Akubude, et al., 2019). Además del rápido agotamiento de estos recursos, la combustión de combustibles fósiles emite grandes cantidades de contaminantes y gases de efecto invernadero, como dióxido de



carbono (CO₂), hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO), óxido de nitrógeno (NO_x) y material particulado (PM), que contribuyen con el cambio climático global y provocan un aumento de la contaminación ambiental (Cako, et al., 2022; Goh, et al., 2020).

Según las proyecciones del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), si las emisiones globales de gases de efecto invernadero siguen aumentando, se espera que la temperatura global promedio aumente en más de 2 °C para 2050, lo que representa graves amenazas para los ecosistemas y la sociedad (Panahi, et al., 2024). En vista del agotamiento gradual de las reservas de combustibles fósiles y sus impactos ambientales adversos, el desarrollo de combustibles alternativos renovables, limpios y eficientes se ha convertido en un foco crítico de la investigación energética global (Muhammad, et al., 2025). Los gobiernos e instituciones de investigación en todo el mundo están promoviendo activamente el desarrollo de fuentes de energía renovables, como la solar, la eólica, la hidroeléctrica, la geotérmica y la biomasa, que gradualmente se están convirtiendo en componentes clave de la futura combinación energética (Razzak, et al., 2025).

En este contexto, el biodiésel se ha convertido en un combustible renovable prometedor debido a su amplia disponibilidad, respeto al medio ambiente, biodegradabilidad, bajas emisiones de azufre y alta eficiencia de combustión, mostrando un gran potencial como sustituto del diésel convencional (Gadore, et al., 2024, Bashir, et al., 2022, Arslan, et al. 2022). El biodiésel no solo reduce la dependencia de los combustibles fósiles, sino que también reduce eficazmente las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, puede utilizarse directamente en los motores diésel existentes sin necesidad de modificaciones significativas, lo que lo convierte en una de las alternativas limpias más prometedoras al combustible diésel (Akram, et al., 2025).

A nivel mundial, los gobiernos promueven activamente la producción y el uso de biodiésel mediante la introducción de diversas políticas de incentivos, como la Directiva de Energías Renovables (RED) de la Unión Europea, el Estándar de Combustibles Renovables (RFS) de los Estados Unidos y el programa de promoción del biodiésel de la India. Todas estas políticas han contribuido a la expansión del mercado del biodiésel. El mercado mundial del biodiésel ha experimentado un rápido crecimiento. Las estadísticas muestran que la producción mundial de biodiésel fue de tan solo 15 000 barriles en el año 2000, pero aumentó a 289 000 barriles en 2020 y se proyecta que alcance los 41 400 millones de litros en 2025 (Akande, et al., 2025). Entre ellos, la Unión Europea y Estados Unidos son los mayores productores y consumidores de biodiésel, mientras que economías emergentes como la India, China y Brasil también experimentan un aumento continuo de la demanda de biodiésel.

El biodiésel se produce típicamente mediante una reacción de transesterificación, en la que aceites vegetales, grasas animales o aceites usados reaccionan con alcoholes (usualmente metanol o etanol) en presencia de un catalizador para generar ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) y glicerol (Adamu, et al., 2023). Este proceso está influenciado por varios factores, incluyendo la composición de las materias primas, el tipo de catalizador, las condiciones de reacción y los procedimientos de postratamiento (Jayabal, 2024). Entre estos factores, la elección de la materia prima juega un papel crucial en la determinación de los costos de producción, la calidad del combustible y la sostenibilidad. Las materias primas tradicionales para producir biodiésel consisten principalmente en aceites vegetales como el aceite de soja, el aceite de palma y el aceite de colza. Sin embargo, su aplicación a gran escala puede conducir a la escasez de alimentos y a la ocupación de tierras agrícolas, ya que estos aceites compiten con los cultivos alimentarios (Prajapati, et al., 2025, Powar, et al., 2022). En los últimos años, los investigadores han centrado su atención en materias primas más económicas y sostenibles, como el aceite de cocina usado, el aceite de microalgas, las grasas animales y los aceites vegetales no comestibles (Jayabal, 2024). Los aceites usados han despertado un gran interés debido a su bajo coste y sus beneficios ambientales. Sin embargo, su alto contenido de impurezas y su elevado índice de acidez pueden provocar la formación de jabones como subproducto durante el proceso de transesterificación.

Por lo tanto, a menudo se requieren etapas de pretratamiento como la desacidificación, la deshidratación y la eliminación de impurezas. El aceite de microalgas, como fuente eficiente de energía de biomasa, no

solo ofrece un rendimiento de aceite notablemente alto, sino que también absorbe dióxido de carbono (CO₂) mediante la fotosíntesis, reduciendo así las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, puede utilizar gases de escape industriales como medio de crecimiento, lo que lo convierte en una de las materias primas de biodiésel más prometedoras para el futuro (Prajapati, et al., 2025, Powar, et al., 2022).

En los procesos de producción de biodiesel, la elección del catalizador juega un papel decisivo en la reacción de transesterificación, afectando directamente la tasa de conversión, el tiempo de reacción, el consumo de energía y la calidad del biodiésel resultante. Actualmente, los catalizadores comúnmente utilizados incluyen catalizadores homogéneos (como catalizadores alcalinos NaOH y KOH, y catalizadores ácidos H₂SO₄ y HCl), catalizadores heterogéneos (como óxidos metálicos y catalizadores ácido-base sólidos) y catalizadores enzimáticos (como lipasas) (Anil, et al., 2024). La producción de biodiésel se ve influenciada por múltiples factores, como la relación molar alcohol-aceite, la temperatura de reacción, la concentración del catalizador, la velocidad de agitación y el tiempo de reacción (Andreo- Martínez, 2022; Saksono et al., 2021).

En este estudio se presenta un análisis sobre las principales tendencias a nivel de las tecnologías para producir el biodiesel y algunas tendencias globales de mercado con la finalidad de conocer el posicionamiento de la comunidad científica internacional en cuanto al interés en desarrollar investigación y desarrollo tecnológico en el área mediante el análisis de la literatura científica publicada y las solicitudes de patentes durante el periodo 2016-2025 a nivel mundial.

El aporte de este estudio se fundamenta en la necesidad crítica de abordar el agotamiento de los combustibles fósiles y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero mediante el desarrollo de alternativas energéticas renovables y eficientes. Desde el punto de vista teórico, el estudio aporta una síntesis acerca del posicionamiento de la comunidad científica internacional y la evolución de las tendencias en investigación académica frente al desarrollo de tecnologías protegidas por patentes entre 2016 y 2025 en la producción de biodiesel. El estudio sistematiza la transición del conocimiento desde materias primas de primera generación hacia fuentes de segunda y tercera generación, como aceites usados y microbios, aportando una base teórica sobre la viabilidad de la economía circular en el sector energético. Por otra parte, el estudio ofrece una hoja de ruta para la industria y los tomadores de decisiones al revelar que el liderazgo tecnológico está concentrado en China (53% de las patentes), lo que permite evaluar la competitividad regional. Además, analiza la eficiencia operativa de diversos sistemas catalíticos, destacando la necesidad de transitar hacia catálisis heterogéneas y enzimáticas para reducir costos operativos y el impacto ambiental de los residuos industriales.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y descriptivo, empleando la técnica de vigilancia tecnológica y análisis bibliométrico para evaluar el estado del arte y las tendencias en la producción de biodiésel. El procedimiento se estructuró en las siguientes fases:

Fuentes de Información y herramientas

Se utilizó la base de datos Lens.org, como fuente principal de recolección de datos, que indiza literatura científica y patentes de invención publicadas por las principales oficinas de patentes del mundo. Para las proyecciones de mercado y contexto regulatorio, se consultaron informes especializados de la OECD/FAO (2023) y reportes de la industria como Fortune Business Insights.

