

**Artículo de revisión**<https://doi.org/10.61767/mjte.005.1.7690>

Rojas-Rodríguez et al., 2026

Recibido: 12-02-2026

Revisado: 24-04-2026

Aceptado: 27-04-2026

Publicado: 30-04-2026

Transformación de residuos orgánicos en energía renovable: Revisión de tecnologías convencionales y tecnologías emergentes sostenibles

Transformation of organic waste into renewable energy: Review of conventional technologies and emerging sustainable technologies

Laura Goretty Rojas-Rodríguez¹, Victoria Eugenia Tamayo-Galván², Agustín Mora-Ortega¹, y Maria Belem Arce-Vazquez^{3,*}

¹ 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.

² Departamento de Procesos y Tecnología. División de Ciencias Naturales e Ingeniería. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Cuajimalpa. Avenida Vasco de Quiroga 4871, Col. Santa Fe Cuajimalpa. Alcaldía Cuajimalpa de Morelos, Ciudad de México, México, C.P. 05348.

³ 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.

*Correspondencia: m.arce@correo.ler.uam.mx

Resumen

Ante la emergencia climática y el aumento del consumo energético derivado de su uso en la movilidad por medio del transporte y el crecimiento demográfico, los biocombustibles líquidos son una alternativa a considerar por su impacto positivo en la reducción de emisiones en el transporte, en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Esta revisión analiza la categorización de los biocombustibles desde la primera generación hasta la cuarta generación, destacando el potencial de la biomasa lignocelulósica de segunda generación que contempla el uso de residuos, como tallos hojas de maíz y bagazo de caña, debido a su abundancia ya que no compromete el suministro de alimentos. Se detalla las vías de transformación termoquímica como son la pirólisis, gasificación y licuefacción, así como la bioquímica que contempla la transesterificación, la fermentación y la digestión anaeróbica. Se hace hincapié en la importancia de realizar pretratamientos (químicos o biológicos) para desestabilizar los materiales compuestos de celulosa, hemicelulosa y lignina. Además, se analiza la aplicación de métodos de vanguardia, como la radiación de microondas, la fotocatalisis, el uso de plasma y de catalizadores orgánicos heterogéneos, junto con herramientas que involucran redes neuronales y máquinas de vectores de soporte. Así mismo, se analiza el concepto de biorrefinería integrada



Artículo de revisión

Rojas-Rodríguez et al., 2026

y los sistemas híbridos como una estrategia técnica y financiera más sólida para el aprovechamiento integral de materiales de desecho, que promueve un modelo de economía circular, que garantiza la generación de energía limpia con autonomía y un impacto ambiental positivo.

Palabras clave: Biomasa lignocelulósica, Biorrefinería integrada, Procesos termoquímicos, Tecnologías emergentes, Descarbonización energética.

Abstract

In the face of the climate emergency and the increased energy consumption resulting from transportation and population growth, liquid biofuels are an alternative to consider due to their positive impact on reducing transportation emissions, in accordance with the Sustainable Development Goals. This review analyzes the categorization of biofuels from the first to the fourth generation, highlighting the potential of second-generation lignocellulosic biomass, which utilizes waste materials such as corn stalks and leaves, and sugarcane bagasse, given their abundance and the fact that they do not compromise food supplies. The review details thermochemical transformation pathways such as pyrolysis, gasification, and liquefaction, as well as biochemical pathways including transesterification, fermentation, and anaerobic digestion. Emphasis is placed on the importance of pretreatment (chemical or biological) to destabilize materials composed of cellulose, hemicellulose, and lignin. Furthermore, the application of cutting-edge methods is analyzed, such as microwave radiation, photocatalysis, the use of plasma and heterogeneous organic catalysts, along with tools involving neural networks and support vector machines. Likewise, the concept of integrated biorefineries and hybrid systems is examined as a more robust technical and financial strategy for the comprehensive utilization of waste materials, promoting a circular economy model that guarantees the generation of clean energy autonomously and with a positive environmental impact.

Keywords: Lignocellulosic biomass, Integrated biorefinery, Thermochemical processes, Emerging technologies, Energy decarbonization.

1. Introducción

La creciente demanda energética actual se debe a diversos factores como el crecimiento económico, crecimiento poblacional, cambio climático, costos energéticos, eficiencia energética y electromovilidad (Patel et al., 2025a). El transporte se considera como el sector que más afecta el aumento de la temperatura atmosférica, debido a que, durante el proceso de combustión de los combustibles fósiles en general, emite gases de efecto invernadero (GEI). En 2018 se registró que el consumo mundial de energía de más de 2.1 GToe (Tonelada

equivalente de petróleo) dentro del sector transporte por carretera lo que equivale al 17% de las emisiones mundiales generadas durante ese año, por lo que, a nivel mundial se está buscando activamente la implementación de fuentes de energía alternativas con el objetivo de encontrar soluciones más eficientes y sostenibles, entre estas se encuentran los biocombustibles líquidos con los que se busca disminuir la dependencia actual hacia los combustibles fósiles (Bouter et al., 2024).

La energía renovable se puede obtener de fuentes naturales como el sol, el viento, el agua,



Artículo de revisión

Rojas-Rodríguez et al., 2026

el calor producido y la biomasa, todas estas fuentes provienen de recursos infinitos disponibles en comparación con el petróleo, el gas natural y carbón, los cuales son recursos finitos que provoca una incertidumbre sobre el plazo durante el cual estarán disponibles (El-Araby, 2024).

Para definir a un combustible como orgánico o biocombustible es importante que este cumpla con una serie de estándares definidos por la Directiva Europea de Energías Renovables (RED II) para el cumplimiento de la disminución de GEI (Bouter et al., 2024). De la misma forma debe cumplir al menos alguno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) creados por los miembros de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) entre los que se encuentran: Energía asequible y no contaminante, generación de trabajo y crecimiento económico, industria, innovación e infraestructura y acciones por el clima (Patel et al., 2025a).

