

Bioetanol, biodiésel y biogás: materias primas, procesos de producción y aplicaciones

Bioethanol, biodiesel, and biogas: raw materials, production processes, and applications

Gonzalo Martínez-Barrera ^a, Miguel Martínez-López ^{b*}, Antonio Téllez-López ^b

^a Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Química, Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA), Km. 12 de la carretera Toluca-Atlacomulco, San Cayetano 50200, Toluca, Estado de México, México.

^b Universidad Politécnica del Valle de Toluca, División de Ingeniería Industrial e Ingeniería en Energía, Carretera Toluca-Almoloya de Juárez km. 5.6, Santiaguito Tlalcilcali 50904, Almoloya de Juárez, Estado de México, México.

Correspondencia para autor: Miguel Martínez-López
Universidad Politécnica del Valle de Toluca
Correo electrónico: miguel.martinez@upvt.edu.mx

Resumen

Para satisfacer los requerimientos energéticos de las actividades humanas y diferentes industrias se usan cantidades grandes de combustibles fósiles, esto causa problemas ambientales graves. Por lo anterior, se han buscado combustibles alternativos para ser mezclados con combustibles convencionales; así, las mezclas pueden ser amigables con el ambiente, ayudar a la descarbonización de las industrias y a la transición energética. Las opciones como combustibles amigables con el ambiente son los biocombustibles líquidos (como el bioetanol y biodiésel) y gaseosos (biogás), los cuales son producidos a partir de biomasa. De acuerdo con la materia prima utilizada para su producción, estos combustibles se clasifican en biocombustibles de primera, segunda y tercera generación. Los primeros son producidos a partir de cultivos alimentarios como el maíz, caña de azúcar y trigo. Los biocombustibles de segunda generación utilizan desechos agroindustriales, residuos animales y biomasa de cultivos energéticos como materia prima, mientras que los de tercera generación se producen a partir de algas y microalgas. El bioetanol se mezcla con gasolinas en diferentes porcentajes para usar el producto como combustible en vehículos ligeros y de transporte mientras que el biodiésel no necesita ser mezclado para ser utilizado en vehículos pesados. Por otro lado, el biogás puede sustituir al gas natural en aplicaciones domésticas o industriales. Además, el bioetanol y el biogás pueden ser utilizados como materia prima en otras industrias.

Palabras clave: bioetanol, biodiésel, biogás, biomasa.

Abstract

To meet the energy requirements of human activities and different industries, large amounts of fossil fuels are consumed, which has brought serious environmental problems. Therefore, alternative fuels have been sought that can be mixed with conventional fuels, that are friendly to the environment, help decarbonize industries, and the energy transition. One option is liquid biofuels (such as bioethanol and

biodiesel) and gaseous (biogas) which are produced from biomass. According to the raw material used for their production, these fuels are classified as first, second, and third generation biofuels. The former is produced from food crops such as corn, sugar cane, and wheat. Second-generation biofuels use agro-industrial waste, animal residues, and energy crops as feedstock, while third-generation biofuels are produced from algae and microalgae. Bioethanol is mixed with gasoline in different percentages to be used as fuel in light and transport vehicles, while biodiesel does not need to be mixed to be used in heavy vehicles. On the other hand, biogas can replace natural gas in domestic or industrial applications. Furthermore, bioethanol and biogas can be used as feedstock in other industries.

Keywords: bioethanol, biodiesel, biogas, biomass.

Introducción

La Revolución Industrial trajo consigo un proceso de transformación económica, social y tecnológica, y también marcó el inicio de un uso excesivo de combustibles fósiles y contaminación del ambiente. La invención de la máquina de vapor y, posteriormente, el motor de combustión interna y la energía eléctrica condujeron a la extracción y combustión de cantidades grandes de carbón e hidrocarburos, cantidades que han ido incrementándose hasta nuestros días.

Según datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), las emisiones globales de bióxido de carbono (CO₂) hacia la atmosfera relacionadas con la producción de energía se han incrementado considerablemente en los últimos 30 años; en 1990 y 2000, las emisiones fueron 20.5 y 23.1 Gt, respectivamente; mientras que en 2010 se emitieron 30.4 Gt. La recuperación económica en 2021 trajo consigo un incremento de demanda de carbón, petróleo y gas natural. En consecuencia, las emisiones alcanzaron 33.0 Gt, valor 61% mayor

que el asociado a 1990 (IEA,2022). Esta tendencia al alza va en contra de los compromisos establecidos para alcanzar un desarrollo sostenible y reducir a cero las emisiones de gases de efecto invernadero en 2050, objetivo establecido en 2021 en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP26) (ONU, 2022).

La contaminación del aire debido a la demanda creciente y al uso de combustibles fósiles, ha provocado problemas ambientales y de salud. Uno de los principales problemas es el cambio climático originado por el calentamiento global y la degradación ambiental (Wang y col., 2017; Zhao y col., 2022). Entre las fuentes principales de contaminación del aire se encuentran los vehículos motorizados, centrales eléctricas y las industrias, entre ellas, las de transporte y cementera. Estas industrias son responsables de la mayor parte de emisión de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxidos de nitrógeno (NO_x), gases fluorados, óxidos de azufre (SO_x) y partículas) (Kazemi y col., 2019).

Además de los problemas ambientales ya mencionados, otra problemática a la que conlleva el uso de combustibles fósiles es su disponibilidad; lo anterior se debe al agotamiento de las reservas y al incremento de los costos de extracción. Esto genera problemas económicos en los países, entre ellos, incrementos de las tasas de inflación. Por estas razones se ha buscado la sustitución gradual y estratégica de combustibles fósiles por energía de fuentes renovables como la eólica, solar, geotérmica e hidroeléctrica. Los inconvenientes de estas energías son su almacenamiento y transporte; por lo tanto, los biocombustibles se han convertido en una opción muy atractiva (Mitra y col., 2021; Paravantis, 2022). Entonces, el objetivo de este trabajo es presentar las materias primas, procesos de producción y las principales aplicaciones del bioetanol, biodiésel y biogás.

