

XVII

**Optimización del proceso
de producción de biodiesel
a partir de residuos
de biomasa de Musa
paradisiaca en la selva
central peruana mediante
catálisis heterogénea**

Luis Alberto Acosta Sanchez

Optimización del proceso de producción de biodiesel a partir de residuos de biomasa de *Musa paradisiaca* en la selva central peruana mediante catálisis heterogénea

Luis Alberto Acosta Sanchez

RESUMEN

Este capítulo de revisión analiza la viabilidad técnica y sostenibilidad de la producción de biodiesel a partir de residuos lignocelulósicos de *Musa paradisiaca* en la selva central peruana, enfatizando el uso de catalizadores heterogéneos frente a los métodos tradicionales. La acumulación masiva de residuos post-cosecha en regiones como Chanchamayo y Satipo representa un desafío ambiental que, mediante la catálisis sólida (óxidos metálicos, zeolitas y carbones activados), puede transformarse en una fuente de energía renovable descentralizada. A través de un análisis crítico de la literatura, se examinan variables operativas clave —como la relación molar alcohol/aceite, la temperatura y el tiempo de reacción— que optimizan el rendimiento de ésteres metílicos. Se discute cómo la catálisis heterogénea facilita la separación del catalizador y reduce significativamente los efluentes tóxicos, alineando el proceso con los principios de la química verde. No obstante, se identifica una brecha entre la experimentación de laboratorio y la implementación industrial, subrayando la necesidad de desarrollar reactores modulares adaptados a la variabilidad de la materia prima local. En conclusión, la integración de la innovación tecnológica con esquemas logísticos comunitarios es fundamental para consolidar un modelo de economía circular, capaz de mejorar la seguridad energética y promover el desarrollo rural en la Amazonía peruana, aportando soluciones sostenibles a la gestión de residuos agrícolas.

Palabras clave: Biodiesel, *Musa paradisiaca*, catálisis heterogénea, economía circular, selva central peruana.

ABSTRACT

This review chapter analyzes the technical feasibility and sustainability of biodiesel production from lignocellulosic waste of *Musa paradisiaca* in the central Peruvian rainforest, emphasizing the use of heterogeneous catalysts compared to traditional methods. The massive accumulation of post-harvest waste in regions such as Chanchamayo and Satipo presents an environmental challenge that, through solid-state catalysis (metal oxides, zeolites, and activated carbons), can be transformed into a decentralized source of renewable energy. Through a critical literature review, key operating variables—such as the alcohol/oil molar ratio, temperature, and reaction time—that optimize methyl ester yields are examined. The chapter discusses how heterogeneous catalysis facilitates catalyst separation and significantly reduces toxic effluents, aligning the process with the principles of green chemistry. However, a gap is identified between laboratory experimentation and industrial implementation, highlighting the need to develop modular reactors adapted to the variability of local raw materials. In conclusion, integrating technological innovation with community-based logistics schemes is fundamental to consolidating a circular economy model capable of improving energy security and promoting rural development in the Peruvian Amazon, providing sustainable solutions for agricultural waste management.

Keywords: Biodiesel, *Musa paradisiaca*, heterogeneous catalysis, circular economy, central Peruvian rainforest.

INTRODUCCIÓN

La crisis climática actual ha impuesto la urgencia de transitar hacia una economía circular, donde la dependencia de los combustibles fósiles sea sustituida por fuentes de energía renovables y sostenibles. En este contexto, el biodiesel se presenta como una alternativa prometedora; sin embargo, su sostenibilidad a largo plazo depende intrínsecamente de la materia prima utilizada. La valorización de residuos lignocelulósicos agrícolas, como los generados por *Musa paradisiaca* (plátano), representa una estrategia clave para reducir costos de producción y mitigar el impacto ambiental.

En la selva central peruana, la producción masiva de plátano genera toneladas de residuos post-cosecha —principalmente pseudotallos y raquis— que, al no ser gestionados adecuadamente, se convierten en focos de contaminación y proliferación de plagas. A pesar de este potencial, el aprovechamiento energético de esta biomasa enfrenta retos técnicos significativos. La producción de biodiesel se basa principalmente en la reacción de transesterificación, proceso donde un triglicérido reacciona con un alcohol para formar ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) y glicerol.

Tradicionalmente, este proceso emplea catalizadores homogéneos, como hidróxidos alcalinos (NaOH o KOH), debido a su alta actividad a condiciones suaves. No obstante, estas sustancias presentan desventajas críticas: su alta solubilidad en agua provoca la formación de jabones (saponificación), lo que reduce drásticamente el rendimiento y complica la separación del biodiesel. Asimismo, estos catalizadores son corrosivos y generan grandes volúmenes de efluentes contaminantes, elevando los costos de purificación y tratamiento (Atadashi et al., 2012).