Los biocombustibles son un tipo de energético derivado de fuentes renovables (Trypolska, 2024), los biocombustibles se pueden encontrar de diversas formas: líquidos (bioetanol, biobutanol y biodiesel), sólidos (carbón vegetal, pellets, leña y residuos de celulosa) y gas (biogás) (Rai et al., 2022). Estos se obtienen mediante diferentes tecnologías de conversión tecnologías y nuevas metodologías que buscan mejorar los rendimientos de producción (Islam et al., 2025a). Los biocombustibles, en especial aquellos que se encuentran en forma líquida, representan la principal solución sostenible para el consumo energético dentro del sector transporte para cubrir la demanda de combustible en la aviación (Mansy et al., 2025), transporte marítimo y transporte de corta y larga distancia (Ge et al., 2025), ya que, a diferencia de los combustibles convencionales, los primeros pueden generar energía con una mínima cantidad de emisiones de CO₂, esto dependiendo del tipo de materia de la que provienen (Zamathula Queen Sikhakhane Nwokediegwu et al., 2024).

Los biocombustibles se pueden clasificar de acuerdo con el recurso del que proceden (Figura 1), es decir, los biocombustibles de primera generación son aquellos que se obtienen de cultivos alimentarios que provienen principalmente de materia rica en almidón como la papa, maíz (Mansy et al., 2025) y caña de azúcar dando lugar principalmente al biodiesel y al bioetanol por medio de reacciones de transesterificación y fermentación, respectivamente, sin embargo, debido al origen de estos recursos su aplicación es limitada (Islam et al., 2025b).

Los biocombustibles de segunda generación utilizan materiales vegetales no comestibles que se componen especialmente de materia lignocelulósica que proceden, en su mayoría, de plantas (Mahmood et al., 2023), cultivos no alimentarios, como pasto, astillas, residuos agrícolas, o bien, de semillas no comestibles (Liang, 2024). Por otro lado, los biocombustibles de tercera generación son aquellos que se obtienen a partir de plantas acuáticas como las algas, estas tienen un periodo de crecimiento durante el cual pueden producir altas cantidades de aceites útiles en la producción de biocombustibles como el biodiesel, sin embargo, debido a que los estudios experimentales realizados a este tipo de materia prima se encuentran en una etapa inmadura su viabilidad comercial carece de solidez (Islam et al., 2025a). Los biocombustibles de cuarta generación se producen a partir de microorganismos modificados genéticamente como *Escherichia coli*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Pichia pastoris* y *Synechococcus elongatus*, de los cuales por medio de una serie de alteraciones en su estructura celular genética se obtienen alcoholes, hidrocarburos de cadena larga y terpenoides (Chakraborty & Dutta, 2022).

2. Materias primas disponibles para la producción de biocombustibles de segunda generación

La materia prima útil para la producción de biocombustibles consiste principalmente de



Artículo de revisión

Rojas-Rodríguez et al., 2026

recursos que no son aptos para consumo humano, con el objetivo de no competir con el sector alimenticios (Rai et al., 2022) tales como rastrojos, cáscaras y otros materiales residuales del procesamiento que se muestran en la Tabla 1.

Un biocombustible como el bioetanol se deriva de un tipo de biomasa conocida comúnmente como lignocelulósica, la cual se compone de plantas no comestibles, desechos forestales, residuos domésticos (Rai et al., 2022), residuos agrícolas como vainas, tallos, cáscaras, entre

otros (Sikiru et al., 2024). La biomasa lignocelulósica es una de las materias primas con alta disponibilidad por lo que se considera un recurso con alto potencial para la generación de productos de alto valor (Patel et al., 2025a). La biomasa lignocelulósica está compuesta por paredes estructurales de celulosa, hemicelulosa y lignina, donde la hemicelulosa y la lignina (Figura 1) forman una red rígida que dificulta la degradación de la celulosa (Rai et al., 2022).

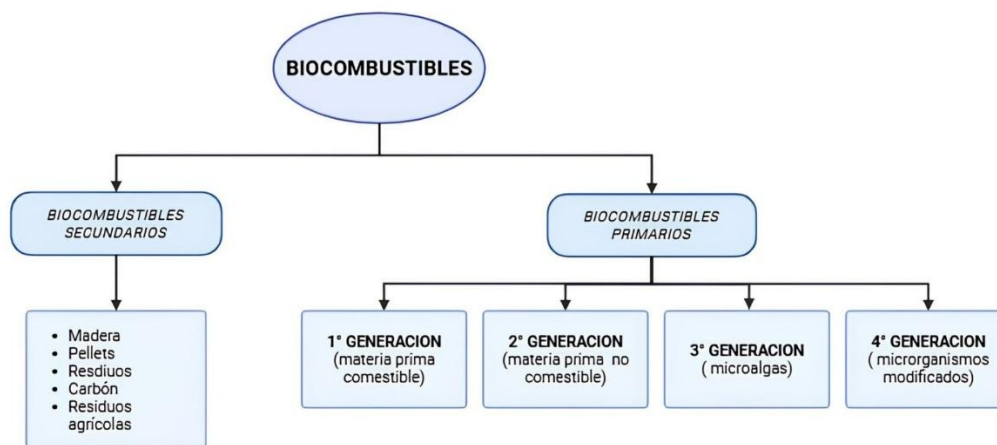


Figura 1. Clasificación general de los biocombustibles.

Tabla 1. Composición celular de biomasa lignocelulósica para la producción de biocombustibles. Fuente: Bukhari et al., 2025.

