

**Artículo de divulgación**<https://doi.org/10.61767/mjte.005.1.2737>

Arce-Vazquez et al., 2026

Recibido: 11-02-2026

Revisado: 22-04-2026

Aceptado: 27-04-2026

Publicado: 30-04-2026

Del campo al motor: La magia de los biocombustibles líquidos

From the field to the engine: The magic of liquid biofuels

Maria Belem Arce-Vazquez¹, Agustin Mora-Ortega^{2,*}, Jesús de la Cruz-Alejo³ y Laura Goretti Rojas-Rodríguez²

¹ Departamento de Ciencias de la Alimentación. División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Lerma. Av. de las Garzas 10. Col. El Panteón, Lerma de Villada, Estado de México. México, C. P. 52005.

² Departamento de Eficiencia Energética y Energías Renovables, Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Ecatepec de Morelos, Estado de México, México, C.P. 55210.

³ Departamento Ciencias en Ingeniería Mecatrónica, Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Ecatepec de Morelos, Estado de México, México, C.P. 55210.

*Correspondencia: amora@tese.edu.mx

Resumen

El presente escrito explora el cambio de combustibles fósiles a energías renovables como una necesidad apremiante para mitigar el cambio climático por el calentamiento global causado por las emisiones de gases nocivos al medio ambiente. A través de analizar las generaciones de biocombustibles, sobresale el potencial de la biomasa lignocelulósica para producir energéticos sin comprometer la soberanía alimentaria. Se detallan los procesos industriales de fabricación, desde la transesterificación para producir biodiésel hasta la ruta de proceso del bioetanol que incluyen pretratamiento, hidrólisis y fermentación. En cada proceso se observan los puntos críticos para poder optimizarlos y proponer los mejores modelos de producción de biocombustibles líquidos, con la finalidad de transformar la percepción de que los desechos no sirven y que se puede dar una segunda utilización para que sean el nuevo medio de combustibles para una movilidad sostenible.

Palabras clave: Energías Renovables, Biocombustibles líquidos, Transesterificación, Fermentación alcohólica.

Abstract

This paper explores the shift from fossil fuels to renewable energy as an urgent necessity to mitigate climate change caused by global warming resulting from the emission of harmful gases into the environment. Through an analysis of biofuel generation, the potential of lignocellulosic biomass to produce energy without compromising food sovereignty is highlighted. The industrial



Artículo de divulgación

Arce-Vazquez et al., 2026

manufacturing processes are detailed, from transesterification for biodiesel production to the bioethanol production process, including pretreatment, hydrolysis, and fermentation. Critical points are identified in each process to optimize them and propose the best models for liquid biofuel production. The aim is to transform the perception that waste is useless and demonstrate that it can be repurposed as a new fuel source for sustainable mobility.

Keywords: Renewable energies, Liquid biofuels, Transesterification, Alcoholic fermentation.

1. Introducción

En la actualidad, el mundo tiene mucha sed de energía. Cada día somos más humanos que necesitamos celulares, pantallas, máquinas y sobre todo movernos de un lugar a otro. El problema radica en que se necesitan principalmente combustibles fósiles, como el petróleo, para mover los autos, los camiones, las aeronaves y los barcos. Estos combustibles se llaman fósiles porque provienen de depósitos subterráneos que contienen un acumulado de

restos de seres vivos (Figura 1) que vivieron hace millones de años (Tumala et al., 2023).

La energía que proviene de estos depósitos se le conoce como Energías no Renovables, que incluyen además del petróleo al carbón, gas natural y energía nuclear (Figura 2). Se les clasifica así porque su producción es a través de una transformación geológica muy lenta de millones de años y su uso agota su existencia, lo que quiere decir que son irre recuperables, al menos en la escala de tiempo humano.