Parámetros de Búsqueda, Muestreo criterios de inclusión y exclusión

Periodo de estudio: Se analizó la evolución de la producción científica y tecnológica durante el intervalo comprendido entre 2016 y 2025. Se restringió solo a los artículos y conferencias publicadas en el idioma inglés y en el caso de las patentes solo a las solicitudes publicadas a nivel mundial indicadas en la base de datos Lens.org. Se excluyeron los artículos publicados en otros idiomas y los documentos de patentes otorgados.

Estrategia de búsqueda

La búsqueda se centró en términos clave como "biodiesel", "catalizadores", "tecnologías", "investigación y desarrollo" y "materias primas". Se utilizaron los campos de búsqueda: Título, resumen, campo de estudio y palabras clave en el caso de la literatura abierta; mientras que en las patentes se utilizaron: Título, Resumen y Reivindicaciones (Claims). De los resultados obtenidos se filtraron solo los documentos relacionados con el tema de investigación mediante una evaluación de los títulos en el programa Excel, eliminado aquellos repetidos y los no relevantes.

Categorización

Los datos se segmentaron en cuatro categorías principales de materias primas (microalgas, aceites vegetales, residuos de cocina y microbios) y cuatro tipos de catalizadores (homogéneos, heterogéneos, biocatalizadores y nanocatalizadores).

Procesamiento y Análisis de Datos

Análisis de Tendencias: Se evaluó la evolución temporal de las publicaciones académicas frente a las solicitudes de patentes para identificar el nivel de madurez tecnológica.

Análisis Geográfico e Institucional: Se identificaron los países y organizaciones líderes en el desarrollo de innovaciones, destacando la participación de regiones como China, India, Estados Unidos y Latinoamérica.

Comparativa Técnica: Se realizó una síntesis cualitativa de los retos y oportunidades mediante la comparación de parámetros de reacción, costos y sostenibilidad ambiental de las tecnologías identificadas.

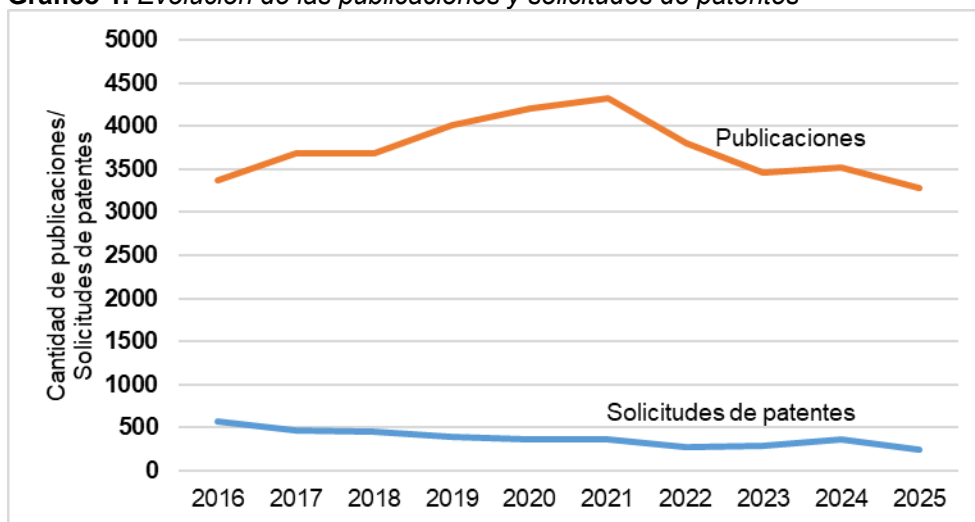
Para el análisis de detalle de las características, retos y oportunidades se seleccionaron los *paper* con información más relevante relacionados con los catalizadores y materias primas.

Los posibles sesgos y limitaciones del estudio están enmarcados en el análisis bibliométrico, ya que este presenta limitaciones inherentes, como la discrepancia observada entre la alta producción académica frente a la baja tasa de patentamiento, lo que puede reflejar barreras de mercado no capturadas por la base de datos. Asimismo, existe un posible sesgo geográfico debido al dominio absoluto de China en las solicitudes de patentes, lo que podría influir en las tendencias globales de propiedad intelectual reportadas. El estudio también se limita a solicitudes de patentes publicadas, excluyendo patentes concedidas publicadas en el periodo, lo cual puede influir en las tendencias de los desarrollos tecnológicos.

RESULTADOS

La comunidad científica y académica a nivel internacional ha estado realizando un esfuerzo sostenido en actividades de investigación y desarrollo en el área de tecnologías para la producción de biodiesel, tal como lo demuestra las publicaciones científicas cuya evolución presenta una tendencia creciente hasta en el 2021 que luego tiende a disminuir hasta el 2025; mientras que, con respecto al desarrollo de tecnologías la evolución de las solicitudes de patentes se mantiene con una tendencia ligeramente decreciente durante casi todo el periodo (ver Gráfico 1); así como también se observa un menor esfuerzo en el desarrollo de tecnologías (solicitudes de patentes) comparado con las investigaciones académicas (artículos científicos).

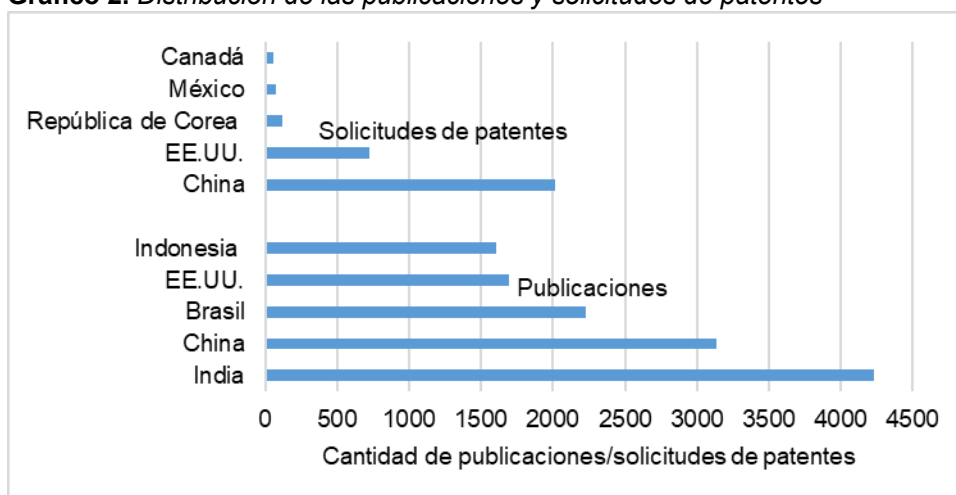
Gráfico 1. Evolución de las publicaciones y solicitudes de patentes



Nota. elaborado con la data obtenida de la base de datos Lens.org (2025)

Con respecto a la distribución por regiones del esfuerzo de investigación realizado en el área durante el periodo de estudio, se observa que la India lidera con la mayor cantidad de publicaciones, seguida de China y Brasil ocupa el tercer lugar; mientras que en el desarrollo de tecnologías está liderado completamente por China con el 53% y Estados Unidos ocupa el segundo lugar con apenas el 19% (ver Gráfico 2).