1. Biomasa

Biomasa se define como cualquier material orgánico renovable de origen vegetal o animal. Con base en su fuente, la biomasa puede ser clasificada en tres grandes grupos: vegetal, microbiana y residual.

La biomasa de origen vegetal es recurso que incluye materias primas forestales y residuos agrícolas. Estas se pueden clasificar en materias primas de primera y segunda generación. Entre las primeras se encuentran azúcar y almidón (materias provenientes de caña de azúcar, maíz, sorgo, trigo, remolacha y trigo), y aceites de semillas oleaginosas (girasol, soja, colza, jatrofa, palma y coco). La materia prima de segunda generación se refiere a biomasa lignocelulósica como árboles, residuos de cultivos agrícolas y pastos (Ilham, 2022).

La biomasa de origen microbiano se refiere a lípidos producidos por microorganismos oleaginosos (bacterias, microalgas, hongos y levaduras), los cuales pueden ser utilizados como materia prima para la producción de biodiésel, bioetanol y bioaceites (Leong y col., 2018).

La biomasa proveniente de residuos se refiere a desechos de origen animal (grasas de reses, pescados, aves y cerdos) y vegetal (aceites vegetales usados), así como a residuos sólidos urbanos provenientes de aguas residuales (Ilham, 2022).

La biomasa puede ser convertida en energía mediante cuatro formas. principalmente:

- a) combustión directa, i.e. quema de la biomasa para producir calor.
- b) conversión termoquímica, i.e. pirólisis y gasificación para la producción de biocombustibles sólidos (carbón vegetal), líquidos (bioaceite y diésel) y gaseosos (metano y gas de síntesis).

- c) conversión química, i.e. transesterificación para producción de biocombustibles líquidos (biodiésel).
- d) conversión biológica, i.e. fermentación y digestión anaeróbica para producir biocombustibles líquidos (etanol) y gaseosos (metano).

1.1 Composición de la biomasa

- Azúcares fermentables. Estos incluyen glucosa, xilosa, arabinosa, galactosa y manosa.
- Almidón. Este consiste principalmente de D-glucosa que forma amilosa y amilopectina. El primero es un polímero lineal de D-glucopiranososa unido con un enlace glucosídico α -1,4, mientras que el segundo es un polímero ramificado con un enlace glucosídico α -1,4 lineal y con ramificaciones conectadas por enlaces glucosídicos α -1,6.
- La biomasa de origen vegetal está constituida principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. El porcentaje de cada componente depende de múltiples factores como la especie, zona geográfica y clima, entre otros factores.
- Celulosa. Esta es el componente principal de las paredes celulares de las plantas. La celulosa es una cadena polimérica formada por la unión de moléculas de β -D-glucosa unidas mediante β -1,4-O-glucosídico. Sus cadenas se agrupan para formar microfibrillas, que a su vez forman fibras de celulosa, las cuales pueden presentarse en forma amorfa o semicristalina.
- Hemicelulosa. Esta es el segundo componente más abundante de la pared celular de los vegetales y constituye entre el 20 y 50% de la biomasa lignocelulósica. La hemicelulosa es un polisacárido de cadenas largas y cuenta con cadenas laterales de diferentes tipos de monosacáridos, entre ellos, pentosas, hexosas y ácidos urónicos.

- Lignina. Este compuesto es el más complejo de los componentes de la biomasa. La lignina contiene polímeros reticulados de monómeros fenólicos; los monómeros de lignina son tres alcoholes fenilpropiónicos (alcoholes sinapílico, cumárico y coniferílico), los cuales son unidos por enlaces éter alquil-arilo, alquil-alquilo y aril-arilo. La lignina es parte integral de las paredes celulares de las plantas y actúa como “aglutinante” que mantiene unido a los componentes de la biomasa lignocelulósica. Además, la lignina protege a las plantas de ataques de microorganismos y estrés oxidativo (Ilham, 2022; Boro y col., 2022; Ward, 2020).

2. Biocombustibles

Con base en la materia prima que se usa para su producción, los biocombustibles se pueden clasificar en cuatro grandes grupos: primera, segunda, tercera y cuarta generación.

Los biocombustibles de primera generación se producen a partir de cultivos alimentarios como la caña de azúcar, colza, maíz y otros. El bioetanol se produce a partir de la fermentación de almidón o azúcares, mientras que el biodiésel a partir de la transesterificación biomasa de cultivos oleaginosos (e.g. soja, aceite de palma). El inconveniente principal de estos combustibles es el incremento de los precios de los alimentos debido a las cantidades de cultivos que se destinan a la producción de biocombustibles (Ward, 2020; Naik y col., 2010).

Los biocombustibles de segunda generación se producen a partir de cultivos no alimentarios (e.g. cultivos energéticos como remolacha, sorgo, girasol y jatrofa) y materias primas no comestibles, entre ellas, desechos agrícolas, desechos industriales (glicerol), residuos sólidos municipales, estiércol, grasas de origen

animal (res, pescado, cerdo y ave). Estos combustibles se producen mediante conversión química y biológica (Ward, 2020; Naik y col., 2010).

Los biocombustibles de tercera generación se producen a partir de microalgas o microbios fotosintéticos; mediante estas materias primas se puede producir bioetanol, biodiésel y biohidrógeno. Los biocombustibles de tercera generación tienen muchas expectativas debido al contenido grande de lípidos de este tipo de biomasa, capacidad de fijación de CO₂ y tasa de crecimiento de las microalgas (Ward, 2020; Debnath y col., 2021).

Los biocombustibles de cuarta generación se producen mediante ingeniería biomimética por la disociación de la molécula de agua en oxígeno e hidrógeno por fotosíntesis artificial (Ward,2020).