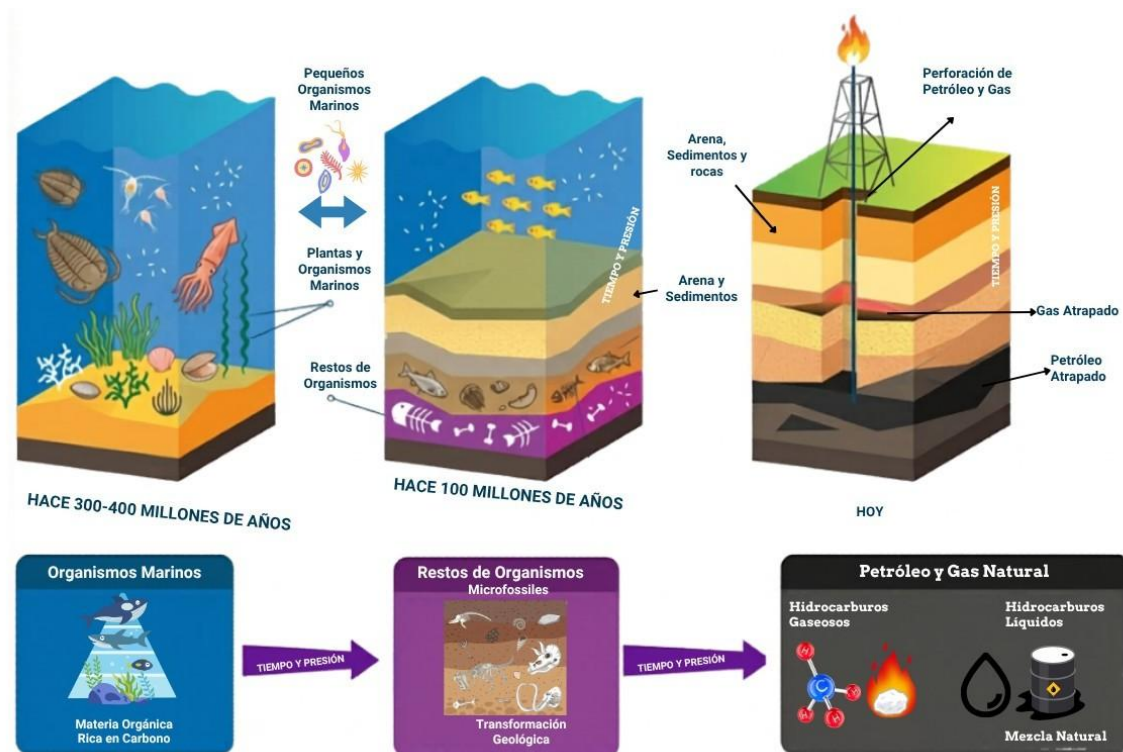


Figura 1. Formación natural de combustibles fósiles.



Artículo de divulgación

Arce-Vazquez et al., 2026

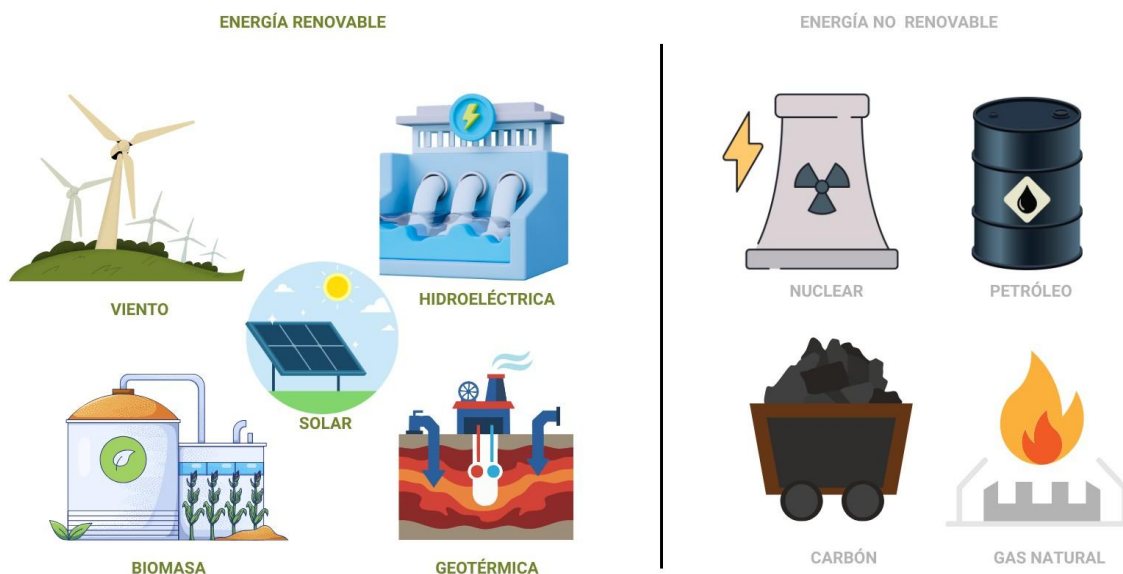


Figura 2. Fuentes de energía.

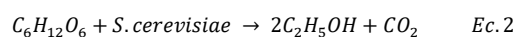
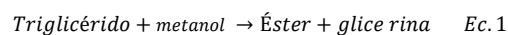
Los combustibles fósiles son altamente dañinos al planeta, ya que, al quemarlos en las máquinas de combustión, se produce dióxido de carbono (CO₂) que se desecha a la atmósfera. Al acumularse el CO₂ en exceso se propicia el calentamiento global (Tumala et al., 2023), que propicia un descontrol en el clima a nivel global, perjudicando no solo a los humanos si no a todos los seres vivos que habitamos el planeta, generando un impacto negativo al ambiente. Es por esto, que se deben encontrar nuevas fuentes de combustibles para encender motores, como son las Energías Renovables.