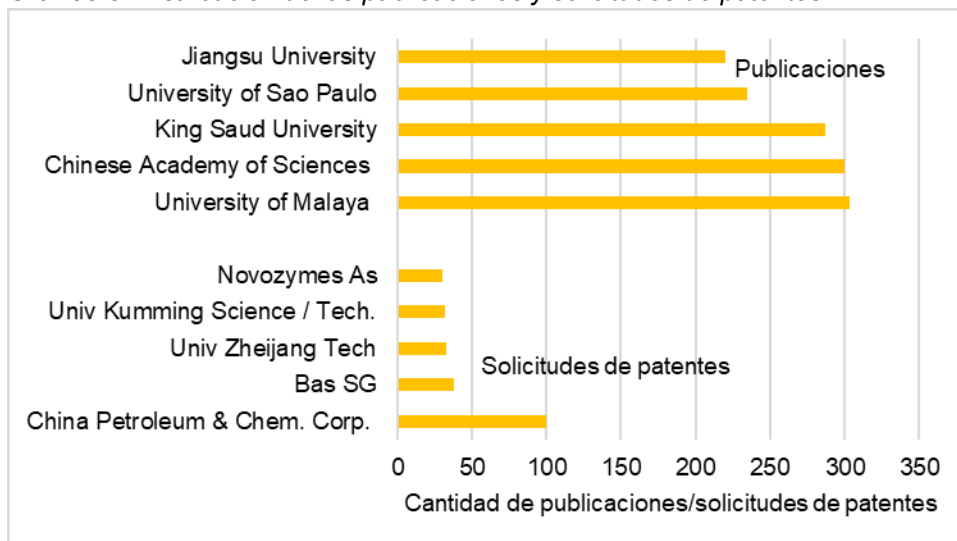
Gráfico 2. Distribución de las publicaciones y solicitudes de patentes



Nota. elaborado con la data obtenida de la base de datos Lens.org (2025)

Por otra parte, en cuanto a las principales instituciones que están trabajando en el área, se observa que la empresa China Petroleum lidera en el desarrollo de tecnologías con la mayor cantidad de solicitudes de patentes, mientras que en cuanto a las publicaciones no existe un liderazgo específico por alguna institución (ver Gráfico 3); es importante mencionar la presencia de una universidad de Latinoamérica (Universidad de Sao Paulo, Brasil).

Gráfico 3. Distribución de las publicaciones y solicitudes de patentes



Nota. elaborado con la data obtenida de la base de datos Lens.org (2025)

El biodiésel, derivado de recursos biológicos renovables, se ha convertido en una alternativa prometedora al diésel convencional gracias a sus beneficios ambientales y su biodegradabilidad. Las técnicas de producción de biodiésel han evolucionado significativamente, buscando una mayor eficiencia y sostenibilidad. La creciente demanda de producción de biodiésel ha puesto de relieve la necesidad de materias primas sostenibles y rentables. Si bien los aceites comestibles, como el de soja y el de palma, se han utilizado tradicionalmente, su competencia con los recursos alimentarios plantea un desafío significativo. En consecuencia, se ha priorizado el uso de aceites no comestibles y materias primas de desecho como alternativas viables. Estas opciones ofrecen beneficios económicos y ambientales al aprovechar recursos infraexplotados y reducir los residuos (Baskar & Aiswaryam, 2016). Un análisis comparativo de aceites no comestibles y aceites usados revela que ambas opciones tienen ventajas únicas. Los aceites no comestibles proporcionan una cadena de suministro estable para la producción de biodiésel, mientras que los aceites usados ofrecen importantes ahorros de costos y beneficios ambientales; en la Tabla 1 se muestran las principales diferencias entre ambos tipos de fuentes de materia prima. La selección de materias primas a menudo depende de la disponibilidad regional y de consideraciones económicas (Muthukumarán, Mohan & Ganesan, 2015).

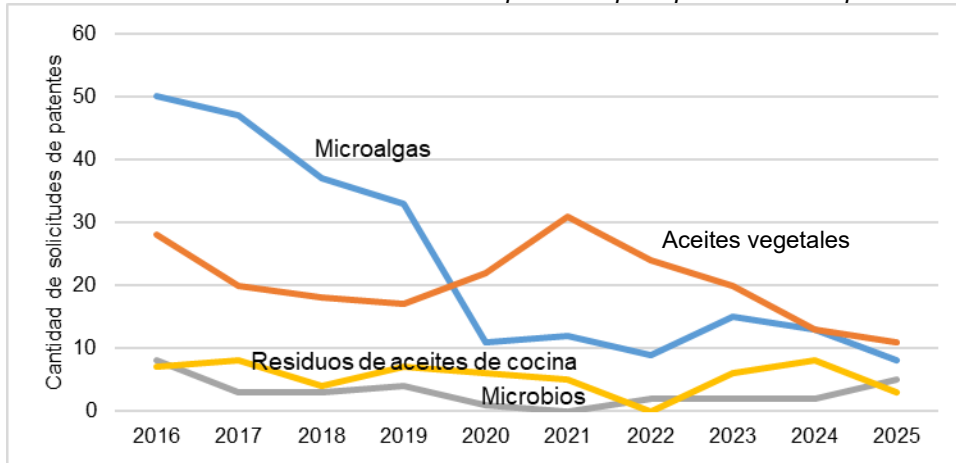
Tabla 1. Materias primas para producir biodiesel: principales diferencias

	Aceite comestible	Aceite no comestible
Fuente	Fuentes vegetales (granos oleaginosos y frutos de plantas)	Aceites vegetales, aceites de petróleo o grasas animales
Uso	Consumo humano directo como ingesta alimentaria	Se utiliza para producir detergentes, pinturas, jabones, combustibles, biocombustibles
Composición	Los aceites comestibles tienen muchos elementos nutricionales	Los aceites no comestibles no son saludables ni adecuados para el consumo humano
Extracción de aceite	La extracción de petróleo generalmente no requiere ningún tratamiento químico	Se requieren diferentes tratamientos químicos para extraer el aceite
Precio	Alto	Bajo
Tipo de aceite	Tales como: soja, girasol, colza, linaza, cártamo, cacahuete	Tales como: ricino, jojoba, aceite de cocina usado y sebo animal

Nota. Banković-Ilić, Stamenković, and Veljković (2012), Balat, (2011).

El desarrollo de tecnologías relacionadas con el tipo de materias primas para producir el biodiesel se puede representar en cuatro opciones, principalmente: el uso de microalgas, aceites vegetales, residuos de aceites de cocina y microbios. El uso de las microalgas y de los aceites como materias primas ha dejado de representar un interés para la comunidad científica en cuanto al desarrollo o mejoras de nuevas tecnologías tal como lo evidencia la tendencia decreciente que presentan las solicitudes de patentes en el periodo de estudio; mientras que las investigaciones relacionadas con el uso de materias primas como el aceite usado de cocina y los microbios, aunque las investigaciones se muestran incipientes y con poco desarrollo, su evolución se muestra constante; así lo evidencian las solicitudes de patentes publicadas en el periodo de estudio (ver Gráfico 4).

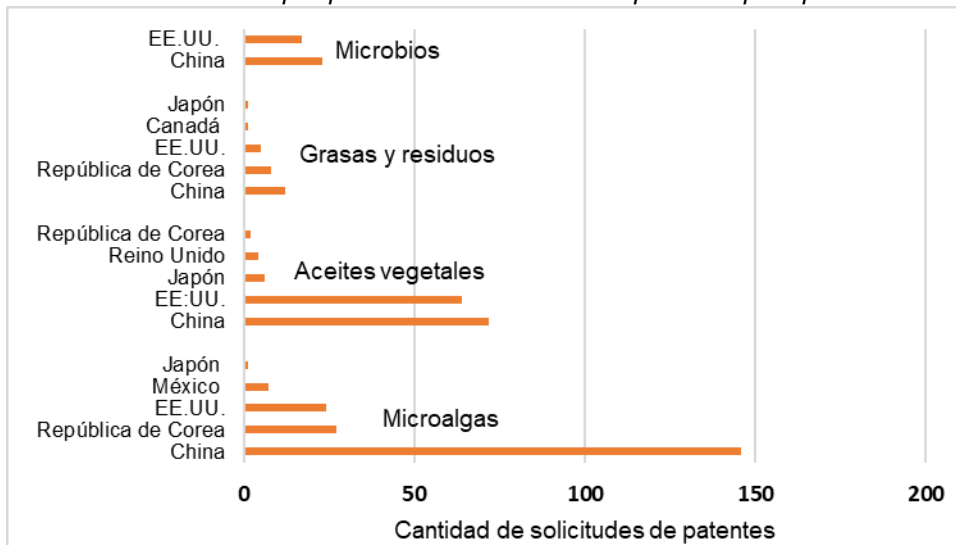
Gráfico 4. Evolución de las solicitudes de patentes por tipo de materia prima



Nota. elaborado con la data obtenida de la base de datos Lens.org (2025)

En cuanto al liderazgo regional, se observa un liderazgo absoluto de China en todo el espectro del desarrollo de tecnologías relacionadas con el uso de las principales materias primas para producir el biodiesel (ver Gráfico 5).