3. Bioetanol

El bioetanol es el biocombustible más conocido, y ya es producido a escala comercial. Este biocombustible es una alternativa para sustituir parcialmente a combustibles líquidos producidos a partir de fuentes fósiles. El bioetanol se puede obtener mediante una gran variedad de tecnologías y materias primas; por esta razón, el bioetanol puede ser de primera, segunda y tercera generación.

3.1 Bioetanol de primera generación

La producción de bioetanol de primera generación utiliza materia de cultivos alimentarios, entre ellos, a) biomasa con contenido grande de azúcares: caña de azúcar, sorgo dulce y remolacha azucarera, y b) biomasa con contenido grande de almidón: maíz, trigo y tubérculos como la mandioca y papa.

En la literatura existe una gran variedad de métodos y procesos para la producción de bioetanol de primera generación basados en la fermentación anaerobia y aeróbica (Naik y col., 2010; Melendez y col., 2022). El proceso industrial de producción de bioetanol a partir de materias primas de primera generación se muestra en la Figura 1.

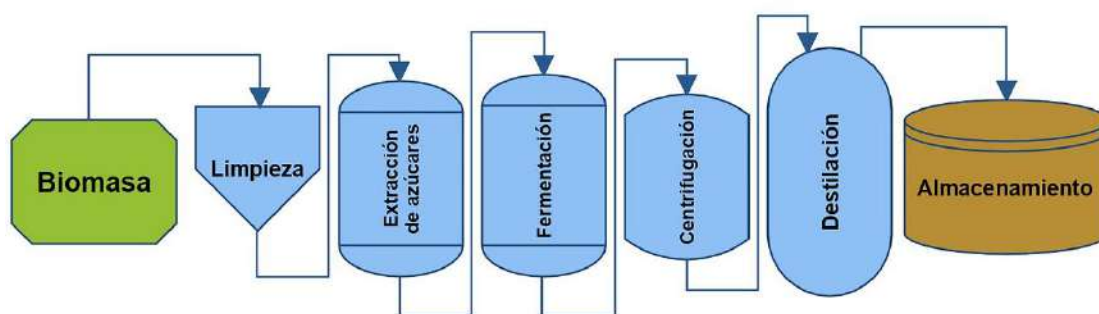


Figura 1. Proceso industrial de producción de bioetanol de primera generación.

Fuente: elaboración propia.

Este proceso comprende de tres pasos principalmente:

- 1) Pretratamiento. Esta etapa depende del tipo de materia prima que se usa, pero existen procesos comunes como lavado, molienda, prensado, separación del jugo y fracción sólida y tratamientos fisicoquímicos. Si se usa materia prima amilácea, la hidrólisis química o enzimática debe llevarse a cabo.
- 2) Fermentación. Los azúcares (hexosas) se convierten en etanol por medio de microorganismos de acuerdo con la siguiente reacción: $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3CH_2OH + 2CO_2$. En este proceso la temperatura, oxígeno y pH son determinantes para alcanzar rendimientos máximos.
- 3) Destilación. La mezcla que sale del fermentador contiene hasta 8% en peso de etanol. Esta mezcla pasa a una primera destilación donde el vapor que sale de la columna alcanza hasta 45% de bioetanol. Posteriormente, la

mezcla es sometida a dos procesos más de destilación para producir etanol con un 96.5% de pureza (Naik y col., 2010; Melendez y col., 2022).

En la actualidad, los productores principales de etanol son a) Estados Unidos de América: 52 mil millones de litros, b) Brasil: 30 mil millones de litros, c) Unión Europea: 4.7 mil millones de litros y d) China: 3.3 mil millones de litros. Las materias primas más utilizadas para la producción de este combustible son maíz, trigo, caña de azúcar, yuca y arroz, es decir, biomasa de primera generación (IEA, 2022).

La sustitución de gasolina con bioetanol de primera generación disminuye la producción de gases de efecto invernadero, pero el uso de materia de cultivos alimentarios para la producción de combustibles implica una competencia entre esta industria y la alimentaria ya que agua y superficie de cultivo no son recursos ampliamente disponibles. Además, problemas como la pérdida de la biodiversidad y cambios en el uso del suelo propician que se revise la sustentabilidad y sostenibilidad de los biocombustibles de primera generación.

3.2 Bioetanol de segunda generación

La producción a gran escala de bioetanol de primera generación tiene impactos ambientales y puede generar una competencia entre la industria alimentaria y de biocombustibles. Con el fin de disminuir estos problemas, materias primas nuevas se han buscado para incrementar la viabilidad del bioetanol. La biomasa no alimentaria como madera, bagazo, paja, pasto, tallos, hojas y desechos agroindustriales han adquirido relevancia en los últimos 30 años (Naik y col., 2010; Gandam y col., 2022). Esta biomasa está compuesta principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina. Esta última puede ser eliminada y utilizada para producir calor de proceso en la conversión del bioetanol.

La biomasa de segunda generación para la producción de etanol tiene ventajas frente a los cultivos alimentarios; entre ellas, su abundancia ya que son productos de desechos agroindustriales o materiales de cultivos energéticos (no alimentarios) que pueden ser producidos en áreas que no son aptas para otros cultivos, además de que requieren menos energía y recursos para su producción.

El proceso industrial de producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica (bioetanol de segunda generación) se muestra en la Figura 2.