Las Energías Renovables son aquellas que se pueden aprovechar de fuentes naturales que muy difícilmente van a escasear (Figura 2), como es la energía que proviene del sol, el viento, el agua en movimiento, el centro de la tierra y de las plantas (Raihan et al., 2025), quienes generan una importante cantidad de biomasa. Particularmente esta última es de donde se generan los biocombustibles.

2. Cuatro generaciones de biocombustibles

Los biocombustibles se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de recurso del que proceden, así como de la tecnología utilizada para su transformación, a continuación, se aborda cada una de las cuatro familias.

Primera generación llamada también como la de cultivos alimentarios. Estos biocombustibles se obtienen a partir de matrices alimentarias con altos contenidos de lípidos o ricas en almidón como la papa o el maíz, así como de azúcares simples como la caña de azúcar o la remolacha azucarera (Kazmi et al., 2025; Liu et al, 2025). A partir de matrices lipídicas se genera biodiésel mediante el proceso de transesterificación (Ec. 1), por otro lado, la fermentación de matrices ricas en azúcares produce bioetanol (Ec. 2).





Artículo de divulgación

Arce-Vazquez et al., 2026

Esta forma de producir biocombustibles está limitada ya que compite directamente con el sector alimenticio y su aplicación a gran escala no siempre es rentable. Segunda generación conocida como biocombustibles de biomasa lignocelulósica (Liu et al., 2025). Las fuentes de producción no parten de los alimentos directamente como lo hace la primera generación, es decir, utiliza materiales vegetales que no son comestibles y que representan un

desecho agroalimentario como lo es el rastrojo de los cultivos, cáscaras de cereales o residuos forestales. Estas materias primas tienen una composición de tres principales moléculas que generan una red rígida, las cuales son la celulosa, hemicelulosa y la lignina (Kazmi et al., 2025), encontradas en las paredes celulares de las células vegetales, como se muestra en la Figura 3.

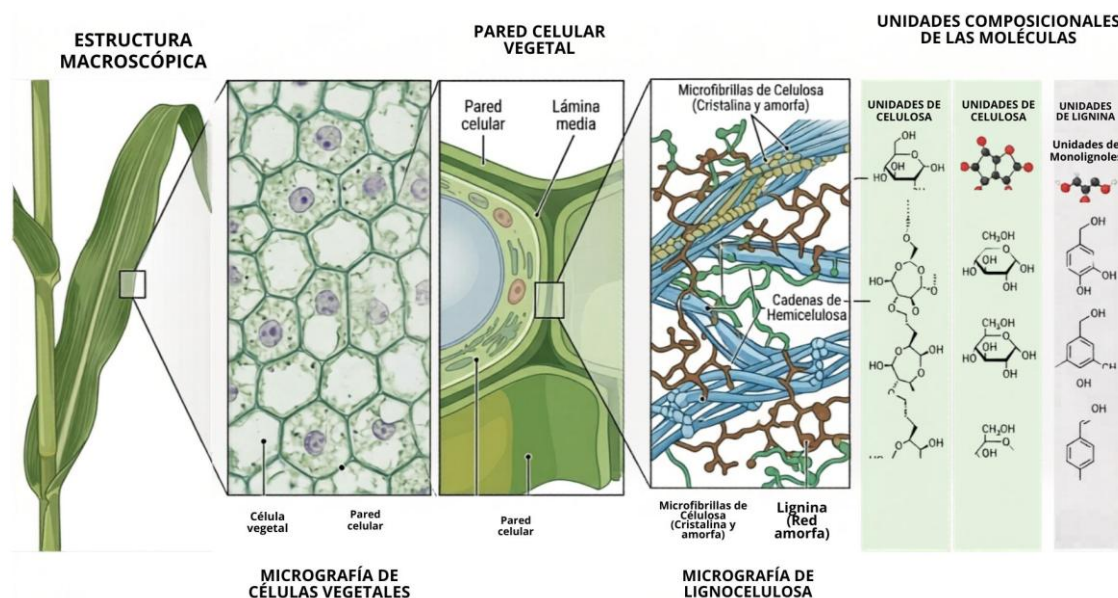


Figura 3. Composición fraccionada de materiales lignocelulósicos.