Tipo de residuo	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)
Cáscara de arroz	36	12	26
Mazorca	45	35	15
Paja de cebada	31-45	27-38	14-19
Cáscaras de nueces	25-30	25-30	30-40
Bagazo de caña	43	31	11
Paja de sorgo	32	24	13
Paja de avena	39.4	27.1	20.7
Rastrojo de maíz	38-40	28	7-21
Cáscara de coco	43.44	0.25	45.84
Césped	40-45	30-35	12
Paja de trigo	33-40	20-25	14-20



Artículo de revisión

Rojas-Rodríguez et al., 2026

Cáscara de café	43.18	10.2	17.42
Paja de arroz	44.3	35.5	20.4

La celulosa es un polímero natural conformado por una cadena de monómeros de glucosa, los cuales aportan una apariencia compacta y cristalina a las microfibras de la biomasa, la hemicelulosa, es el segundo polímero más abundante en la materia lignocelulósica, y está compuesta por biopolímeros de pentosas, hexosas y azúcares acetilados, mismos que aportan una estructura amorfa y no cristalina, sin embargo, este tipo de polímero junto con la lignina, dificultan el acceso a las moléculas de celulosa de la biomasa, debido a que funcionan como un recubrimiento rígido e impermeable de los tejidos celulares (Saleem et al., 2022).

El biodiesel es un tipo de combustible orgánico que se produce a partir de biomasa

biodegradable oleaginosa, entres estas se encuentran cultivos excluidos del sector alimenticio y aceites que no son aptos para consumo, debido a que alguno de los componentes que contiene podría ser tóxico, también se consideran como materia prima algunos Residuos Sólidos Urbanos (RSU) oleosos los cuales, debido a la mala deposición en alcantarillados provocando el taponamiento de tuberías y con ellos contaminando suelos y cuerpo de agua (Monika et al., 2023). La producción de un biocombustible como el biodiesel se puede llevar a cabo con diferentes materias primas, como las que se muestran a continuación en la Tabla 2.

Tabla 2. Condiciones de proceso de conversión de biomasa en biocombustibles.

Tipo de materia prima	Condiciones del proceso	Rendimiento (%)	Fuente
Aceite de Jatropha curcas	T = 60 °C, t = 60 min, Catalizador = 4 vol% Relación molar M:A = 10:1 Velocidad de agitación: 600 rpm	96.4	(Naseef & Tulaimat, 2025)
Aceite de palma	T = 75 °C t = 3h Catalizador = 3 % (w/w) Relación molar M:A = 15:1	96.1	(Naseef & Tulaimat, 2025)
Aceite de semilla de Chrysophyllum albidum	T = 65 °C t = 20 min Catalizador = 2 % (w/w) Relación molar M:A = 12:1 Velocidad de agitación: 400 rpm	99.2	(Kasirajan, 2021)
Aceite de soja	T= 60°C, t= 60 minutos, Catalizador= 3.5% (w/w) Mo/Ce/TiO ₂ Relación molar M:A= 30:1	93.8	(Hou & Xie, 2024)
Aceite de canola de semilla verde	T= 180°C P= 4MPa t= 10 h Catalizador= 5.5% (w/w) HPW-MAS-7 Relación molar M:A= 15.5:1	85	(Esmi et al., 2023)
Aceite de cocina usado	T= 60°C t= 60 minutos Catalizador= 5% (w/w)	85	(Khan et al., 2025)



Artículo de revisión

Rojas-Rodríguez et al., 2026

Relación molar M:A= 5:1

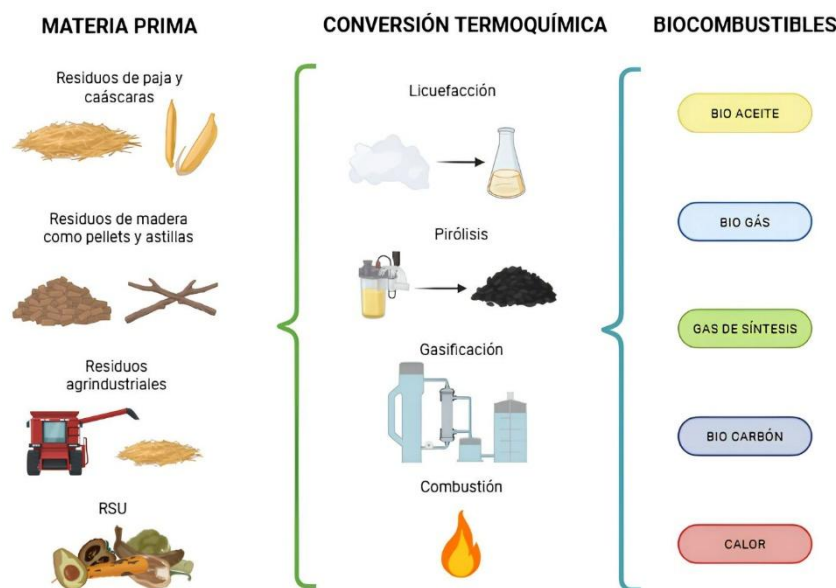


Figura 2. Conversión termoquímica de biomasa en biocombustibles.

3. Procesos de conversión de la bioamasa para la producción de biocombustibles

Existen diversos métodos de conversión para la producción de biocombustibles, como los fisicoquímicos, termoquímicos y químicos, la aplicación de cada uno de estos depende en gran medida del tipo de biomasa que se utilice como materia prima. De forma general todos los procesos consisten en la transformación de la biomasa en energía (El-Araby, 2024).

3.1 Procesos termoquímicos

Los procesos termoquímicos (Figura 2) son aquellos en los que la conversión de la biomasa se lleva cabo mediante el cambio de presiones y temperaturas, provocando el cambio en la estructura celular de la biomasa, entre estos se encuentran:

- Combustión: es un proceso mediante el cual, la biomasa se oxida a temperaturas superiores

y se obtienen gases que se aprovechan para la generación de energía química en forma de calor, energía mecánica o electricidad, dentro de hornos, estufas o calderas. Usualmente se utiliza biomasa proveniente de residuos agrícolas y forestales (El-Araby, 2024).