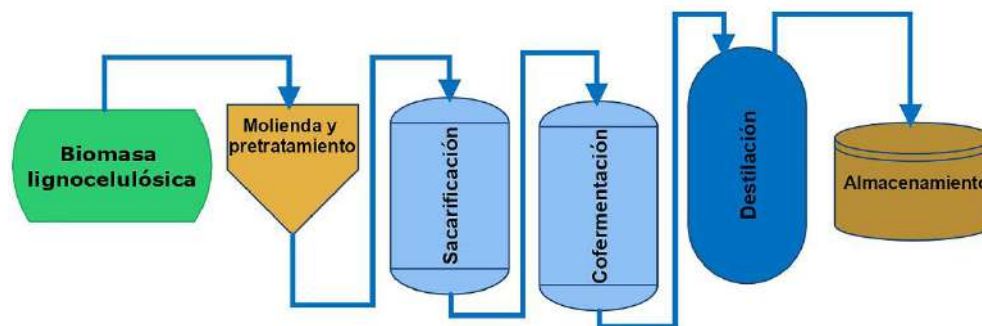


Figura 2. Proceso industrial de producción de bioetanol de segunda generación.

Fuente: elaboración propia.

Este proceso consiste en transformar los polímeros complejos de la biomasa lignocelulósica en azúcares simples, los cuales serán fermentados por los microorganismos. Los pasos principales son los siguientes:

- 1) Molienda mecánica. El objetivo de este proceso es reducir el tamaño de partícula de la biomasa mediante molinos de cuchillas o de martillos.
- 2) Pretratamientos fisicoquímicos. Este paso tiene como objetivo separar la materia prima en sus componentes (celulosa, hemicelulosa y lignina) y disminuir el porcentaje de cristalinidad de la celulosa para facilitar la formación de los azúcares que serán fermentados, así como evitar la degradación de los carbohidratos.

- 3) Hidrólisis enzimática. Este proceso convierte a la celulosa en azúcares fermentables mediante levaduras o bacterias.
- 4) Sacarificación y fermentación simultánea. Los azúcares producidos en la hidrólisis o sacarificación se fermentan simultáneamente y producen etanol. Este proceso incrementa la tasa de producción de bioetanol debido a la asimilación rápida de los azúcares por la levadura y menor contaminación. Otra opción es la sacarificación y cofermentación simultánea. Así, los azúcares liberados durante el pretratamiento y la hidrólisis (hexosas y pentosas) se asimilan (Naik y col., 2010; Gandam y col., 2022).

En Estados Unidos de América, al menos el 98% de la gasolina contiene bioetanol en diferentes concentraciones con el fin de oxigenar el combustible y con ello disminuir la contaminación del aire (U.S. Department of Energy, 2022).

3.3 Bioetanol de tercera generación

El bioetanol de tercera generación se produce a partir de microalgas (organismos unicelulares) y macroalgas (multicelulares). Entre las primeras se encuentran microalgas verdes, doradas y diatomeas. Por otro lado, entre las macroalgas (algas marinas) están las algas pardas, rojas y verdes. Esta materia prima tiene ventajas frente a biomasa usada para la producción de etanol de primera y segunda generación, entre ellas, tasas de crecimiento mayores que la de materia de plantas terrestres, capacidad de sobrevivir a ambientes adversos, contenidos grandes de carbohidratos y lípidos, disponibilidad grande y capacidad importante de absorción de dióxido de carbono. Además, a diferencia de la biomasa lignocelulósica, las algas carecen de lignina, lo que facilita la conversión de azúcares en bioetanol (Melendez y col., 2022; Del Río y col., 2019). El proceso de producción de bioetanol a partir de algas se muestra en la Figura 3.



Figura 3. Proceso de producción de bioetanol de tercera generación.

Fuente: elaboración propia.

La producción de bioetanol a partir de microalgas consta de cinco etapas principales:

- 1) Cultivo. Esta etapa se lleva a cabo en fotobiorreactores y en sistemas de cosecha y secado.
- 2) Cosecha y secado. Esta etapa se puede llevar a cabo en dos pasos. Primero se separan las microalgas de la suspensión a granel mediante métodos de separación como flotación, floculación y sedimentación. El segundo paso consiste en espesar el lodo de algas mediante centrifugación y filtración.
- 3) Pretratamientos y sacarificación. Las microalgas son sometidas a tratamientos físicos, químicos y biológicos para romper las membranas celulares y liberar los carbohidratos los cuales serán convertidos en azúcares fermentables mediante sacarificación. Los pretratamientos químicos (en medio ácido o básico) son los más usados debido a que son más rápidos, baratos y simples. Por otro lado, los tratamientos enzimáticos tienen ventajas frente a los químicos ya que no se producen subproductos tóxicos y la hidrólisis tiene una mayor conversión.
- 4) Fermentación y destilación. Esta etapa se puede llevar a cabo de dos formas principalmente: sacarificación y fermentación de manera simultánea o hidrólisis y fermentación separadas.

En esta etapa, el fermentador es alimentado con la solución de azúcar y levadura para iniciar la fermentación y producción de etanol. Posteriormente, el producto pasa a un separador de fases y a la torre de destilación para

obtener etanol con pureza de hasta 99%. El CO₂ producido durante el proceso se utiliza para el cultivo de las microalgas (Özçimen y col., 2020).

El proceso de producción de bioetanol a partir de macroalgas sigue un proceso similar: cultivo, pretratamiento, hidrólisis, fermentación y destilación (Ravanal y col., 2019).

3.4 Usos del bioetanol

El bioetanol puede ser usado en una gran variedad de aplicaciones ya sea como combustible o como materia prima para la producción de otros materiales. El bioetanol puede ser mezclado con gasolina (hasta 85%) y diésel (hasta 15%) en diferentes concentraciones con el fin de mejorar el octanaje y reducir las emisiones; más del 80% de los automóviles de Estados Unidos de América pueden usar mezclas con 15% de etanol. En México se aprobó la mezcla de hasta 5.8% de etanol con gasolina (2016), según la Norma Oficial Mexicana NOM-016-CRE-2016. Un año después, el porcentaje permitido se incrementó hasta 10%. Mezclar bioetanol con combustibles de origen fósil tiene varios beneficios, entre ellos, disminución de la producción de óxidos de azufre (responsable de lluvia ácida y compuesto carcinógeno) durante la combustión y la disminución de gases de efecto invernadero ya que el bióxido de carbono que se produce durante la combustión se equilibra por el CO₂ “capturado” durante el cultivo de la biomasa utilizada para la producción de bioetanol (IEA, 2022; U.S. Department of Energy, 2022).