La tercera generación asociada a plantas acuáticas se conoce así porque son biocombustibles producidos a partir de microalgas y algas marinas. Estas fuentes tienen ventajas frente a otros cultivos ya que son de crecimiento rápido (Lopez et al., 2026) y en su composición tienen lípidos abundantes de los cuales en un segundo proceso pueden convertirse a biodiésel de alta eficiencia (Sharma et al., 2025). Sin embargo, la utilización de esta fuente está en las primeras etapas de desarrollo y se considera aún no rentable para su comercialización a gran escala. Los investigadores

de esta área siguen en busca de eficientar este sistema y que sea factible su implementación. La cuarta generación que está asociada directamente a la ingeniería genética se enfoca en el uso de microorganismos modificados genéticamente (OMG), los más comunes son bacterias como la *Escherichia coli* o levaduras de *Saccharomyces cerevisiae*. Estas modificaciones son enfocadas a altos rendimientos en la producción de biocombustibles por medio de una reestructuración celular y a nivel del ADN para orientar rutas metabólicas específicas o dirigidas (Bisht & Pandey, 2025). Se ha observado que a nivel laboratorio se puede producir directamente



Artículo de divulgación

Arce-Vazquez et al., 2026

alcoholes de cadena larga, hidrocarburos y terpenoides de alto valor energético. Aunque es muy prometedora, aún no se puede aplicar para producir biocombustibles que cubran la demanda energética.

3. ¿Cómo se fabrican los biocombustibles líquidos?

El biodiésel y el bioetanol son los biocombustibles líquidos se fabrican en mayor proporción. Para producirlos a nivel industrial, se utiliza principalmente la biomasa mediante procesos térmicos y/o biológicos. A continuación, se describen los métodos principales y sus etapas críticas para cada biocombustible.

3.1 Biodiésel

En los procesos productivos de biodiésel (Figura 4), se considera el aprovechamiento de la biomasa oleaginoso, especialmente se busca que esta biomasa no sea destinada a consumo humano o animal, tales como aceites tóxicos para el consumo humano, residuos sólidos urbanos aceitosos que suelen ser una fuente de contaminación para el agua o el suelo (Rutah et al., 2026). Estas materias son fuentes de triglicéridos (triacilglicéridos) que reaccionan (Ec. 1) intercambiando los grupos funcionales de ésteres del triglicérido con el metanol (Rocha-Meneses et al., 2023). Este proceso se da muy lentamente, por lo que es fundamental incluir en la reacción de transesterificación a los catalizadores. Estos catalizadores pueden ser de naturaleza química o biológica.

Los catalizadores químicos pueden ser homogéneos o heterogéneos, en el primer caso se consideran aquellos que se encuentren en la misma fase que los reactivos, siendo el estado líquido el que predomina presentando una alta actividad catalítica, en el segundo caso los catalizadores se encuentran en una fase distinta a los reactivos (Chen et al., 2026), por ejemplo, un sólido en una mezcla líquida. La sostenibilidad y costo se fundamenta en la capacidad que se tenga para recuperar y/o reutilizar a los catalizadores, siendo los catalizadores homogéneos los más difíciles de separar por lo

que se tiene que implementar etapas intensivas de lavados y purificación generando una gran cantidad de aguas residuales, mientras que los heterogéneos al ser sólidos, su separación de la mezcla de reacción es mucho más fácil, con un filtrado o centrifugado se pueden recuperar y reutilizar de 2 a 6 ciclos, según su naturaleza (Chen et al., 2026). Por esto, se han investigado el desarrollo de tres fuentes de catalizadores heterogéneos como son los catalizadores de óxidos sólidos y soportes aluminosilicatos como el ácido tungstofosfórico soportado (Goyeneche et al., 2026, catalizadores de óxidos metálicos compuestos por ejemplo el Mo/Ce/TiO₂ (Hou & Xie, 2024) catalizadores derivados de biomasa residual con altos contenidos de calcio, que es un área estudiada por su carácter innovador y sostenible.

Así mismo, los catalizadores biológicos, conocidos como enzimas, son una alternativa conveniente en procesos donde se prefiera la selectividad y eficiencia del proceso. En comparación con los catalizadores químicos, estos catalizadores tienen la capacidad de actuar sobre moléculas específicas, operan eficientemente a temperaturas y presiones bajas, al ser proteínas de origen natural, no generan residuos tóxicos corrosivos, sin embargo, puede perder su actividad catalítica si hay cambios bruscos de pH, temperatura o en presencia de sustancias inhibitoras generadas en la reacción. Para la producción de biodiésel se suele utilizar a las lipasas (Parandi et al., 2022), que actúan en la reacción de transesterificación, permitiendo que moléculas de triglicéridos reaccionen con un alcohol (metanol o etanol) para formar ésteres de alquilo (biodiésel).