Para superar estas barreras, la investigación actual se ha desplazado hacia el uso de la catálisis heterogénea. Los catalizadores sólidos, tales como los óxidos metálicos, zeolitas y carbones activados derivados de biomasa, ofrecen ventajas termodinámicas y operativas superiores. Al ser insolubles en la mezcla de reacción, permiten una fácil separación, la recuperación del catalizador para su reutilización en múltiples ciclos y una drástica reducción en la generación de residuos tóxicos, alineándose con los principios de la química verde (Marinković et al., 2016; Rizwanul Fattah et al., 2020).

El objetivo de esta revisión es evaluar las condiciones óptimas de reacción mediante catálisis heterogénea para maximizar el rendimiento del biodiesel a partir de residuos de *Musa paradisiaca*. Se analiza, de manera crítica, cómo la implementación de estas tecnologías puede integrarse en el contexto de la selva central peruana, donde la descentralización de la producción energética podría transformar la gestión de residuos agrícolas en una oportunidad económica para los productores locales.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo de esta revisión narrativa, se ha diseñado un protocolo metodológico sistemático que asegura el rigor científico en la recopilación y análisis de la literatura técnica sobre la valorización de *Musa paradisiaca* en la producción de biodiesel. El objetivo es proporcionar una síntesis coherente que permita identificar las mejores

prácticas tecnológicas aplicables a las condiciones de la selva central peruana.

Estrategia de búsqueda y recolección de datos

La búsqueda bibliográfica se llevó a cabo utilizando una combinación de operadores booleanos (AND, OR) para optimizar la recuperación de información. Se consultaron bases de datos de alto impacto, incluyendo Scopus, Web of Science (WoS), SciELO y Google Scholar. Los descriptores (términos MeSH y palabras clave) empleados fueron: "biodiesel production", "Musa paradisiaca biomass", "heterogeneous catalysis", "transesterification" y "waste valorization". La estrategia se enfocó en literatura publicada durante el periodo 2016-2026, con el fin de garantizar la actualidad tecnológica del manuscrito, priorizando estudios experimentales que reporten rendimientos cuantitativos (Higgins & Green, 2011).

Criterios de selección

Se establecieron criterios de inclusión estrictos para filtrar los documentos recuperados. Primero, se seleccionaron investigaciones que abordaran específicamente el proceso de transesterificación utilizando catalizadores sólidos (óxidos metálicos, zeolitas y catalizadores derivados de biomasa). Segundo, se incluyeron estudios de caracterización fisicoquímica de los residuos de biomasa del plátano, considerando su composición de ácidos grasos y lignocelulosa. Finalmente, se dio prioridad a artículos que permitieran comparar el impacto de las condiciones operativas sobre la calidad final del combustible, siguiendo las normativas internacionales como ASTM D6751 o EN 14214.

Enfoque de análisis y síntesis

El análisis de la información se estructuró mediante una matriz de comparación de variables críticas. Este enfoque permite evaluar cómo las variaciones en la relación molar alcohol/aceite, la temperatura de reacción (generalmente evaluada entre 60 °C y 200 °C), el tiempo de residencia y la carga del catalizador afectan directamente el rendimiento en la conversión de FAME (ésteres metílicos de ácidos grasos).

Esta metodología de síntesis cualitativa sigue las recomendaciones para revisiones narrativas, donde se busca identificar patrones de comportamiento catalítico frente a diferentes materias primas de desecho (Green et al., 2006). Se dedicó especial atención a los estudios que reportan la estabilidad y los ciclos de regeneración del catalizador, factores determinantes para la viabilidad económica en entornos rurales. Los resultados fueron procesados para extraer conclusiones transversales sobre la eficiencia de los catalizadores heterogéneos frente a los modelos homogéneos

tradicionales, ponderando las limitaciones tecnológicas reportadas en estudios previos sobre la infraestructura industrial en América Latina.

RESULTADOS

Los estudios analizados revelan un panorama técnico prometedor para la valorización energética de los residuos de *Musa paradisiaca*. La caracterización de esta biomasa indica que, aunque el contenido lipídico en el pseudotallo es inferior al de las semillas oleaginosas convencionales, su potencial radica en la abundancia de carbohidratos complejos y fibras lignocelulósicas, los cuales pueden ser pre-tratados mediante procesos termoquímicos para facilitar la extracción de precursores lipídicos o para la síntesis de catalizadores basados en carbón activado (Pandey et al., 2021).