Por otro lado, el bioetanol puede ser utilizado como combustible mediante celdas de combustible para la producción de electricidad y calor en sistemas de cogeneración, y como materia prima para la producción de otros combustibles (biodiésel) y detergentes, gel desinfectante, pinturas y resinas en la industria química. (Boro y col., 2022; Naik y col., 2010; U.S. Department of Energy, 2022).

4. Biodiésel

El biodiésel es el segundo biocombustible líquido más producido en la actualidad. A escala comercial se producen dos tipos: éster metílico de ácido graso (EMAG) y ácidos grasos hidroprocesados (AGH). El EMAG es producido por la transesterificación de triacilglicéridos y por la esterificación de ácidos grasos. Las materias primas más utilizadas son el aceite de palma, de soya, colza, aceite de cocina usado y grasas de origen animal. La producción de biodiésel a partir de aceites de origen vegetal depende de la disponibilidad de recursos naturales; por esta razón, la producción de biodiésel a partir de algas se ha convertido en una opción (Ward, 2020; Naik y col., 2010; Babadi y col., 2022).

La producción de biodiésel también ha generado debate sobre su sustentabilidad y sostenibilidad. Un ejemplo es el impacto en el ambiente y consumo de recursos para el cultivo de palma, además, los cultivos energéticos deben acreditar su sostenibilidad y respetar las regulaciones de cada país o entidades económico-políticas. Por otro lado, la competencia entre producción de combustibles y alimentos también está presente; la superficie de cultivo utilizada para la producción de biodiésel a nivel mundial es de 4%, aproximadamente. Este porcentaje puede alcanzar hasta 20% en países exportadores como Brasil y Argentina (Dimian y col., 2019).

La obtención de biodiésel se lleva a cabo mediante la transesterificación de triglicéridos con alcoholes ligeros como el metanol en presencia de un catalizador base (hidróxido de sodio o de potasio). La reacción general es la siguiente:

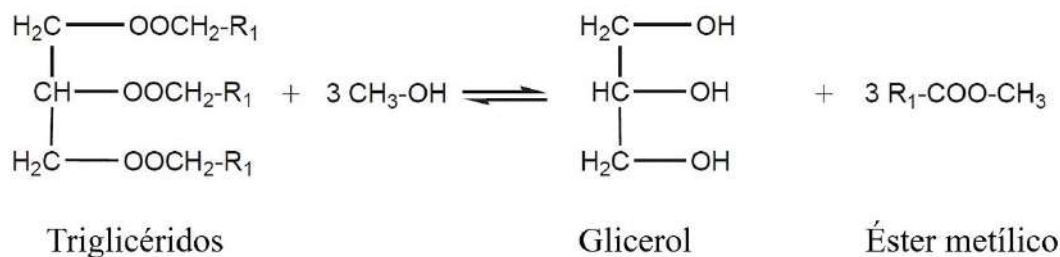


Figura 4. Producción de biodiésel a partir de triglicéridos (Naik y col., 2010).

Fuente: elaboración propia.

4.1 Materias primas para biodiésel

Las materias primas usadas para la producción de biodiésel se pueden clasificar en tres grandes grupos: a) primera generación (aceites de origen vegetal), b) segunda generación (grasas y biomasa lignocelulósica de desecho) y c) tercera generación (aceites de algas). El aceite de origen vegetal es la materia prima más usada en la actualidad, siendo el aceite de palma, colza y soya los más utilizados. Respecto a las grasas de desecho, su aportación al mercado del biodiésel es mínima. Por último, la producción de biodiésel a partir de aceite de algas aún está en etapa de investigación, por lo que la producción a escala industrial se espera que ocurra en el mediano o largo plazo (Naik y col., 2010; Dimian y col., 2019).

4.2 Métodos de producción de biodiésel

Una gran variedad de métodos y tecnologías para la producción de biodiésel se han desarrollado. Estos se pueden englobar en dos categorías: procesos continuos y discontinuos. Los primeros se llevan a cabo mediante catálisis homogénea o heterogénea y son los más usados para producción a gran escala, además, la calidad de los productos es mejor. La catálisis heterogénea es más rentable, pero se debe considerar el costo y disponibilidad del catalizador. Por otro lado, la catálisis

homogénea utiliza catalizadores más económicos y puede adaptarse fácilmente ante un cambio en los procesos (Naik y col., 2010; Babadi y col., 2022; Pruszko, 2020).

Los procesos discontinuos son usados en producciones a menor escala y son ideales en el caso de fábricas pequeñas que usan materias primas locales (estacionales), catálisis homogénea, sobre todo si los procesos son más flexibles con la materia prima utilizada y los costos de inversión son menores. Su principal desventaja es la eficiencia reducida y la calidad menor del producto, además de costos mayores de operación (Pruszko, 2020).

La Figura 5 muestra el proceso de producción de biodiésel mediante un proceso discontinuo (batch processing). Este método usa un reactor de tanque agitado con relaciones de alcohol y triglicéridos de 4:1 hasta 20:1(mol) con temperatura de operación entre 25-85 °C. Los catalizadores más usados son hidróxido de sodio (NaOH) e hidróxido de potasio (KOH) (0.3-1.5% en peso de aceite) con tiempos de reacción de 20-60 minutos y conversiones del 85-94% (Dimian y col., 2019; Pruszko, 2020).