Una vez que se finaliza la reacción de transesterificación, se genera una mezcla de biodiésel más glicerina y residuos de reactivos que no se transformaron. Esta mezcla se debe someter a etapas de separación y purificación (Rutah et al., 2026) llamada comúnmente como procesos de Post-Transesterificación. Esta etapa es fundamental ya que una separación deficiente de glicerol puede comprometer el sistema de



Artículo de divulgación

Arce-Vazquez et al., 2026

inyección de los motores. Así mismo, se pueden recuperar los alcoholes por medio de evaporación o destilación y a los catalizadores para su reutilización en otros ciclos de producción. Finalmente se debe realizar un secado o deshidratación ya que es importante eliminar el agua por que esta puede propiciar la corrosión en motores y crecimiento de

microorganismos en los tanques de almacenamiento de los dispositivos. Cabe mencionar que el biodiésel debe tener ciertas características evaluadas mediante normas como la ASTM D6751, para que sea considerado de calidad y técnicamente viable.

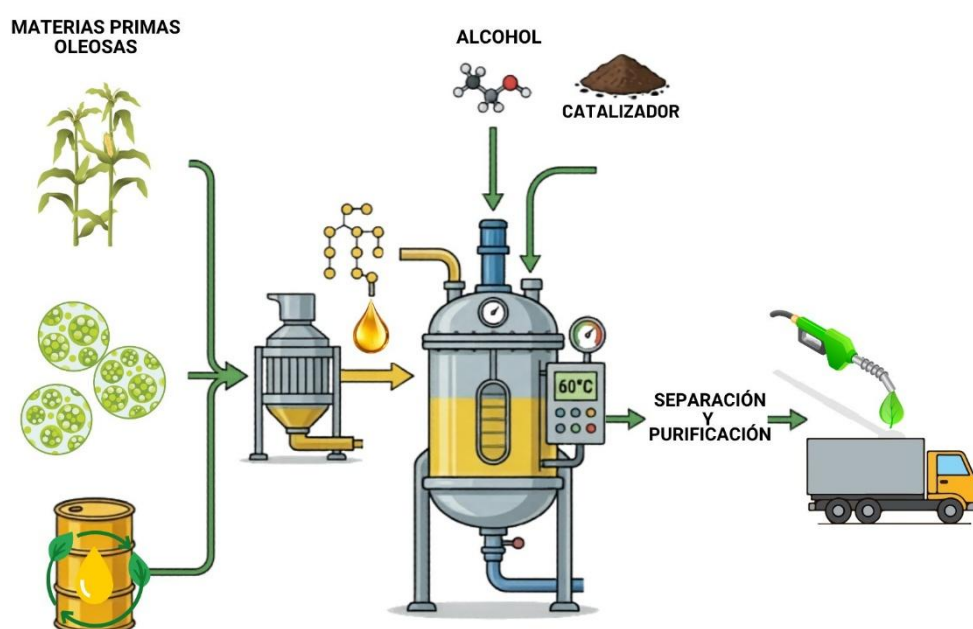


Figura 4. Proceso general de producción de biodiésel.

3.2 Bioetanol

En la producción de bioetanol se hacen procesos semejantes a la fabricación de cerveza o vino, pero ahora se realiza a una escala más grande y con algunos pasos previos para obtener la energía de las plantas conocida como pretratamiento de biomasa lignocelulósica, posteriormente se realiza la hidrólisis seguida de la fermentación y finalmente se procede hacer una destilación, los cuales se muestran en la Figura 5. A continuación se detalla cada uno de estos pasos.

El bioetanol se produce de la segunda generación a través de la vía bioquímica donde es transformada la biomasa lignocelulósica. En una

primera etapa se hace un pretratamiento donde se provoca un rompimiento de la estructura celular, este puede realizarse por métodos físico-químicos (Liu et al., 2025) donde se utilizan técnicas como la molienda, la explosión de vapor donde se somete a la biomasa a altas presiones y vapor seguida de una descompresión brusca, la explosión de fibra con amoníaco líquido donde se recupera al 100% el amoníaco, el uso de disolventes químicos que reblandecen la lignina para separar la hemicelulosa, siendo los solventes de nueva generación como líquidos iónicos o solventes eutécticos profundos los que hacen procesos más económicos y menos tóxicos (Sharma et al., 2023). Así mismo, se han implementado pretratamientos biológicos y



Artículo de divulgación

Arce-Vazquez et al., 2026

enzimáticos llamados proceso de “química verde”, donde se utilizan hongos de pudrición blanca o consorcios enzimáticos que optimizan la velocidad de rompimiento de los enlaces de hemicelulosa con la lignina. Recientemente, las tecnologías emergentes como las microondas, el ultrasonido y la irradiación se perfilan como métodos de alta eficiencia que utilizan energía física directa para fragmentar la estructura celular sin el uso de agua ni productos químicos (Arshad et al., 2025), lo que las hacen propuestas muy atractivas para el futuro. La etapa de pretratamiento es crítica, ya que sin este paso las enzimas no pueden acceder a la matriz vegetal, resultando procesos de bajo rendimiento de biocombustibles.