- Pirólisis: es la descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno y esta ocurre en tres etapas, el proceso inicia con la dosificación de la materia prima, seguida de la transformación de la biomasa y finaliza con la separación de los productos, que son el carbón vegetal, bio aceite, biodiesel y gas de síntesis, mediante diferentes técnicas de separación (Escalante et al., 2022).
- Gasificación: es un proceso que consiste en la transformación de la biomasa sólida en gases útiles en turbinas o motores generadores de electricidad, en un medio con escasez de oxígeno y esta metodología ha surgido como alternativa para la producción de hidrógeno



Artículo de revisión

Rojas-Rodríguez et al., 2026

(H₂) utilizando como materias primas, lodos de depuradora, desechos de alimentos, residuos agrícolas y forestales, además de que este tipo de tecnologías se pueden acoplar a otros procesos de conversión con el propósito de disminuir costos y mejorar rendimientos (Siddiki et al., 2022).

- Licuefacción: es una tecnología que convierte la biomasa en combustibles líquidos mediante licuefacción directa o indirecta la primera se refiere a la conversión de biomasa en bioaceite a través de la fermentación por hidrólisis, mientras que la licuefacción indirecta consiste un proceso y conocido como Fischer-Tropsch utilizando gases de síntesis de la biomasa como recurso principal para producir alcoholes de cadena corta como

metanol, etanol y éter dimetílico (Muritala et al., 2020).

Los medios de conversión que se utilizan en los procesos termoquímicos se basan en tecnologías simples y económicas, además de que la descomposición de la biomasa requiere bajas cantidades de agua y la duración de los tiempos de procesamiento suelen ser relativamente cortos en comparación con los demás procesos, la eficiencia de los métodos depende en gran medida de tres variables principales: el tipo de material lignocelulósico, el contenido inorgánico que tenga la biomasa y la velocidad de calentamiento que tengan los equipos (Poornima et al., 2024)

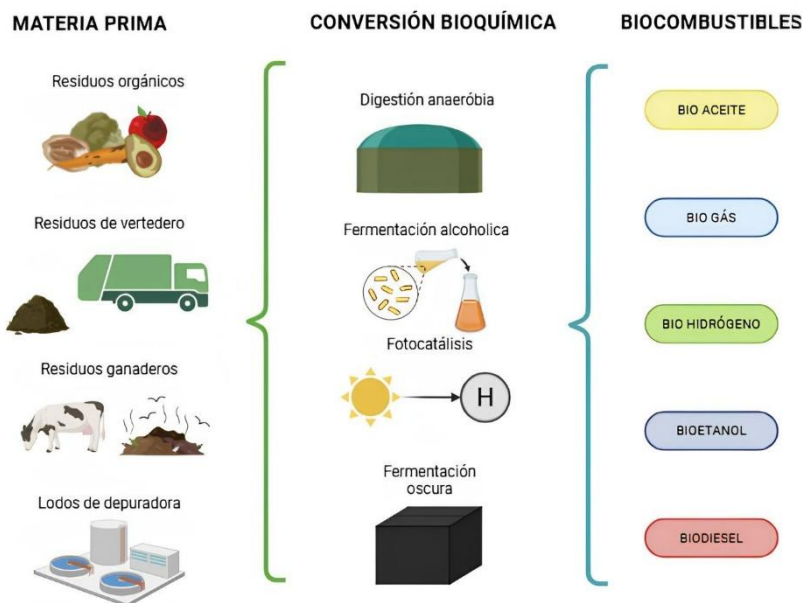


Figura 3. Conversión bioquímica de biomasa en biocombustibles.

3.2 Procesos bioquímicos

Los procesos bioquímicos (Figura 3) se caracterizan por utilizar microorganismos o enzimas capaces de convertir la biomasa en biocombustibles, mediante metodologías

específicas y condiciones determinadas (Poornima et al., 2024).

- Fermentación: es un método utilizado para la producción de bioetanol a partir de biomasa con un alto contenido de azúcares y almidón,



Artículo de revisión

Rojas-Rodríguez et al., 2026

el proceso consiste básicamente en la descomposición de las moléculas de glucosa en piruvato y éste a su vez en etanol utilizando regularmente levaduras como *Saccharomyces cerevisiae* (El-Araby, 2024).

- Digestión anaerobia: es un proceso en el que microorganismos en ausencia de oxígeno, descomponen la biomasa en biogás compuesto principalmente de metano, el cual, se utiliza en la producción de energía eléctrica, mientras que los residuos sólidos que no son consumidos se utilizan como fuente de fertilizante como parte del acondicionamiento de suelos (El-Araby, 2024).
- Transesterificación: es un proceso químico que se utiliza para la producción de biodiesel,

la reacción se lleva a cabo mediante el intercambio de grupos funcionales de ésteres que se encuentran en moléculas oleosas como los triglicéridos y un alcohol de cadena corta como el metanol o etanol, dando como resultado ésteres de alquilo de ácidos grasos y subproductos como agua o glicerol, dependiendo del tipo de aceite que se utilice (Ghosh et al., 2024).

La transformación de la biomasa lignocelulósica se puede llevar a cabo mediante procesos como la hidrólisis enzimática, la fermentación y la digestión anaeróbica, para producir bioetanol, biobutanol o biogás, por otro lado, materias oleosas se pueden transformar en biodiesel o bioaceites, como se muestra en la Tabla 3 (Simasatitkul et al., 2025).

Tabla 3. Conversión de biomasa en biocombustibles mediante diferentes procesos bioquímicos

Tipo de biomasa	Proceso de conversión	Biocombustible	Fuente
Microalgas y bacterias	Digestión anaerobia	Metano	(Odejobi et al., 2024)
Lodos primarios	Digestión anaerobia	Metano	(J. Zhang et al., 2024)
Microalgas	Fermentación	Bioetanol y biobutanol	(Biswal et al., 2024)
Bioresiduos	Fermentación acidogénica	Biometano	(Peña-Picola et al., 2024)
Aceite de cocina usado	Transesterificación	Biodiesel	(Khan et al., 2025)
Ensilado de maíz	Digestión anaerobia	Biogás	(Sun et al., 2023)
RSU	Digestión anaerobia	Biogás	
Estiercol	Biodigestor	Biogás	(Rai et al., 2022)
Vinaza de tequila	Fermentación	Biohidrógeno	(Arellano-García et al., 2021)
Aceite de jatropa	Transesterificación	Biodiesel	(Bansod et al., 2024)
Paja de trigo	Fermentación	Bioetanol	(Hammond & McCann, 2023)
Vinaza de tequila	Fermentación oscura	Hidrógeno y metano	(Sun et al., 2023)

4. Mejora de la producción de biocombustibles mediante la aplicación de tecnologías emergentes

La eficiencia de conversión de la biomasa en biocombustibles se puede llevar a mejorar mediante el uso de tecnologías y metodologías

modificadas o avanzadas (Bukhari et al., 2025). La mejora continua y desarrollo de tecnologías de conversión tiene como principal objetivo mejorar los rendimientos y economizar los procesos mediante el uso de catalizadores, la innovación de reactores y la modificación de las metodologías (El-Araby, 2024).