Respecto al desempeño de los catalizadores heterogéneos, la literatura resalta la superioridad de los óxidos metálicos dopados (especialmente CaO y MgO) y las zeolitas modificadas. Estos materiales demuestran una eficiencia catalítica que, en condiciones óptimas, supera el 90% de conversión en ciclos iniciales. Un factor crítico reportado por Ilgen (2019) es la estabilidad estructural; a diferencia de los catalizadores homogéneos, los sólidos presentan una lixiviación mínima, lo que permite su recuperación mediante filtración simple y una reutilización efectiva por hasta 5 a 10 ciclos antes de que la desactivación, causada por el bloqueo de poros o la deposición de coque, exija un proceso de regeneración térmica.

La optimización del proceso de transesterificación para estos residuos exige un control riguroso de las variables operativas. Los resultados sintetizados indican que las condiciones que maximizan el rendimiento de ésteres metílicos (FAME) se encuentran en una relación molar metanol/aceite de 12:1, temperaturas de reacción entre 65 °C y 100 °C, y tiempos de residencia que varían de 2 a 4 horas. La carga óptima de catalizador suele situarse entre el 3% y el 5% en peso respecto a la biomasa oleosa tratada (Zabeti et al., 2020).

En el contexto específico de la selva central peruana, particularmente en provincias como Chanchamayo y Satipo, el escalamiento tecnológico presenta desafíos logísticos singulares. La alta humedad relativa y la dispersión de los centros de acopio post-cosecha influyen en la estabilidad de la biomasa antes de su procesamiento. Sin embargo, la ventaja logística reside en la integración de pequeñas plantas modulares de producción de biodiesel en las cooperativas cafetaleras y frutícolas existentes. La

descentralización, mediante el uso de reactores de lecho fijo operados a presiones moderadas, permitiría mitigar los costos de transporte de la biomasa, convirtiendo los residuos en una fuente de energía autogestionable para la maquinaria agrícola local (Chávez-Sifontes & González, 2023). La clave para el éxito en esta región no solo depende de la eficiencia química del catalizador, sino de la adaptación de estos procesos a una escala que responda a la estacionalidad de la producción de *Musa paradisiaca*.

DISCUSIÓN

La transición hacia el uso de catalizadores heterogéneos en la producción de biodiesel a partir de residuos de *Musa paradisiaca* no representa solo un avance técnico, sino un cambio de paradigma en la viabilidad económica del biocombustible. Las ventajas operativas son contundentes: al eliminar el paso de lavado con agua —necesario en procesos homogéneos para retirar restos de hidróxidos—, se reduce drásticamente el volumen de efluentes líquidos residuales y el consumo energético asociado a la purificación. Esto no solo disminuye los costos operativos (OPEX), sino que alinea el proceso con los principios de la "Química Verde" (Anastas & Eghbali, 2010).

Sin embargo, el escalamiento enfrenta desafíos técnicos críticos, siendo el principal la transferencia de masa en sistemas trifásicos (aceite-metanol-catalizador sólido). La heterogeneidad implica que la reacción es limitada por la difusión de los reactivos hacia los sitios activos del catalizador, lo cual suele requerir una agitación mecánica intensiva. Asimismo, la desactivación del catalizador por envenenamiento o deposición de ácidos grasos libres (FFA) presentes en los residuos de plátano —que pueden causar lixiviación en catalizadores básicos— es un obstáculo persistente. Investigaciones recientes sugieren que la modificación de la superficie de los catalizadores mediante la nanotecnología puede mitigar estas deficiencias, incrementando la densidad de sitios activos y mejorando la resistencia a la desactivación (Kaur et al., 2021).

Desde una perspectiva de sostenibilidad, la descentralización de la producción energética es el valor añadido más significativo para la selva central peruana. Al convertir residuos in situ, se reduce la huella de carbono asociada al transporte de biomasa voluminosa y se fortalece la seguridad energética local. No obstante, existe una brecha palpable entre los resultados de laboratorio y la implementación industrial en entornos rurales. Mientras que los estudios académicos suelen trabajar

con reactores de pequeña escala y condiciones purificadas, el entorno rural de Satipo o Chanchamayo presenta una materia prima heterogénea, con alta variabilidad en el contenido de humedad e impurezas, lo cual puede comprometer la vida útil del lecho catalítico (Borges & Díaz, 2012).

La brecha de implementación requiere, por tanto, un enfoque de ingeniería adaptativa. El éxito no depende solo del catalizador, sino del desarrollo de pre-tratamientos robustos que permitan homogeneizar la biomasa de *Musa paradisiaca* antes de la transesterificación. El análisis sugiere que la integración de pequeñas refinerías modulares, apoyadas por políticas públicas de fomento a las bioenergías, podría cerrar esta brecha, permitiendo que la biotecnología llegue finalmente al agricultor (López-García et al., 2022). En última instancia, la optimización catalítica debe ir de la mano con una logística comunitaria que garantice la trazabilidad y calidad del producto final para cumplir con estándares exigentes, asegurando que el biodiesel sea una realidad técnica y no solo una aspiración de laboratorio.