Gráfico 5. Distribución por país de las solicitudes de patentes por tipo de materia prima.



Nota. elaborado con la data obtenida de la base de datos Lens.org (2025)

Materias primas: principales retos y oportunidades

Entre los principales retos y oportunidades que presentan las materias para producir biodiesel son los siguientes:

Aceites Comestibles: Esta categoría incluye principalmente el aceite de soja, palma, colza y girasol. Son las materias primas más utilizadas debido a su pureza y alto rendimiento lipídico.

Oportunidades: **Simplicidad Química:** Debido a su bajo contenido de ácidos grasos libres y humedad, permiten una transesterificación directa con catalizadores alcalinos homogéneos (como KOH o NaOH), logrando conversiones superiores al 98% en tiempos cortos (Silitonga et al., 2023). **Escalabilidad:** Al ser industrias consolidadas, la logística de suministro está altamente optimizada, lo que garantiza un flujo constante para las biorrefinerías (MBF Group, 2024). **Calidad del Combustible:** Producen un biodiésel con alto índice de cetano y excelente estabilidad oxidativa, cumpliendo fácilmente con las normas internacionales como ASTM D6751 o EN 14214 (Saravanan, et al, 2024).

Retos: **Seguridad Alimentaria:** El principal desafío es el dilema ético y económico de utilizar tierras fértiles para combustible en lugar de alimento, lo que genera una inflación en los precios de la canasta básica (Fortune Business Insights, 2025). **Sostenibilidad Ambiental:** La expansión de monocultivos (especialmente la palma) ha sido señalada como motor de deforestación y pérdida de servicios ecosistémicos en zonas tropicales.

Oportunidades: **Uso de Tierras Marginales:** Plantas como la *Jatropha* pueden prosperar en suelos degradados o con baja pluviosidad, no compitiendo por tierras agrícolas de alta calidad (Jamil, Aziz and Khalid, 2024). **Economía Circular y Costos:** El uso de aceites de cocina usados reduce drásticamente el costo de la materia prima, que representa hasta el 80% del costo operativo, y evita el uso de fuentes hídricas (Silitonga et al., 2023).

Retos: **Pre-tratamiento Obligatorio:** Estos aceites suelen tener altos niveles de ácidos grasos libres. Si se procesan directamente con bases, ocurre una reacción de saponificación (formación de jabón). Por ello, requieren un proceso previo de esterificación ácida (H_2SO_4) para reducir la acidez antes de la transesterificación final (Jamil, Aziz and Khalid, 2024). **Estabilidad Oxidativa:** Algunos aceites no comestibles, debido a su composición química, son más propensos a la oxidación, lo que puede afectar la vida útil de los motores si no se utilizan aditivos antioxidantes.

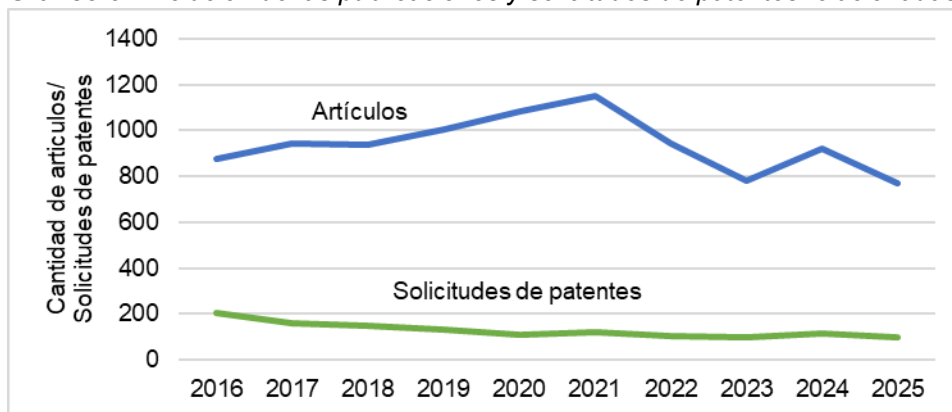
Catalizadores para la producción de biodiesel

La dedicación de la comunidad científica internacional en cuanto a las actividades de investigación y desarrollo en lo relacionado con el desarrollo de nuevos y mejoras de los catalizadores para producir biodiesel muestra una tendencia creciente hasta el año 2021 en cuanto a la publicación de trabajos científicos y luego presenta una tendencia a la baja con un repunte en el año 2024; mientras que con respecto al desarrollo de tecnologías, presenta una tendencia sostenida con una ligera tendencia a la baja (ver Gráfico 6).

Con respecto a la concentración de investigación por países, se observa que a nivel de artículos los países líderes son China y la India, mientras que con respecto a las solicitudes de patentes está liderada completamente por China; seguido en un segundo plano por Estados Unidos (ver Gráfico 7).

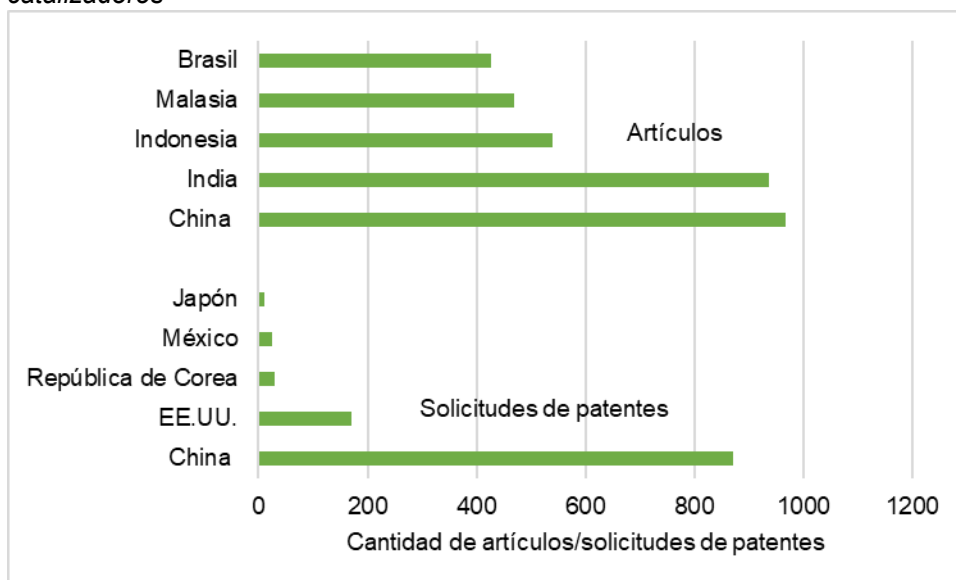
En cuanto a las instituciones/universidades más importantes que han estado realizando investigación en el área, se observa un liderazgo exclusivo por parte de universidades china en cuanto al desarrollo de nuevas mejoras de tecnologías (solicitudes de patentes); mientras que, en la publicación de artículos, las universidades de Malasia tienen mayor participación, aun cuando en los primeros lugares se encuentran universidades de Arabia Saudita y la Academia de Ciencias China (ver Gráfico 8).