Artículo de revisión

Rojas-Rodríguez et al., 2026

Múltiples estudios se han dedicado a la investigación de diversos microorganismos capaces de despolimerizar la biomasa lignocelulósica, dicho microorganismos deber tener la capacidad de resistir el medio cuando este se encuentre saturado de sustancias inhibitoras producidas durante la reacción de conversión, por lo que, el mejoramiento de estos microorganismo mediante la combinación de la ingeniería genética, la ingeniería metabólica y la tecnología de ADN, con el propósito de modificar los genes dedicados a la producción de enzimas y la conversión del sustrato, la ingeniería genética se encarga de transformar el sustrato de la biomasa lignocelulósica mediante rutas metabólicas específicas, las cuales, si se modifican con ayuda de la ingeniería genética mejoran sus características que perfeccionen los rendimientos finales del proceso (Poornima et al., 2024).

Por otra parte, la biomasa también se puede aprovechar como catalizador mediante el tratamiento con diversas tecnologías, un estudio llevó a cabo una investigación sobre la eficiente producción de biodiesel utilizando un catalizador heterogéneo derivado de un residuo agrícola, abundante de bajo costo como la vaina de algarroba por calcinación a 500°C durante 4 horas, posterior a eso se llevó a cabo la transesterificación de aceite residual de cocina asistida por microondas, la reacción se realizó con una relación de metanol:aceite de 9.87:1, con un porcentaje de catalizador del 1% en peso, durante 3.03 min a 600W, con lo que se tuvo un consumo energético específico de 0.91 Kwh/Kg y una emisión específica de CO₂ del 0.73 Kg/Kg, lo que indica que la irradiación con microondas mejora la transesterificación, demostrando que esta es una tecnología eficiente, económica y ecológica, el rendimiento final de biodiesel fue del 98.41% y el catalizador se pudo utilizar hasta por 5 ciclos continuos, por consiguiente, se menciona que la biomasa de vaina de algarroba calcinada se puede utilizar como un catalizador heterogéneo para mejorar la producción de biodiesel por transesterificación (Oladipo et al., 2024).

Un estudio realizado para la producción de bioaceite a través de pirólisis, implementó técnicas de modelado de redes neuronales artificiales (RNA) y máquinas de vectores de soporte (SVM) para la optimización de los parámetros operativos del bio-aceite extraído de la cáscara de arroz (RHA), donde las RNA y SVM son herramientas de aprendizaje automático útiles en la optimización de parámetros operativos como como la temperatura, velocidad de calentamiento y tamaño de partícula, los cuales, se basan en la vinculación de los parámetros de entrada y los resultados deseados, basados en datos limitados, de manera que se logre mejorar el proceso en general, las RNA funcionan como un identificador de datos y SVM procesa dichos datos y selecciona los más apropiados para la optimización y con ellos el mejoramiento de los rendimientos enfatizando el uso de metodologías avanzadas (Ahmed et al., 2024). Además de que esta biomasa se puede utilizar como materia prima en una central eléctrica de carbón para la generación de energía (Elem et al., 2023).

Entre diversos estudios realizados se pueden encontrar metodologías modificadas para mejorar la eficiencia y selectividad de los procesos, como el uso de fotocatalizadores para la conversión de biomasa en productos de alto valor, como biocombustibles a base de H₂ y CO, la fotocatalisis es una reacción que utiliza energía lumínica para acelerar las reacciones químicas, este tipo de tecnología radica el fotocatalizador (L. Zhang et al., 2024). La función del fotocatalizador es absorber la energía de la luz y convertirla en energía química la cual será útil para reducir y oxidar el sustrato, logrando así, la degradación de la biomasa lignocelulósica en CO y H₂, esto en condiciones controladas, los fotocatalizadores están hechos a base de metales nobles que pueden llegar a ser tóxicos y costosos, sin embargo, durante los últimos años, un limitado grupo de estudios se ha centrado en el uso de materiales semiconductores como el nitruro de carbono gráfico, el cual se caracteriza por su capacidad de captación de luz, síntesis



Artículo de revisión

Rojas-Rodríguez et al., 2026

simple y su composición libre de metales, por lo que ofrece ser menos costoso y por ende es más aceptable para su uso a gran escala, haciendo que la producción de biocombustibles gaseosos sea más económico y menos contaminante con el ambiente (W. Zhang et al., 2023).

Existen diferentes formas de transformar la biomasa en gas de síntesis, entre estas se encuentran procesos como la pirólisis, la fermentación oscura, la fotofermentación, la fotólisis directa e indirecta, entre otros, sin embargo, los costos totales de estos procesos siguen siendo relativamente costosos, por lo que, la implementación de nuevas tecnologías es indispensable para maximizar la productividad de este tipo de bioenergético, las nuevas tecnologías como el plasma da hincapié hacia nuevas rutas económicas, este tipo de tecnología actúa como agente despolimerizador, ya que constantemente está generando y destruyendo especies reactivas que ayudan a la fragmentación de la estructura celular de la biomasa, lo que facilita la digestión anaerobia y mejora la producción de biogás, al tiempo que evita el uso de agentes químicos corrosivos. Un estudio comparó la producción de H₂ mediante gasificación por plasma, a partir de glicerol y biomasa, entre la que se encontraban residuos forestales, microalgas y residuos agrícolas, con lo que se especificó que los tipos de biomasa no leñosa producían altas cantidades de azufre, en comparación con la biomasa leñosa, además se determinó que la madera de pino es la biomasa que presentó mejores características para su uso en la producción de biogás, debido a que esta presentó una menor cantidad de impurezas durante la gasificación plasmática (Elhambakhsh et al., 2023).