La segunda etapa comprende la hidrólisis que puede ser química o enzimática, donde la biomasa pretratada se somete a un proceso de descomposición química llamada sacarificación, utilizando catalizadores químicos o biológicos (Kazmi et al., 2025). Durante esta etapa, las macromoléculas de celulosa se degradan a su unidad base (glucosa). A diferencia de la hidrólisis química, la hidrólisis enzimática es un proceso que se caracteriza por su alta especificidad y la ausencia de subproductos de degradación de carácter tóxico (furfural), siendo una gran ventaja para las etapas posteriores. La hidrólisis de la celulosa (despolimerización) utiliza enzimas que trabajan de forma coordinada, siendo las endoglucanasas las que trabajan sobre los enlaces β -1,4-glucosídicos en las regiones menos ordenadas de las fibras de celulosa, formando nuevos extremos terminales, mientras que las exoglucanasas o celobiohidrolasas actúan en los extremos terminales para liberar celobiosas que a su vez se hidroliza con la β -glucosidasa y forma unidades libres de glucosa (Broda et al., 2022). Para que estas enzimas trabajen a su máxima capacidad se debe mantener la temperatura entre los 45 a 50 °C, un pH de 4 a 5 y hasta una carga de biomasa del 15% como máximo.

La etapa de la fermentación es un proceso donde el protagonista es el microorganismo de la levadura *Sacharomyces cerevisiae*, aunque se han

estudiado a otros como las bacterias modificadas *Zymomonas mobilis*, *Escherichia coli* u otras levaduras no tan comunes como la *Pichia stipitis* y *Kluyveromyces marxianus* (Lertwattanasakul et al., 2024). El proceso fermentativo comienza cuando la levadura descompone la glucosa dentro de su célula y con ayuda de una maquinaria compleja realiza la glucólisis para finalmente obtener moléculas de etanol. Si se utiliza otros azúcares como pentosas o xilosas, la maquinaria de la levadura es ineficiente, por lo que investigadores en el área de ingeniería metabólica (Bisht & Pandey, 2025) han podido introducir genes de otros organismos para que pueda llevar a cabo una ruta que permita degradar estos azúcares y tener un proceso completo de fermentación. Durante el proceso fermentativo, el microorganismo se enfrenta a un entorno hostil. El propio etanol producido es tóxico para la levadura en altas cantidades por arriba del 15%. Además, si el tratamiento de la biomasa generó compuestos como furfural, hidroximetilfurfural o ácidos orgánicos y se encuentran presentes en el medio, pueden provocar el efecto inhibitorio de acción de la levadura (Arshad et al., 2025; Kazmi et al., 2025). Por otro lado, la conversión teórica ideal de la glucosa a etanol es que un gramo de glucosa producirá 0.511 gramos de etanol, sin embargo, el rendimiento real es menor ya que parte del carbono se destina a la formación de nuevas levaduras y a subproductos como el glicerol o el ácido succínico.

Cabe mencionar que estos procesos pueden llegar a configurarse en etapas combinadas, en la biorrefinería se pueden integrar la hidrólisis con la fermentación llamada sacarificación y fermentación simultánea donde las enzimas y microorganismos operan en el mismo reactor, a medida que se produce la glucosa, la levadura la consume y elimina la posibilidad de inhibición por producto.

Al concluir la etapa fermentativa, en el biorreactor se tiene una mezcla compleja llamada caldo fermentado en donde además del bioetanol se encuentra agua, levaduras inactivas, nutrientes



Artículo de divulgación

Arce-Vazquez et al., 2026

no consumidos, ácidos orgánicos y sólidos remanentes de la biomasa, por lo que primero debe hacerse una filtración previo a destilar para evitar incrustaciones en las columnas de destilación. En la destilación se utiliza la transferencia de masa y calor para separar al bioetanol basándose en la diferencia de volatilidades de los componentes de la mezcla, ya que el punto de ebullición del etanol es de 78 oC mientras que el del agua es de 100 oC, en la industria se utilizan torres de fraccionamiento con múltiples platos, en donde el vapor va subiendo por cada plato que al estar en contacto con el líquido que baja se produce un intercambio

donde el agua se condensa y el etanol se evapora nuevamente, aumentando su concentración en cada nivel. Para que se reduzcan los costos se aprovecha el calor generado de una columna para calentar la siguiente teniendo una destilación multiefecto (Bisht & Pandey, 2025). El resultado de esta purificación es el etanol anhidro con alta pureza que es necesario para la industria automotriz ya que evita que el combustible se separe en capas de agua y gasolina dentro del tanque del vehículo, también previene la oxidación de inyectores y válvulas, maximiza el poder calorífico de la mezcla aire-combustible.