Gráfico 6. Evolución de las publicaciones y solicitudes de patentes relacionadas con catalizadores



Nota. elaborado con la data obtenida de la base de datos Lens.org (2025)

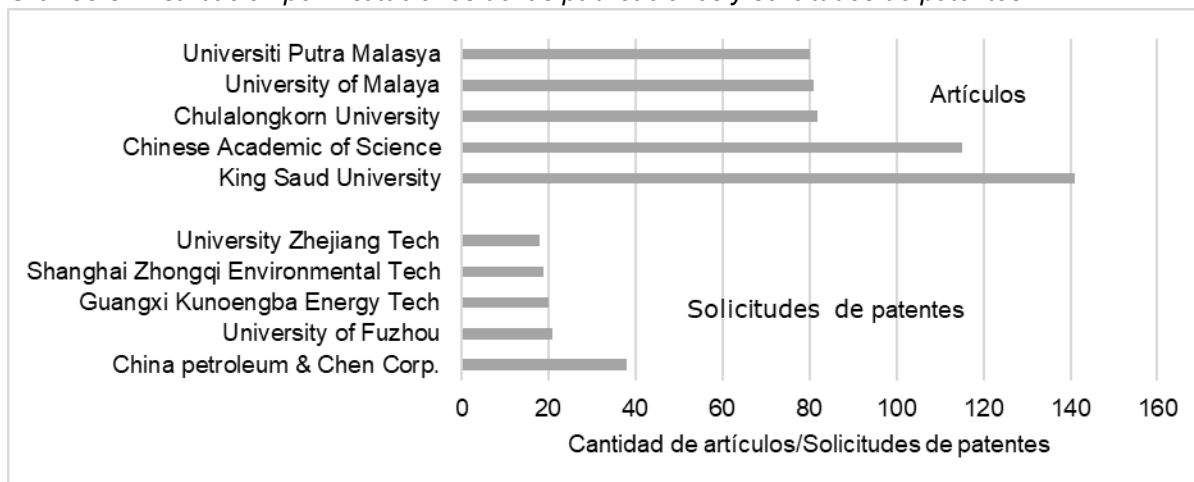
Gráfico 7. Distribución por país de las publicaciones y solicitudes de patentes relacionadas con catalizadores



Nota. elaborado con la data obtenida de la base de datos Lens.org (2025)

Al realizar un análisis más específico sobre los procesos para producir biodiesel con sus diferentes tipos de catalizadores, se observa que el proceso convencional para la producción de biodiésel es la transesterificación o alcoholisis (normalmente denominado metanolisis), mediante la cual los triglicéridos reaccionan con alcoholes (normalmente metanol), en presencia de un catalizador, homogéneo o heterogéneo, como promotor de la reacción, para producir ésteres alquílicos de ácidos grasos [normalmente ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME)] (Mahlia et al., 2020). La transesterificación consiste en varias reacciones consecutivas, reversibles y catalizadas donde los triglicéridos se convierten en diglicéridos, monoglicéridos y, finalmente, en glicerina (también conocida como glicerol) de forma gradual (Ong et al., 2019).

Gráfico 8. Distribución por instituciones de las publicaciones y solicitudes de patentes



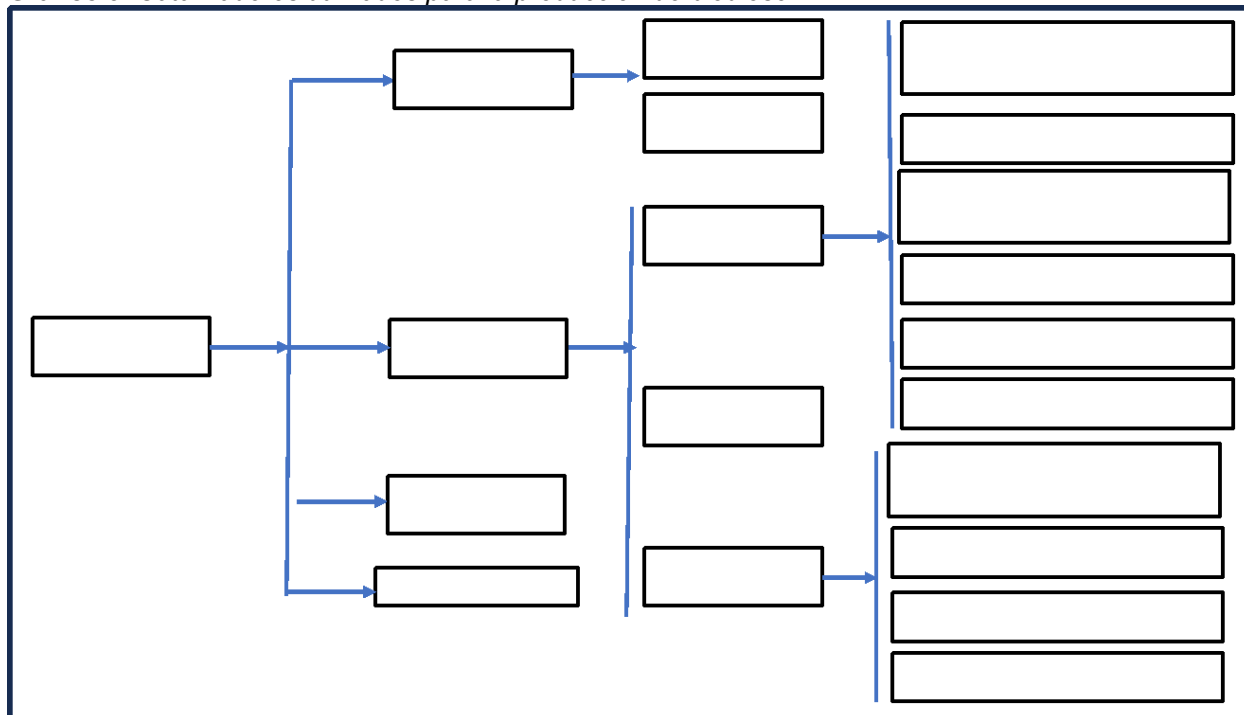
Nota. elaborado con la data obtenida de la base de datos Lens.org (2025)

Generalmente, el biodiésel se produce mediante una reacción de transesterificación de un solo paso, acelerada por catalizadores alcalinos. Sin embargo, dependiendo del contenido de ácidos grasos libres y agua, podría requerirse una reacción de dos pasos, donde la alcoholisis catalizada por ácido, también conocida como esterificación, precede al proceso de transesterificación (Ashraful et al., 2014, Gog, al., 2011).

La presencia de un catalizador aumenta la velocidad de la reacción, incrementando así el rendimiento del producto. Se utilizan diversos catalizadores en el proceso de transesterificación para la producción de biodiésel. Estos catalizadores pueden dividirse en cuatro categorías principales: catalizadores homogéneos, catalizadores heterogéneos, biocatalizadores y nanocatalizadores (Shan et al., 2018; Akubude et al., 2019), que a su vez pueden clasificarse en diferentes subgrupos, tal como se observa en la Gráfico 9.

La producción de biodiésel se basa en la transesterificación de triglicéridos con alcohol para formar ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME). La eficiencia de este proceso depende directamente del sistema catalítico empleado y de su capacidad para manejar impurezas como ácidos grasos libres y humedad. Catalizadores Homogéneos son aquellos que operan en la misma fase líquida que los reactivos. Se dividen en básicos y ácidos. La catálisis básica emplea hidróxidos o metóxidos (NaOH, KOH), mientras que la ácida utiliza principalmente ácido sulfúrico (H₂SO₄) o clorhídrico (HCl) (Rizwanul Fattah et al., 2020).