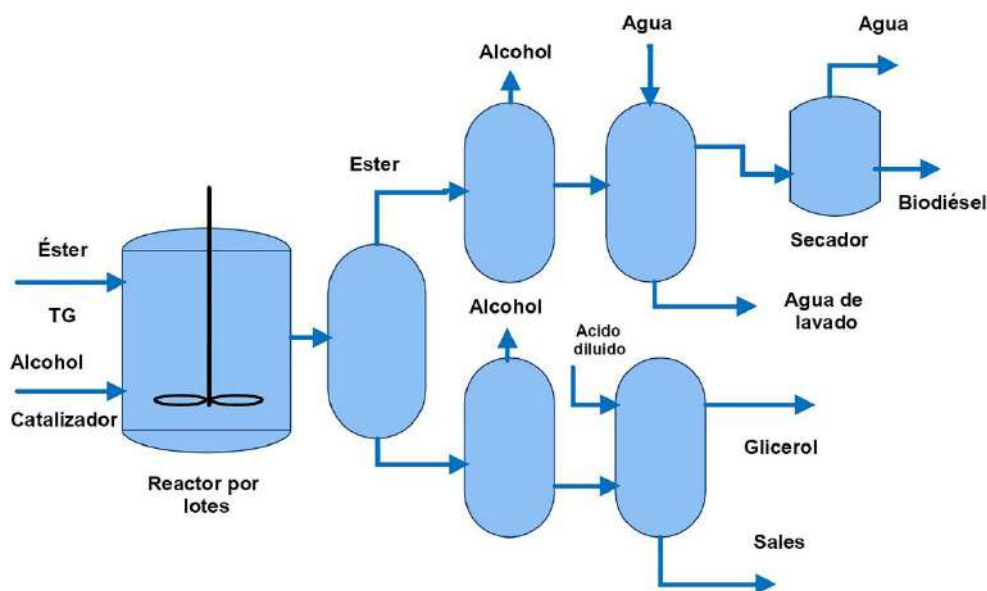


Figura 5. Producción de biodiésel mediante un proceso batch.

Fuente: elaboración propia.

Este proceso se puede resumir en las siguientes etapas:

- 1) Primero se carga el aceite al reactor, luego se añaden el catalizador y el metanol. El sistema debe mantenerse agitado durante toda la reacción.
- 2) El alcohol se elimina de la corriente de glicerol y éster.
- 3) Los ésteres son lavados con agua para eliminar el metanol y sales residuales, continuando con un proceso de secado y finalmente el biodiésel producido es almacenado.
- 4) El glicerol puede neutralizarse y refinarse.

Si se usan grasas de origen animal, el proceso se lleva mediante una esterificación ácida. La materia prima se seca y filtra antes de cargar al tanque de esterificación. Posteriormente, el metanol y el ácido sulfúrico se añaden manteniendo la reacción agitada en todo momento (no se produce glicerol). Una vez que se hayan producido

los ésteres metílicos, la mezcla metanol-agua-ácido es eliminada por decantación o centrifugación.

La producción de biodiésel mediante un sistema continuo se puede llevar a cabo mediante reactores continuos de tanque agitado (CSTR, por sus siglas en inglés) conectados en serie. Tiempo de residencia y volumen del primer CSTR suelen ser mayores con el fin de alcanzar la conversión máxima; posteriormente, el glicerol y el resto de los productos se decantan y pasan al segundo CSTR donde la reacción es más rápida y con conversiones de hasta 98% (Babadi y col., 2022; Dimian y col., 2019; Pruszko, 2020).

Otro ejemplo de proceso continuo es un reactor tubular (Figura 6), el cual debe contar con sistema de agitación para llevar a cabo la reacción de transesterificación. Este tipo de reactor es conocido como reactor de flujo pistón (PFR, por sus siglas en inglés). Este reactor requiere tiempos de residencia menores a 10 minutos debido a que operan a presiones grandes y temperaturas muy calientes (Pruszko, 2020).

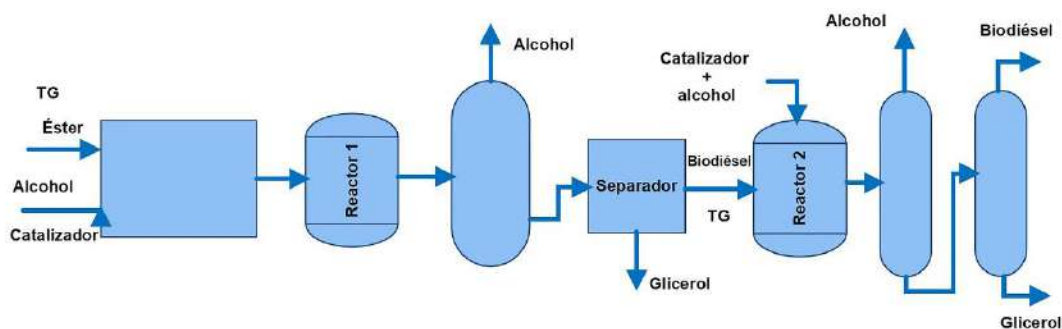


Figura 6. Producción de biodiésel en un sistema PFR.

Fuente: elaboración propia.

4.3 Usos del biodiésel

La aplicación principal del biodiésel es como combustible para motores donde la mezcla más común es B20 (20% biodiésel y 80% diésel de petróleo), aunque se puede usar sin mezclarlo, es decir, puro. Según datos del Departamento de Energía de Estados Unidos de América, la producción y el consumo de biodiésel en dicho país han crecido constantemente: la producción de biodiésel fue de 2569.6 millones de litros en 2008, de 4786.7 millones en 2015 y de 6848.5 millones en 2020. El consumo mayor fue de 7902.1 millones de litros en 2016 (U.S. Department of Energy, 2022). Al igual que el bioetanol, el CO₂ liberado en la combustión del biodiésel es compensado con el bióxido de carbono capturado al cultivar la materia prima con que fue producido.

5. Biogás

Balances energéticos han demostrado que los biocombustibles gaseosos ofrecen mayor reducción de gases de efecto invernadero que los biocombustibles líquidos. Además, el biogás tiene gran potencial en la industria del transporte donde se espera que este combustible cubra hasta el 25% de la demanda energética de esta industria (Sun y col., 2015). Por otro lado, el biogás es un combustible amigable con el ambiente; durante su producción se generan subproductos que son utilizados como fertilizantes de calidad buena, lo cual genera valor agregado a estos “residuos” (Ghosh y col., 2020).