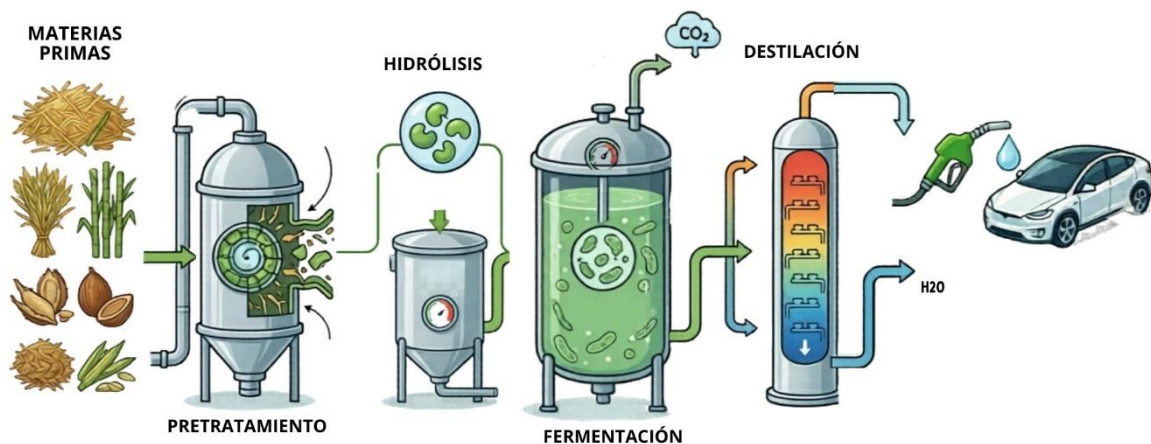


Figura 5. Proceso general de producción de bioetanol.

4. Conclusiones

Los biocombustibles representan una alternativa viable a corto y mediano tiempo para descarbonizar el sector transporte, permitiendo una transición hacia una economía que no sea dependiente de los combustibles fósiles. Así mismo, el avance hacia la segunda y tercera generación es fundamental para dar soluciones a la problemática del uso de alimentos para

energéticos, en este caso los residuos lignocelulósicos y microalgas demuestran que es posible generar energía sin desestabilizar la seguridad alimentaria. Por otro lado, la ingeniería genética genera propuestas que permitirán en un futuro cercano, producir combustibles limpios que cubran la demanda energética a través de procesos de fabricación mucho más rentables y rápidos. Finalmente, la viabilidad económica de estos combustibles depende de mejorar las



Artículo de divulgación

Arce-Vazquez et al., 2026

etapas críticas como el desarrollo de catalizadores heterogéneos reutilizables en el biodiésel y la reducción de costos en los pretratamientos de materiales lignocelulósicos para el bioetanol. El concepto de economía circular es la clave para aprovechar cada subproducto y lograr procesos con “residuos cero”.

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma Metropolitana por el préstamo de sus instalaciones para realizar las búsquedas bibliográficas en sus bases de datos.

Los autores agradecen al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología por otorgar el estímulo con folio REESP2024-0041 derivado del Programa Investigadoras e Investigadores COMECyT 2024 para la realización de una estancia en el Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

Declaraciones y afirmaciones

Fondos: Las autoras declaran que no se recibió financiamiento para este trabajo.

Conflicto de interés: Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

Aprobación ética: No aplica

Consentimiento para participar: No aplica

Consentimiento para publicar: No aplica

Disponibilidad de los datos: Contactar al autor de correspondencia para solicitar información acerca de este estudio.

Contribución del autor: Los autores MBAV, AMO, JDCA y LGRR, realizaron búsquedas exhaustivas en bases de datos académicas sobre el estado del arte de los biocombustibles, así como de las fuentes pertinentes de producción. Posteriormente, compilaron los métodos para su producción especificando sus puntos críticos, así como los últimos hallazgos para eficientizar su

producción, como alternativa a los combustibles fósiles.

Los autores leyeron y aprobaron la versión final del manuscrito.

Referencias

1. Arshad, N., Panakkal, E. J., Kalivarathan, P. B., Tawai, A., Chuetor, S., Wanmolee, W., ... & Sriariyanun, M. (2025). Emerging technologies in pretreatment and hydrolysis for high-solid-loading bioethanol production from lignocellulosic biomass. *Fermentation*, 11(11), 613. doi.org/10.3390/fermentation11110613.
2. Bisht, G. S., & Pandey, S. (2025). Biofuels for a sustainable future: generations, technologies, and key challenges in renewable energy. *BioEnergy Research*, 18(1), 43. doi.org/10.1007/s12155-025-10842-y
3. Broda, M., Yelle, D. J., & Serwańska, K. (2022). Bioethanol production from lignocellulosic biomass—challenges and solutions. *Molecules*, 27(24), 8717. doi.org/10.3390/molecules27248717.
4. Chen, R., Xue, B., Zhu, F., Qiu, Y., Wang, H., Wang, Y., & Zhou, T. (2026). The application of heterogeneous catalysts in esterification/transesterification for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226, 116262. doi.org/10.1016/j.rser.2025.116262.
5. Goyeneche, O., Mogollón, E. B., Gomes, G. J., Raimundini Aranha, A. C., & Arroyo, P. A. (2026). Esterification of free fatty acids (C8–C16) from coconut oil for bio-jet fuel precursor production using 12-tungstophosphoric acid supported on niobium pentoxide. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. doi.org/10.1002/bbb.70157