5. Integración de biorrefinerías basadas en el uso de la biomasa

La producción rentable de biocombustibles y productos químicos de alto valor representa una oportunidad significativa para impulsar la innovación, promover la sostenibilidad y fomentar el crecimiento económico y

tecnológico, estos objetivos pueden alcanzarse mediante el desarrollo científico de las biorrefinerías, enfocándose en la optimización del uso de recursos (Patel et al., 2025a). Debido a su compleja estructura, la biomasa necesita tratamientos previos que faciliten el acceso a sus componentes internos, por ello, el pretratamiento se considera un paso fundamental en la viabilidad de una biorrefinería, ya que de esta forma se garantiza el aprovechamiento de la biomasa, una vez completado este proceso, se procede con la producción de los biocombustibles mediante la aplicación de tecnologías sostenibles (Ge et al., 2025).

El concepto de biorrefinería se deriva de la conversión de biomasa residual en varios productos de alto valor agregado, por medio del uso de diferentes tecnologías, las cuales tiene como propósito obtener altos rendimientos al tiempo que generen la mínima cantidad de residuos, los procesos de biorrefinería de biomasa conocidos son el fraccionamiento y un proceso híbrido integrado, el primero consiste en la producción de biocombustibles a partir de los componentes de un tipo de biomasa, por ejemplo, una biorrefinería convirtió el jugo de sorgo dulce, obtenido del tallo, en etanol por medio de fermentación mientras que el bagazo lo pretrató enzimáticamente para después fermentarlos y producir biobutanol, finalmente se determinó que de 16 toneladas de tallo de sorgo dulce se puede obtener aproximadamente 1 litro de etanol, mientras que del bagazo se produjeron cerca de 0.35 toneladas de biobutanol, definiendo que este tipo de biomasa residual tiene potencial como materia prima dentro de una biorrefinería, ya que si es tratada mediante diversos procesos de conversión, ya sea químico, termoquímico o biológico generará productos de alto valor económico (Patel et al., 2025b).

Por otro lado, un proceso de biorrefinería híbrido integrado combina tecnologías térmicas y biológicas para optimizar la producción de biocombustibles, un estudio realizó la simulación tecnoeconómica en ASPEN Plus, con el objetivo



Artículo de revisión

Rojas-Rodríguez et al., 2026

de simular y optimizar el proceso industrial de una biorrefinería, utilizando como materia prima sorgo dulce (sorgo lipídico) y caña de azúcar (caña lipídica), la simulación utilizó el hidrolizado para realizar fermentaciones con diferentes condiciones, dando lugar a productos como acetona, butanol, etanol y lípidos, la integración del proceso mostros rendimientos a partir de los componentes lipídicos de la caña y el sorgo que podrían ser utilizados como biocombustible para aviones, destacando que los tiempos de operación podrían mejorar año con año de 200 a 320 días, por lo que sería posible la reducción de los precios de venta, aproximadamente un 30%, además se integró una instalación de biogás y los datos arrojaron que la planta integrada como biorrefinería podría producir 92% de bioetanol y 80% de metano, definiendo que la producción integrada de bioetanol y biogás dentro de una biorrefinería a pequeña escala sería capaz de proporcionar bicombustibles y energía utilizando sorgo dulce y caña de azúcar, representando una alternativa viable para el suministro de energía descentralizado (Stamenković et al., 2020).

6. Conclusión

La conversión de biomasa mediante los diferentes procesos tecnológicos constituye una alternativa técnicamente viable para la diversificación de la matriz energética de manera que se logre reducir la dependencia energética hacia los combustibles fósiles, las tecnologías emergentes permiten aprovechar una amplia variedad de residuos orgánicos, agrícolas, forestales y urbanos, optimizando los recursos al tiempo que disminuyen el impacto ambiental relacionado con la generación de energía. Además, su implementación fomenta el desarrollo de una economía circular sostenible. La eficiencia de los procesos depende de factores como la composición de la biomasa, condiciones de operación y la integración de tecnologías complementarias, lo que da hincapié a la innovación de sistemas de producción más sostenibles, escalables y fácilmente adaptables a las necesidades, dentro de biorrefinerías, por lo que, en conjunto, estos métodos ofrecen soluciones estratégicas para alcanzar un patrón

energético más limpio, resiliente y económicamente accesible.

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: 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.

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 LGRR, VETG, AMO y MBAV, realizaron búsquedas exhaustivas en bases de datos académicas sobre la valorización de residuos mediante la convergencia de procesos convencionales y tecnologías disruptivas, seguido de la selección y filtrado crítico de las fuentes pertinentes. Posteriormente, compilaron las estrategias de optimización que incrementan la eficiencia operativa, facilitando la transición hacia modelos de biorrefinería sostenible.



Artículo de revisión

Rojas-Rodríguez et al., 2026

Todos los autores leyeron y aprobaron la versión final del manuscrito.