El biogás es una mezcla de gases: a) 50-75% de metano (CH₄) que tiene un contenido energético de 35846 kJ/m³, b) 25-40% de bióxido de carbono (CO₂) y c) sulfuro de hidrógeno en cantidades menores (3%) y vapor de agua. Este combustible puede ser obtenido a partir de una gran variedad de métodos y biomasa, pero el más común y económicamente viables es la digestión anaerobia a partir de desechos agrícolas, municipales, excrementos de animales y desechos

de alimentos. Este proceso biológico consta de cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. La cantidad de biogás producido depende de variables como composición de la biomasa y pretratamiento a que es sometida, microbios o enzimas utilizadas, condiciones de operación y tipo de biodigestor utilizado (Ghosh y col., 2020; Yuan y Gerbens-Leenes, 2021).

5.1 Materias primas para la producción de biogás

Una gran variedad de materias primas puede ser usadas para la producción de biogás; por ejemplo, residuos forestales, desechos sólidos municipales, desechos agrícolas, estiércol de ganado, cultivos convencionales y energéticos, y biomasa lignocelulósica. Básicamente, toda la biomasa puede ser utilizada como materia prima para la producción de biogás, siempre que sus principales constituyentes sean carbohidratos, proteínas, grasas, celulosa o hemicelulosa. En la actualidad, la mayoría de las plantas de biogás utilizan estiércol de ganado mezclado con otros sustratos como materia prima con el fin de incrementar la producción de biogás. Estos sustratos pueden ser residuos agrícolas, desechos de alimentos y domésticos. La materia prima utilizada para la producción de biogás se clasifica en:

- 1) Residuos animales que incluyen estiércol y purines de vacas, caballos y aves de corral. La producción de metano alcanza hasta 60% y los subproductos pueden ser utilizados como sustituto de fertilizantes (Yuan y Gerbens-Leenes, 2021; Kapoor y col., 2020).
- 2) Residuos de la industria alimentaria como los desechos de frutas, verduras, lácteos, harinas, así como desechos de salvado, arroz y papa que pueden ser usados como materia prima para producir biogás mediante digestión anaeróbica. Lo anterior facilita la gestión de residuos y fomenta la agricultura ecológica mediante el uso de los digestatos (subproducto de la digestión anaerobia) como fertilizantes (Popescu y Jurcoane, 2015).

- 3) Fracción orgánica de residuos sólidos urbanos como desechos de jardín, papel, cáscaras de fruta y vegetales, hojas y desechos de alimentos, entre otros (Yongy col., 2015).
- 4) Lodos de plantas tratadoras de agua. Estos lodos contienen metanógenos por lo que la producción de metano mediante digestión anaeróbica está garantizada. Además, los lodos de las plantas tratadoras son una fuente de gases de efecto invernadero, por lo que su uso como materia prima para producir biogás se vuelve más atractiva (Felca y col., 2018).

5.2 Métodos de producción de biogás

Como se mencionó anteriormente, la digestión anaeróbica es el principal método para la producción de biogás. Este es un proceso biológico donde microorganismos simbióticos (bacterias y arqueas) convierten materia orgánica en biogás (en ausencia de oxígeno) y digestatos. Esta tecnología facilita la gestión de residuos, reduce los gases de efecto invernadero y produce energía de manera sostenible.

La biomasa compuesta principalmente de carbohidratos, proteínas y lípidos es degradada en compuestos más simples por los microorganismos en cuatro etapas principalmente:

- 1) Hidrólisis. En esta etapa, polímeros complejos como los carbohidratos, grasas y proteínas se descomponen en glucosa, ácidos grasos y aminoácidos.
- 2) Acidogénesis. Los microorganismos descomponen moléculas de glucosa, ácidos grasos y aminoácidos en ácidos grasos volátiles y los alcoholes.
- 3) Acetogénesis. Los ácidos grasos volátiles y los alcoholes se convierten en H_2 , CO_2 y amoníaco (NH_3).
- 4) Metanogénesis. Los microorganismos convierten el hidrógeno y el ácido acético en CH_4 y CO_2 (Nguyen y col., 2019).

Una gran variedad de digestores anaeróbicos para la producción de biogás se ha desarrollado. Los digestores se pueden clasificar en cuatro grandes grupos:

- a) Digestor anaeróbico de crecimiento suspendido. Esta es la configuración de reactor más usada donde los sustratos y microbios están suspendidos en el reactor. Entre los reactores más comunes están los CSTR, reactores de contacto anaeróbico, reactor por lotes de secuencia anaeróbica y reactor deflector anaeróbico.
- b) Digestor anaeróbico de crecimiento adjunto. En esta configuración, los microorganismos se adhieren a varios medios inertes con área específica alta como rocas porosas, carbón activado, perlas de plástico, entre otros. En esta configuración podemos encontrar a reactores de lecho expandido y reactores de lecho fluidizado.
- c) Digestor anaeróbico de estado sólido. Este tipo de digestores son utilizados para procesar biomasa con contenido grande de sólidos como desechos de alimentos y biomasa lignocelulósica.
- d) Digestor anaeróbico doméstico. Este tipo de digestores son biodigestores con capacidades de hasta 8 metros cúbicos y son ampliamente usados en área rurales de países en desarrollo. Los digestores más usados son digestores chinos de cúpula fija y digestores de indios de tambor flotante, ambos utilizan comúnmente desechos de animales (Kapoor y col., 2020; Felca y col., 2018; Nguyen y col., 2019).