Artículo de divulgación

Arce-Vazquez et al., 2026

6. Hou, S., & Xie, W. (2024). Three-dimensional hierarchical meso/macroporous Mo/Ce/TiO₂ composites enhances biodiesel production from acidic soybean oil by transesterification-esterifications. *Energy Conversion and Management*, 305, 118273. doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118273
7. Kazmi, A., Sultana, T., Ali, A., Nijabat, A., Li, G., & Hou, H. (2025). Innovations in bioethanol production: A comprehensive review of feedstock generations and technology advances. *Energy Strategy Reviews*, 57, 101634. doi.org/10.1016/j.esr.2024.101634.
8. Lertwattanasakul, N., Rodrussamee, N., Kumakiri, I., Pattanakittivorakul, S., & Yamada, M. (2024). Potential of thermo-tolerant microorganisms for production of cellulosic bioethanol. In *Handbook of Biorefinery Research and Technology: Production of Biofuels and Biochemicals* (pp. 33-62). Singapore: Springer Nature Singapore. doi.org/10.1007/978-981-97-7586-6_35.
9. Liu, N., Dou, C., Yang, X., Bai, B., Zhu, S., Tian, J., & Shen, B. (2025). Effects of pretreatment procedure, compositional feature and reaction condition on the devolatilization characteristics of biomass during pyrolysis process: A review. *Journal of the Energy Institute*, 118, 101943. doi.org/10.1016/j.joei.2024.101943
10. Lopez, A. M., Savage, S., & Zhou, Z. (2026). Novel machine learning unlocks high lipid productivity and resolves trade-offs in algal biofuel production. *Renewable Energy*, 256, 123901. doi.org/10.1016/j.renene.2025.123901.
11. Parandi, E., Safaripour, M., Abdellattif, M. H., Saidi, M., Bozorgian, A., Nodeh, H. R., & Rezanian, S. (2022). Biodiesel production from waste cooking oil using a novel biocatalyst of lipase enzyme immobilized magnetic nanocomposite. *Fuel*, 313, 123057. doi.org/10.1016/j.fuel.2021.123057.
12. Raihan, A., Al Hasnat, M., Rahman, S. M., Ridwan, M., Rahman, M. M., Islam, M. T., & Bari, A. M. (2025). Recent advancements in alternative energies, technological innovations, and optimization strategies for seaport decarbonization. *Innovation and green development*, 4(3), 100252. doi.org/10.1016/j.igd.2025.100252.
13. Rocha-Meneses, L., Hari, A., Inayat, A., Yousef, L. A., Alarab, S., Abdallah, M., & Kikas, T. (2023). Recent advances on biodiesel production from waste cooking oil (WCO): A review of reactors, catalysts, and optimization techniques impacting the production. *Fuel*, 348, 128514. doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128514
14. Rutah, D. F., Mudhoo, A., & Surroop, D. (2026). Effects of process parameters on transesterification of waste cooking oil for biodiesel production: a review. *Chemical Papers*, 1-31. doi.org/10.1007/s11696-026-04742-4.
15. Sharma, A. K., Jaryal, S., Sharma, S., Dhyani, A., Tewari, B. S., & Mahato, N. (2025). Biofuels from microalgae: A review on microalgae cultivation, biodiesel production techniques and storage stability. *Processes*, 13(2), 488. doi.org/10.3390/pr13020488.
16. Sharma, V., Nargotra, P., Sharma, S., Sawhney, D., Vaid, S., Bangotra, R., & Bajaj, B. K. (2023). Microwave irradiation-assisted ionic liquid or deep eutectic solvent pretreatment for effective bioconversion of sugarcane bagasse to bioethanol. *Energy, Ecology & Environment*, 8(2), 141-156. doi.org/10.1007/s40974-022-00267-0.



Artículo de divulgación

Arce-Vazquez et al., 2026

17. Tumala, M. M., Salisu, A., & Nmadu, Y. B. (2023). Climate change and fossil fuel prices: A GARCH-MIDAS analysis. *Energy Economics*, 124, 106792. doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106792.