Algunas de las ventajas que presenta la catálisis básica son: El proceso básico es extremadamente rápido y eficiente, logrando conversiones altas en tiempos cortos (menos de 2 horas). El proceso ácido, aunque más lento, tiene la ventaja de realizar esterificación y transesterificación simultáneamente (Rizwanul Fattah et al., 2020). Entre las desventajas se tiene: El catalizador no puede ser recuperado después de la reacción. Además, en la catálisis básica, si el aceite tiene altos ácidos grasos libres, ocurre la saponificación, lo que genera jabón, reduce el rendimiento y complica la separación del glicerol (Silitonga et al., 2013; Rizwanul Fattah et al., 2020).

Gráfico 9. Catalizadores utilizados para la producción de biodiesel

Nota. Rizwanul Fattah et al.(2020)

Entre los retos y oportunidades se pueden mencionar: El principal reto es la gestión de grandes volúmenes de aguas residuales generadas durante el lavado del biodiésel. La oportunidad reside en su bajo costo inicial para plantas que procesan aceites refinados.

El otro proceso se lleva a cabo con catalizadores heterogéneos (sólidos); estos catalizadores operan en una fase física distinta (sólida) a los reactivos líquidos. Sus características más relevantes Incluyen óxidos metálicos, zeolitas e hidrotalcitas. Destacan los óxidos de metales alcalinotérreos como el CaO (Rizwanul Fattah et al., 2020). Entre las ventajas se tiene que son fácilmente recuperables y reutilizables, lo que reduce los costos operativos a largo plazo. No producen jabones, eliminando la necesidad de etapas de lavado acuoso y permitiendo un proceso más ecológico (Rizwanul Fattah et al., 2020). Con respecto a las desventajas, las más importantes son: La velocidad de reacción es menor debido a limitaciones de transferencia de masa entre las fases. Requieren condiciones de operación más severas (mayores temperaturas y presiones) (Rizwanul Fattah et al., 2020).

Entre los retos y oportunidades de este tipo de procesos se tiene que el reto es la desactivación por lixiviación de los sitios activos. Una gran oportunidad es el uso de catalizadores derivados de desechos biogénicos, como cáscaras de huevo o huesos de animales, integrando la economía circular (Jamil, Aziz and Khalid, 2024).

Otro tipo de catalizadores utilizados son los enzimáticos (Biocatalizadores); que utilizan lipasas para facilitar la transformación química a baja temperatura. Las lipasas pueden ser extracelulares (enzimas purificadas) o intracelulares (células microbianas completas) (Gog et al., 2012; Rizwanul Fattah et al., 2020). Algunas de las ventajas que presentan es que son altamente específicos y operan a condiciones suaves (35–45°C). Son insensibles a los altos niveles de ácidos grasos libres, lo que les permite procesar aceites de desecho sin pre-tratamiento y producir un glicerol de alta pureza (Rizwanul Fattah et al., 2020). Entre las desventajas más importantes se tiene que el costo de las enzimas es elevado y el proceso de reacción es considerablemente más lento (pudiendo durar de 12 a 72 horas). El metanol puede inactivar la enzima si no se añade de forma gradual (Rizwanul Fattah et al., 2020). Algunos de los retos y

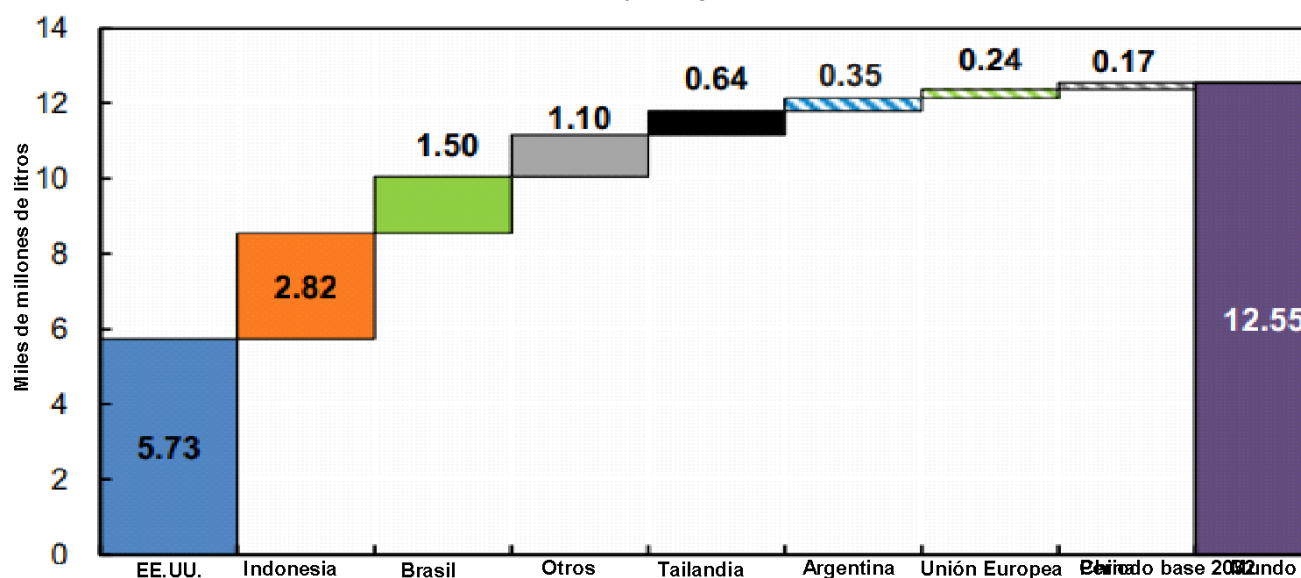
oportunidades: El reto es reducir el costo de producción de lipasas. La oportunidad reside en la inmovilización enzimática para permitir su reutilización masiva (Gog et al., 2012).

Los procesos con reacciones no catalíticas (supercríticas), es otro de los procesos utilizados para producir el biodiesel; este proceso no emplea catalizador, sino que utiliza alcohol en condiciones críticas. Sus características más relevantes es que opera a temperaturas superiores a los 250°C y presiones muy elevadas para que el alcohol actúe como un fluido supercrítico (Rizwanul Fattah et al., 2020). Entre las ventajas que presenta es que es un proceso más versátil, ya que es totalmente inmune a impurezas (agua y ácidos grasos libres). La reacción es extremadamente rápida (minutos) y no requiere pasos de purificación de catalizador (Rizwanul Fattah et al., 2020). Algunas de las desventajas y retos son: El costo energético es muy alto y requiere equipos de seguridad especializados, lo que eleva el riesgo operativo y el costo de capital (Rizwanul Fattah et al., 2020).

Tendencias de mercado global

Las principales proyecciones indican que se proyecta una expansión sustancial del uso del biodiesel, durante la próxima década (ver Gráfico 10). En Estados Unidos, el mayor productor de biocombustibles, se espera que la demanda se mantenga sólida gracias al régimen del Estándar de Combustibles Renovables. Se espera que el biodiésel (incluido el diésel renovable) sea el principal contribuyente al crecimiento mundial, debido al aumento de los objetivos para los programas estatales y federales de combustibles renovables y los créditos fiscales para el diésel proveniente de la biomasa, que se extendieron hasta 2024 en virtud de la Ley de Reducción de la Inflación de 2022.

Gráfico 10. Crecimiento del consumo de biodiesel por regiones



Nota. OECD/FAO (2023)

En la Unión Europea, la RED II (Directiva sobre Energías Renovables) ha clasificado el biodiésel de aceite de palma como una categoría de alto riesgo de ILUC (Cambio Indirecto del Uso de la Tierra) y, como resultado, se espera que su uso disminuya ligeramente, reduciendo así el uso total de biodiésel en la Unión Europea. No obstante, se espera que la proporción del biodiésel en el uso total de diésel aumente durante la próxima década.