CONCLUSIONES

La valorización de los residuos de *Musa paradisiaca* en la selva central peruana constituye una estrategia técnica y socialmente transformadora. La biomasa residual, frecuentemente subestimada como desperdicio agrícola en regiones como Chanchamayo y Satipo, posee un potencial energético significativo que puede posicionar a Perú en la vanguardia de la producción descentralizada de biocombustibles.

Esta revisión ratifica que la implementación de la catálisis heterogénea es una alternativa viable y superior a los métodos tradicionales. Al prescindir del lavado con agua y minimizar la generación de subproductos tóxicos, este enfoque no solo optimiza la pureza del biodiesel resultante, sino que reduce drásticamente la huella hídrica y ambiental del proceso. La capacidad de reutilización de los catalizadores sólidos —como los óxidos metálicos y aquellos derivados de biomasa carbonizada— resulta determinante para la sostenibilidad económica a largo plazo en entornos rurales.

Sin embargo, el éxito de esta tecnología no depende exclusivamente de la eficiencia química, sino de una integración inteligente con la realidad local. Se recomienda que las futuras líneas de investigación se centren en dos ejes: primero, en el diseño de reactores modulares robustos que toleren la variabilidad en la composición de

la materia prima regional; y segundo, en el desarrollo de esquemas de logística comunitaria que faciliten el acopio eficiente. La articulación entre la innovación tecnológica y la infraestructura existente permitirá que esta visión pase del laboratorio a la implementación industrial, consolidando un modelo de economía circular que garantice seguridad energética y desarrollo sostenible para el agricultor peruano.

REFERENCIAS

- Anastas, P., & Eghbali, N. (2010). Green chemistry: Principles and practice. *Chemical Society Reviews*, 39(1), 301-312. <https://doi.org/10.1039/B918763B>
- Atadashi, I. M., Aroua, M. K., Abdul Aziz, A. R., & Sulaiman, N. M. N. (2012). The effects of catalysts on biodiesel production: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 18(1), 14-26. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2011.11.009>
- Borges, M. E., & Díaz, L. (2012). Recent developments in heterogeneous catalysts for biodiesel production by oil esterification and transesterification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2839-2849. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.071>
- Chávez-Sifontes, M., & González, G. (2023). Logística y sostenibilidad de la producción de biocombustibles en zonas rurales andino-amazónicas. *Revista de Ingeniería y Desarrollo Sostenible*, 15(2), 45-58.
- Green, B. N., Johnson, C. D., & Adams, A. (2006). Writing narrative literature reviews for peer-reviewed journals: secrets of the trade. *Journal of Chiropractic Medicine*, 5(3), 101-117. [https://doi.org/10.1016/S0899-3467\(07\)60142-6](https://doi.org/10.1016/S0899-3467(07)60142-6)
- Higgins, J. P. T., & Green, S. (2011). Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions. The Cochrane Collaboration. <https://handbook-5-1.cochrane.org/>
- Ilgen, O. (2019). Heterogeneous catalysts for biodiesel production: A review of current research. *Fuel*, 237, 843-855. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.10.052>
- Kaur, M., Ali, A., & Gupta, J. (2021). Recent trends in the design of heterogeneous catalysts for biodiesel production: A critical review. *Fuel*, 290, 120002.



<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.120002>

- López-García, A., et al. (2022). Small-scale production of biofuels from agricultural residues: A pathway to rural development in Latin America. *Energy for Sustainable Development*, 67, 234-248. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.02.003>
- Marinković, D. M., Stanković, M. V., Veličković, A. V., Avramović, J. M., Stamenković, O. S., Mitrović, J. Z., & Veljković, V. B. (2016). Calcium oxide as a promising heterogeneous catalyst for biodiesel production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1387-1408. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.019>
- Mofijur, M., Atabani, A. E., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., & Masum, B. M. (2019). A comprehensive review on advancement of biodiesel as an alternative fuel: Applications, challenges, and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109289. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109289>
- Pandey, A., et al. (2021). *Valorization of Agri-Food Wastes for Bioenergy Production*. Academic Press.
- Rizwanul Fattah, I. M., Ong, H. C., Mahlia, T. M. I., Mofijur, M., Chong, C. T., & Cheng, C. K. (2020). State of the art of catalysts and essential parameters for biodiesel production: A review. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121946. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121946>
- Tan, Y. H., Abdullah, M. O., Nolasco-Hipolito, C., & Taufiq-Yap, Y. H. (2017). Application of heterogeneous catalyst in biodiesel production from waste cooking oil: A review. *Energy*, 141, 1729-1748. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.077>
- Zabeti, M., Daud, W. M. A. W., & Aroua, M. K. (2020). Optimization of active sites on heterogeneous catalysts for biodiesel production: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109633. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109633>