Referencias

1. Ahmed, A., Yub Harun, N., Waqas, S., Arshad, U., & Ghalib, S. A. (2024). Optimization of Operational Parameters Using Artificial Neural Network and Support Vector Machine for Bio-oil Extracted from Rice Husk. *ACS Omega*, 9(24), 26540–26548. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c03131>
2. Arellano-García, L., Velázquez-Fernández, J. B., Macías-Muro, M., & Marino-Marmolejo, E. N. (2021). Continuous hydrogen production and microbial community profile in the dark fermentation of tequila vinasse: Response to increasing loading rates and immobilization of biomass. *Biochemical Engineering Journal*, 172. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.108049>
3. Bansod, S. P., Makwana, K., Sarangi, P. K., & Parikh, J. K. (2024). Advanced pretreatment processes for lignocellulosic biomass to biofuels production: Path towards circular bioeconomy. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 39. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101514>
4. Biswal, T., Shadangi, K. P., & Sarangi, P. K. (2024). Algae biofuel production techniques: Recent advancements. In *Biorefineries: Production of Fuels and Platform Chemicals*. <https://doi.org/10.1002/9781119724872.ch6>
5. Bouter, A., Duval-Dachary, S., & Besseau, R. (2024). Life cycle assessment of liquid biofuels: What does the scientific literature tell us? A statistical environmental review on climate change. *Biomass and Bioenergy*, 190, 107418. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2024.107418>
6. Bukhari, I., Haq, F., Kiran, M., Aziz, T., Mehmood, S., & Haroon, M. (2025). Lignocellulosic biomass as a renewable resource: Driving second-generation biofuel innovation from agricultural waste. *Biomass and Bioenergy*, 201, 108133. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2025.108133>
7. Chakraborty, S., & Dutta, H. (2022). Genetic modification for 4G biofuel production. In *Genetically Modified Crops and Food Security: Commercial, Ethical and Health Considerations*. <https://doi.org/10.4324/9781003278566-13>
8. El-Araby, R. (2024). Biofuel production: exploring renewable energy solutions for a greener future. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 17(1), 129. <https://doi.org/10.1186/s13068-024-02571-9>
9. Elem, I. M., Nnamdi, N. Mishark., Elem, I. N., Emeka, N., & Pius, O. (2023). Estimation of the Electrical Energy Potential of Rice Husk Biomass Generated within Ebonyi State, South Eastern Nigeria. *Biotechnology Journal International*, 27(5). <https://doi.org/10.9734/bji/2023/v27i5699>
10. Elhambakhsh, A., Van Duc Long, N., Lamichhane, P., & Hessel, V. (2023). Recent progress and future directions in plasma-assisted biomass conversion to hydrogen. In *Renewable Energy* (Vol. 218). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119307>
11. Escalante, J., Chen, W. H., Tabatabaei, M., Hoang, A. T., Kwon, E. E., Andrew Lin, K. Y., & Saravanakumar, A. (2022). Pyrolysis of lignocellulosic, algal, plastic, and other biomass wastes for biofuel production and circular bioeconomy: A review of thermogravimetric analysis (TGA) approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112914>
12. Esmi, F., Dalai, A. K., & Hu, Y. (2023). Optimization and kinetic studies of 12-



Artículo de revisión

Rojas-Rodríguez et al., 2026

- tungstophosphoric supported mesoporous aluminosilicate through response surface methodology for biodiesel production using green seed canola oil. *Fuel*, 348. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128594>
13. Ge, L., Ali, M. M., Osman, A. I., Elgarahy, A. M., Samer, M., Xu, Y., & Liu, Z. (2025). A critical review on conversion technology for liquid biofuel production from lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 217, 115726. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2025.115726>
 14. Ghosh, N., Patra, M., & Halder, G. (2024). Current advances and future outlook of heterogeneous catalytic transesterification towards biodiesel production from waste cooking oil. In *Sustainable Energy and Fuels* (Vol. 8, Issue 6). <https://doi.org/10.1039/d3se01564e>
 15. Hammond, G. P., & McCann, N. (2023). Bioethanol processing from wheat straw: investment appraisal of a full-scale UK biofuel refinery. *Biofuels*, 14(3). <https://doi.org/10.1080/17597269.2022.2132722>
 16. 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. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2024.118273>
 17. Islam, Md. S., Fuad, M. Md. N., Malitha, S. B., & Alam, Md. Z. (2025a). Advanced biofuels research: A Scopus database-driven bibliometric evaluation and future directions forecast via machine learning and deep learning. *Cleaner Chemical Engineering*, 11, 100188. <https://doi.org/10.1016/J.CLCE.2025.100188>
 18. Islam, Md. S., Fuad, M. Md. N., Malitha, S. B., & Alam, Md. Z. (2025b). Advanced biofuels research: A Scopus database-driven bibliometric evaluation and future directions forecast via machine learning and deep learning. *Cleaner Chemical Engineering*, 11, 100188. <https://doi.org/10.1016/J.CLCE.2025.100188>
 19. Kasirajan, R. (2021). Biodiesel production by two step process from an energy source of *Chrysophyllum albidum* oil using homogeneous catalyst. *South African Journal of Chemical Engineering*, 37, 161–166. <https://doi.org/10.1016/J.SAJCE.2021.05.011>
 20. Khan, M. A., Sheikh, N. A., Jadoon, K. Z., Ayub, A., Awotwe, T. W., & Tariq, R. (2025). Utilization of locally sourced waste fats for biodiesel production: Experimental characterization and environmental life cycle assessment. *Biomass and Bioenergy*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107692>
 21. Liang, K. (2024). Second-Generation Biofuels: Utilization of Agricultural Waste and Non-food Parts. *Journal of Energy Bioscience*. <https://doi.org/10.5376/jeb.2024.15.0026>
 22. Mahmood, T., Hussain, N., Shahbaz, A., Mulla, S. I., Iqbal, H. M. N., & Bilal, M. (2023). Sustainable production of biofuels from the algae-derived biomass. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 46(8). <https://doi.org/10.1007/s00449-022-02796-8>
 23. Mansy, A. E., Daniel, S., Fonzeu Monguen, C. K., Wang, H., Osman, A. I., & Tian, Z.-Y. (2025). Catalytic production of aviation jet biofuels from biomass: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 23(2), 419–461. <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01806-3>
 24. Monika, Banga, S., & Pathak, V. V. (2023). Biodiesel production from waste cooking oil: A comprehensive review on the application of heterogenous catalysts. *Energy Nexus*, 10,