Por otra parte, en el mercado canadiense, se proyecta que las regulaciones sobre combustibles limpios duplicarán el consumo de biocombustibles en el 2032, en comparación con la actualidad (OECD/FAO, 2023). Se prevé que la producción de biodiesel siga dependiendo en gran medida de materias primas de primera generación como el aceite vegetal.

Asimismo, se proyecta que la producción de biodiésel a base de aceite de cocina usado cobrará importancia en la Unión Europea, Estados Unidos y Singapur. Los gobiernos han implementado políticas diseñadas principalmente para reducir la huella de carbono nacional, disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y apoyar a los productores agrícolas nacionales. El apoyo a la producción y el uso obligatorio suelen generar mercados nacionales autosuficientes, dejando solo un pequeño mercado internacional. Las perspectivas proyectan que, para 2032, la cantidad de biodiésel comercializada internacionalmente disminuirá del 13 % al 11 % de la producción total (OECD/FAO, 2023). Las mejoras tecnológicas inesperadas, junto con los posibles cambios en las regulaciones gubernamentales, podrían generar variaciones sustanciales en las proyecciones actuales del mercado de biocombustibles.

DISCUSIÓN

El análisis bibliométrico revela una discrepancia significativa entre la generación de conocimiento académico y el desarrollo de tecnologías protegidas. Mientras que las publicaciones científicas mostraron una tendencia creciente hasta 2021, las solicitudes de patentes han mantenido un comportamiento ligeramente decreciente durante la mayor parte del periodo analizado. Este fenómeno sugiere que, aunque el interés científico por optimizar procesos de biodiésel sigue vigente, la madurez tecnológica o las barreras de mercado podrían estar frenando la innovación patentable.

Geográficamente, se observa un dominio asiático. La India lidera en producción científica, pero China domina de manera absoluta el desarrollo tecnológico, concentrando el 53% de las solicitudes de patentes y liderando a través de instituciones como China Petroleum. Este liderazgo es consistente tanto en el desarrollo de materias primas como en catalizadores.

Con respecto a la selección de la materia prima, quién es el factor más crítico en la viabilidad económica, representando hasta el 80% del costo operativo. El estudio identifica una transición necesaria desde aceites comestibles hacia fuentes de segunda y tercera generación. Los aceites Comestibles (1ra Generación): Aunque ofrecen simplicidad química y conversiones superiores al 98%, enfrentan el reto ético de la seguridad alimentaria y la inflación de precios. En relación a los aceites no comestibles y de desecho (2da Generación), el análisis muestra que el interés en microalgas y aceites vegetales convencionales ha decaído en las solicitudes de patentes. En contraste, las investigaciones sobre aceites usados de cocina y microbios se mantienen constantes. Estos últimos ofrecen ventajas de economía circular, aunque requieren pre-tratamientos obligatorios como la esterificación ácida para evitar la saponificación.

Con relación a la eficiencia del proceso de transesterificación depende intrínsecamente del catalizador empleado. Los resultados permiten contrastar las tecnologías actuales de catálisis homogénea, la cual es la más extendida industrialmente por su bajo costo y rapidez (menos de 2 horas). No obstante, su incapacidad de recuperación y la generación de grandes volúmenes de aguas residuales representan desafíos ambientales significativos; mientras que la catálisis heterogénea emerge como una alternativa ecológica al ser catalizadores recuperables y reutilizables. El uso de desechos biogénicos (cáscaras de huevo o huesos) como precursores de estos catalizadores se perfila como una oportunidad clave para integrar la economía circular. Por último, los biocatalizadores (Enzimáticos), que a pesar de operar en condiciones suaves (35–45°C) y ser insensibles a la acidez de la materia prima, el alto costo de las lipasas y los tiempos de reacción prolongados (hasta 72 horas) limitan su adopción masiva.

Por último, con respecto a las proyecciones globales indican que el biodiésel seguirá siendo un pilar de la seguridad energética, impulsado por marcos regulatorios como la Ley de Reducción de la Inflación en EE.UU. y el Estándar de Combustibles Renovables. Sin embargo, se anticipa una disminución del comercio internacional del 13% al 11% para 2032, lo que sugiere una tendencia hacia mercados nacionales autosuficientes y políticas de descarbonización local.

CONCLUSIONES

Liderazgo Tecnológico: La investigación y el desarrollo tecnológico en el sector del biodiésel están fuertemente concentrados en Asia, con China consolidándose como la potencia dominante al concentrar

el 53% de las solicitudes de patentes. Mientras que la India lidera en producción científica académica, China ha logrado traducir con mayor éxito el conocimiento en propiedad intelectual e innovación industrial. Transición de Materias Primas: Existe un cambio estratégico hacia la sostenibilidad y la economía circular, priorizando el uso de aceites de cocina usados, grasas animales y microbios sobre los aceites vegetales comestibles. Esta transición busca resolver el dilema ético de la seguridad alimentaria y reducir el impacto ambiental derivado de los monocultivos de primera generación.

Madurez y Desafíos de los Sistemas Catalíticos: La tecnología de catálisis homogénea sigue siendo la más eficiente en términos de tiempo y costo inicial, pero su incapacidad de recuperación plantea retos ambientales significativos. En contraste, los catalizadores heterogéneos y los biocatalizadores (enzimas) representan el futuro hacia procesos más limpios, aunque requieren superar barreras de costos operativos y limitaciones de transferencia de masa para su escalabilidad masiva.

Tendencias de Mercado y Autosuficiencia: Se proyecta una expansión sustancial en el consumo de biodiésel para la próxima década, impulsada por marcos regulatorios en Estados Unidos y Canadá. Sin embargo, la tendencia hacia políticas de descarbonización nacional está reduciendo el comercio internacional, fomentando la creación de mercados locales autosuficientes que dependen de la biomasa regional.

Hacia una Biorrefinería Sostenible: El estudio confirma que la viabilidad del biodiésel a largo plazo depende de la integración de tecnologías de segunda generación que permitan procesar materias primas de bajo costo y alta acidez sin pre-tratamientos costosos, siendo los nanocatalizadores y la inmovilización enzimática áreas clave para la futura investigación y desarrollo.

REFERENCIAS

- Adamu, H.; Bello, U.; Yuguda, A.U.; Tafida, U.I.; Jalam, A.M.; Sabo, A.; Qamar, M. (2023). Production processes, techno-economic and policy challenges of bioenergy production from fruit and vegetable wastes. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2023, 186, 113686.
- Akande, O.; Okolie, J.A.; Kimera, R.; Ogbaga, C.C. (2025). A Comprehensive Review on Deep Learning Applications in Advancing Biodiesel Feedstock Selection and Production Processes. *Green Energy Intell. Transp.* 2025, 100260.
- Akram, F.; Aslam, H.; Suhail, M.; Fatima, T.; Haq, I.U. (2025). Divulging the future of sustainable energy: Innovations and challenges in algal biodiesel production for green energy. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 2025, 75, 104266
- Akubude, V. C., Nwaigwe, K. N., and Dintwa, E. (2019). Production of biodiesel from microalgae via nanocatalyzed transesterification process: a review. *Mater. Sci. Energy Tech.* 2, 216–225. doi: 10.1016/j.mset.2018.12.006
- Ashraful, A. M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Rizwanul Fattah, I. M., Imtenan, S., Shahir, S. A., et al. (2014). Production and comparison of fuel properties, engine performance, and emission characteristics of biodiesel from various non-edible vegetable oils: a review. *Energy Convers. Manage.* 80, 202–228. doi: 10.1016/j.enconman.2014.01.037
- Arslan, E.; Atelge, M.R.; Kahraman, N.; Ünalan, S. (2022). A study on the effects of nanoparticle addition to a diesel engine operating in dual fuel mode. *Fuel* 2022, 326, 124847.
- Anil, N.; Piyush; Rao, K.; Sarkar, A.; Kubavat, J.; Vadivel, S.; Manwar, N.R.; Paul, B. (2024). Advancements in sustainable biodiesel production: A comprehensive review of bio-waste derived catalysts. *Energy Convers. Manag.* 2024, 318, 118884