Artículo de revisión

Rojas-Rodríguez et al., 2026

100209.
<https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100209>
25. Muritala, I. K., Guban, D., Roeb, M., & Sattler, C. (2020). High temperature production of hydrogen: Assessment of non-renewable resources technologies and emerging trends. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(49), 26022–26035. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2019.08.154>
26. Naseef, H. H., & Tulaimat, R. H. (2025). Transesterification and esterification for biodiesel production: A comprehensive review of catalysts and palm oil feedstocks. *Energy Conversion and Management: X*, 26, 100931. <https://doi.org/10.1016/J.ECMX.2025.100931>
27. Odejobi, O. J., Ajala, O. O., & Osuolale, F. N. (2024). Review on potential of using agricultural, municipal solid and industrial wastes as substrates for biogas production in Nigeria. In *Biomass Conversion and Biorefinery* (Vol. 14, Issue 2). <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02613-y>
28. Oladipo, B., Qasana, S., Zini, S. C., Menemene, N., & Ojumu, T. V. (2024). Microwave-assisted biodiesel synthesis from waste cooking oil: Exploring the potential of carob pod-derived solid base catalyst. *Fuel Processing Technology*, 266, 108161. <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2024.108161>
29. Patel, R., Rajaraman, T. S., Rana, P. H., Ambegaonkar, N. J., & Patel, S. (2025a). A review on techno-economic analysis of lignocellulosic biorefinery producing biofuels and high-value products. *Results in Chemistry*, 13, 102052. <https://doi.org/10.1016/J.RECHEM.2025.102052>
30. Patel, R., Rajaraman, T. S., Rana, P. H., Ambegaonkar, N. J., & Patel, S. (2025b). A review on techno-economic analysis of lignocellulosic biorefinery producing biofuels and high-value products. In *Results in Chemistry* (Vol. 13). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.102052>
31. Peña-Picola, S., Serra-Toro, A., Da Silva, C., Peces, M., Jordán, M., Vila, J., Grifoll, M., Valentino, F., Astals, S., & Dosta, J. (2024). Acidogenic fermentation of biowaste coupled with nitrogen recovery using selective membranes to produce a VFA-rich liquid with a high C/N ratio. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(2). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112352>
32. Poornima, S., Manikandan, S., Prakash, R., Deena, S. R., Subbaiya, R., Karmegam, N., Kim, W., & Govarthanam, M. (2024). Biofuel and biochemical production through biomass transformation using advanced thermochemical and biochemical processes – A review. *Fuel*, 372, 132204. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2024.132204>
33. Rai, A. K., Al Makishah, N. H., Wen, Z., Gupta, G., Pandit, S., & Prasad, R. (2022). Recent Developments in Lignocellulosic Biofuels, a Renewable Source of Bioenergy. In *Fermentation* (Vol. 8, Issue 4). <https://doi.org/10.3390/fermentation8040161>
34. Saleem, A., Hussain, A., Chaudhary, A., Ahmad, Q.-A., Iqtedar, M., Javid, A., & Akram, A. M. (2022). Acid hydrolysis optimization of pomegranate peels waste using response surface methodology for ethanol production. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(5), 1513–1524. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01117-x>
35. Siddiki, S. Y. A., Mofijur, M., Kumar, P. S., Ahmed, S. F., Inayat, A., Kusumo, F., Badruddin, I. A., Khan, T. M. Y., Nghiem, L. D., Ong, H. C., & Mahlia, T. M. I. (2022). Microalgae biomass as a sustainable source for biofuel, biochemical and biobased value-



Artículo de revisión

Rojas-Rodríguez et al., 2026

- added products: An integrated biorefinery concept. *Fuel*, 307, 121782. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2021.121782>
36. Sikiru, S., Abioye, K. J., Adedayo, H. B., Adebukola, S. Y., Soleimani, H., & Anar, M. (2024). Technology projection in biofuel production using agricultural waste materials as a source of energy sustainability: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 200, 114535. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2024.114535>
37. Simasatitkul, L., Amornraksa, S., Assabumrungrat, S., & Anantpinijwatna, A. (2025). Biochemical conversion processes in biofuel production. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-34088-8.00013-6>
38. Stamenković, O. S., Siliveru, K., Veljković, V. B., Banković-Ilić, I. B., Tasić, M. B., Ciampitti, I. A., Đalović, I. G., Mitrović, P. M., Sikora, V., & Prasad, P. V. V. (2020). Production of biofuels from sorghum. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 124). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109769>
39. Sun, H., Shi, K., Ding, H., Ding, C., Yang, Z., An, C., Jin, C., Liu, B., Zhong, Z., Xiao, X., & Hou, F. (2023). The effect of biogas slurry application on biomass production and the silage quality of corn. *Animal Bioscience*, 36(12). <https://doi.org/10.5713/ab.23.0129>
40. Trypolska, G. (2024). Unlocking the potential: Key factors shaping the liquid biofuels market in Ukraine. *Heliyon*, 10(22), e40420. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2024.E40420>
41. Zamathula Queen Sikhakhane Nwokediegwu, Kenneth Ifeanyi Ibekwe, Valentine Ikenna Ilojiana, Emmanuel Augustine Etukudoh, & Olushola Babatunde Ayorinde. (2024). Renewable energy technologies in engineering: a review of current developments and future prospects. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(2), 367–384. <https://doi.org/10.51594/estj.v5i2.800>
42. Zhang, J., Zhang, T., Zhang, R., Liu, Z., Ouyang, C., Zhang, Z., Zhou, L., & Guo, Y. (2024). Pyrolysis Characteristics of Anaerobic Biogas Solid Residue from Kitchen Waste. *Waste and Biomass Valorization*, 15(2). <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02232-2>
43. Zhang, L., Choo, S. R., Kong, X. Y., & Loh, T. P. (2024). From biomass to fuel: Advancing biomass upcycling through photocatalytic innovation. In *Materials Today Chemistry* (Vol. 38). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2024.102091>
44. Zhang, W., Wang, C., Luo, B., He, P., Li, L., & Wu, G. (2023). Biodiesel production by transesterification of waste cooking oil in the presence of graphitic carbon nitride supported molybdenum catalyst. *Fuel*, 332, 126309. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2022.126309>