- Andreo-Martínez, P.; Ortiz-Martínez, V.M.; Salar-García, M.J.; Veiga-del-Baño, J.M.; Chica, A.; Quesada-Medina, J. (2022). Waste animal fats as feedstock for biodiesel production using non-catalytic supercritical alcohol transesterification: A perspective by the PRISMA methodology. *Energy Sustain. Dev.* 2022, 69, 150–163.
- Balat, M. (2011). Potential alternatives to edible oils for biodiesel production—A review of current work. *Energy conversion and management*, 52(2): p. 1479-92(2011.)
- Banković-Ilić, I.B., O.S. Stamenković, and V.B. Veljković (2012). Biodiesel production from non-edible plant oils. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(6): p. 3621-47(2012.)
- Baskar, G., & Aiswarya, R. (2016). Trends in catalytic production of biodiesel from various feedstocks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 496–504. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.101>
- Bashir, M.A.; Wu, S.; Zhu, J.; Krosuri, A.; Khan, M.U.; Aka, R.J.N. (2022). Recent development of advanced processing technologies for biodiesel production: A critical review. *Fuel Process. Technol.* 2022, 227, 107120.
- Cako, E.; Soltani, R.D.C.; Sun, X.; Boczkaj, G. (2022). Desulfurization of raw naphtha cuts using hybrid systems based on acoustic cavitation and advanced oxidation processes (AOPs). *Chem. Eng. J.* 2022, 439, 135354.
- Fortune Business Insights (2025). Biodiesel Market Analysis 2025-2032. <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/biodiesel-market-101631>
- Gadore, V.; Mishra, S.R.; Ahmaruzzaman, M. (2024) Advances in photocatalytic biodiesel production: Preparation methods, modifications and mechanisms. *Fuel* 2024, 362, 130749.
- Gog, A., et al. (2011). Biodiesel production using enzymatic transesterification – Current state and perspectives. *Renewable Energy*, 39, 10–16. doi: 10.1016/j.renene.2011.08.007
- Goh, B.H.H.; Chong, C.T.; Ge, Y.; Ong, H.C.; Ng, J.-H.; Tian, B.; Ashokkumar, V.; Lim, S.; Seljak, T.; Józsa, V. (2020). Progress in utilisation of waste cooking oil for sustainable biodiesel and biojet fuel production. *Energy Convers. Manag.* 2020, 223, 113296.
- Jamil, M.; Aziz, S. and Khalid, M. (2024). Various Prospects of Biodiesel Production: Techniques and Challenges. Pre-Print.org. *International Journal of Vehicle Structures and Systems*. doi: 10.20944/preprints202409.1068.v1
- Jayabal, R. (2024). Advancements in catalysts, process intensification, and feedstock utilization for sustainable biodiesel production. *Results Eng.* 2024, 24, 103668.
- Lens.org. (2025). Features For Everyone <https://www.lens.org/>
- Mahlia, T. M. I., Syazmi, Z. A. H. S., Mofijur, M., Abas, A. E. P., Bilad, M. R., et al. (2020). Patent landscape review on biodiesel production: technology updates. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 118:109526. doi: 10.1016/j.rser.2019.109526
- MBF Group (2024). Biodiésel – producción, materias primas y certificación. <https://mbfgroup.pl/es/biodiesel-produccion-materias-primas-certificacion-y-aceites-vegetales/>
- Muhammad, K.M.; Adeyemi, M.M.; Jacob, J.; Koko, A.R.; Dauda, K.; Tamasi, A.A.; Yahuza, I. (2025). Biodiesel production in Africa from non-edible sources: Sources, production, properties and policies. *Sustain. Chem. Environ.* 2025, 9, 100201.

- Muthukumar, C., Mohan, S., & Ganesan, A. (2015). Microwave-assisted transesterification of *Pongamia pinnata* oil catalyzed by base. *Energy Conversion and Management*, 93, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.036>
- OECD/FAO (2023). "OECD-FAO Agricultural Outlook", OECD Agriculture statistics (database), <http://dx.doi.org/10.1787/agr-outl-data>
- Ong, H. C., Milano, J., Silitonga, A. S., Hassan, M. H., Shamsuddin, A. H., Wang, C.-T., et al. (2019). Biodiesel production from *Calophyllum inophyllum*-*Ceiba pentandra* oil mixture: Optimization and characterization. *J. Clean. Prod.* 219, 183–198. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.048
- Panahi, H.K.S.; Hosseinzadeh-Bandbafha, H.; Dehghani, M.; Orooji, Y.; Mahian, O.; Shahbeik, H.; Kiehadrouinezhad, M.; Kalam, M.A.; Karimi-Maleh, H.; Jouzani, G.S.; et al. (2024). Nanotechnology applications in biodiesel processing and production: A comprehensive review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2024, 192, 114219.
- Powar, R.S.; Yadav, A.S.; Ramakrishna, C.S.; Patel, S.; Mohan, M.; Sakharwade, S.G.; Choubey, M.; Ansu, A.K.; Sharma, A. Algae: A potential feedstock for third generation biofuel. *Mater. Today Proc.* 2022, 63, A27–A33.
- Prajapati, A.K.; Ali, S.S.; Ansari, K.B.; Athar, M.; Mesfer, M.K.A.; Shah, M.; Danish, M.; Kumar, R.; Shakeelur Raheman, A.R. (2025). Process intensification in biodiesel production using unconventional reactors. *Fuel* 2025, 380, 133263.
- Razzak, S.A.; Hossain, S.M.Z.; Ahmed, U.; Hossain, M.M. (2025). Cleaner biodiesel production from waste oils (cooking/vegetable/frying): Advances in catalytic strategies. *Fuel* 2025, 393, 134901.
- Rizwanul Fattah IM, Ong HC, Mahlia TMI, Mofijur M, Silitonga AS, Rahman SMA and Ahmad A (2020). State of the Art of Catalysts for Biodiesel Production. *Front. Energy Res.* 8:101. doi: 10.3389/fenrg.2020.00101
- Saksono, N.; Muharam, Y.; Setiawan, M.A. (2021). Effect of mixing rate and molar ratio of methanol-oil to biodiesel synthesis from palm oil with plasma electrolysis method. *AIP Conf. Proc.* 2021, 2376, 020001.
- Saravanan, D.; Balaji, D.; Lawrence, P.; Arunkumar, G. and Hariram, V. (2024). Non-Edible and Edible Feedstock's for Biodiesel Production - A Critical Review on Bio-oil Extraction and its Transesterification. Vol. 16 No. 3 (2024). DOI: <https://doi.org/10.4273/ijvss.16.3.01>
- Shan, R., Lu, L., Shi, Y., Yuan, H., and Shi, J. (2018). Catalysts from renewable resources for biodiesel production. *Energ. Convers. Manage.* 178, 277–289. doi: 10.1016/j.enconman.2018.10.032
- Silitonga, A. S., et al. (2023). Producción de combustibles renovables a partir de aceites no convencionales. *Revista de Ingeniería Química y Bioprocesos. Análisis técnico sobre la esterificación de materias primas de segunda generación.*
- Silitonga, A. S., Masjuki, H. H., Mahlia, T. M. I., Ong, H. C., Chong, W. T., and Boosroh, M. H. (2013). Overview properties of biodiesel diesel blends from edible and non-edible feedstock. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 22, 346–360. doi: 10.1016/j.rser.2013.01.055