5.3 Usos del biogás

El biogás es un recurso renovable y puede valorizarse directa o indirectamente para diversas aplicaciones. En países en vías de desarrollo el biogás producido a partir de digestores domésticos y es utilizado para actividades como cocinar e iluminar. Otros usos del biogás son en sistemas de cogeneración donde se produce electricidad y calor a partir de combustión; también es usado como sustituto del gas

natural y como combustible en vehículos de transporte. Además, el biogás puede ser utilizado como materia prima en la producción de hidrógeno (utilizado en celdas de combustible), gasolinas y alcoholes. En la Figura 7 se muestra un resumen gráfico de las aplicaciones del biogás (Boro y col., 2022; Ward, 2020; Felca y col., 2018; Nguyen y col., 2019).

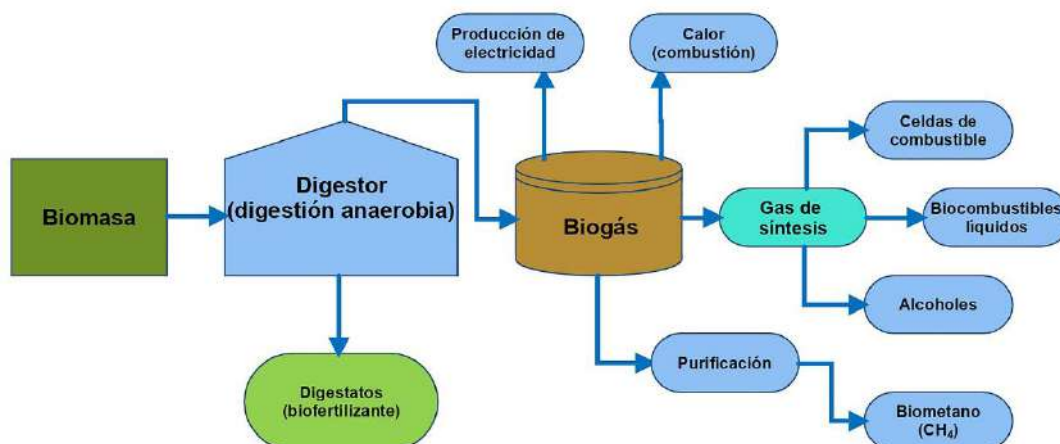


Figura 7. Aplicaciones del biogás.

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

La demanda creciente de energía, producto del aumento constante de la población mundial, ha traído consigo problemas ambientales graves debido a que más del 80% de la energía es cubierta mediante la combustión de combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo), así como sus derivados. Estos problemas ambientales, junto con el agotamiento de las reservas de combustibles fósiles, han conducido a la búsqueda de nuevas fuentes de energía que sean amigables con el ambiente. Dentro de estas energías alternativas se encuentran los biocombustibles líquidos y gaseosos, los cuales son producidos a partir de a) cultivos alimenticios (biocombustibles de primera generación), b) cultivos energéticos, desechos

agroindustriales y grasas de origen animal (biocombustibles de segunda generación) y c) a partir de algas y microalgas (biocombustibles de tercera generación). En la actualidad, los biocombustibles que se producen a escala industrial son el biogás, biodiésel y bioetanol, siendo este último el de mayor producción a nivel mundial. Las tecnologías más utilizadas en la producción de estos biocombustibles son la fermentación anaeróbica para el bioetanol, transesterificación de triglicéridos con alcoholes ligeros para el biodiésel y la digestión anaerobia para el biogás. Las materias primas más utilizadas son maíz, trigo y caña de azúcar para el bioetanol, aceite de palma, soya y colza para el biodiésel, y estiércol de ganado mezclado con residuos agroindustriales para el biogás. La principal aplicación de estos biocombustibles es como combustible para vehículos de combustión interna.

Aunque estos combustibles contribuyen a la disminución de gases de efecto invernadero, la sostenibilidad de estos es un tema que debe revisarse debido a la competencia que se puede generar entre la producción de alimentos y la producción de biocombustibles, así como el uso de cantidades grandes de agua en las áreas de cultivo, los cambios en el uso del suelo, y la pérdida de biodiversidad.

Referencias

Babadi, A. A., Rahmati, S., Fakhlaei, R., Barati, B., Wang, S., Doherty, W., & Ostrikov, K. (2022). Emerging technologies for biodiesel production: Processes, challenges, and opportunities. *Biomass and Bioenergy*. 163: 106521.

<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106521>

Boro, M., Verma, A. K., Chettri, D., Yata, V. K., & Verma, A. K. (2022). Strategies involved in biofuel production from agro-based lignocellulose biomass. *Environmental Technology & Innovation*. 28: 102679.

<https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102679>

Debnath, C., Bandyopadhyay, T. K., Bhunia, B., Mishra, U., Narayanasamy, S., & Muthuraj, M. (2021). Microalgae: Sustainable resource of carbohydrates in third-generation biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 150: 111464.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111464>

Del Río, P. G., Domínguez, E., Domínguez, V. D., Romani, A., Domingues, L., & Garrote, G. (2019). Third generation bioethanol from invasive macroalgae *Sargassum muticum* using autohydrolysis pretreatment as first step of a biorefinery. *Renewable Energy*. 141: 728-735.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.083>

Dimian, A. C., Bildea, C. S., & Kiss, A. A. (2019). 9 – Biodiesel. In A.C. Dimian, C. Bildea & A.A. Kiss (Ed.), *Applications in Design and Simulation of Sustainable Chemical Processes*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63876-2.00009-7>. Fecha de consulta: 16 de junio de 2022.

Felca, A. T. A., Barros, R. M., Tiago Filho, G. L., dos Santos, I. F. S., & Ribeiro, E. M. (2018). Analysis of biogas produced by the anaerobic digestion of sludge generated at wastewater treatment plants in the South of Minas Gerais, Brazil as a potential energy source. *Sustainable Cities and Society*. 41: 139-153.

<https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.035>

Gandam, P. K., Chinta, M. L., Pabbathi, N. P. P., Baadhe, R. R., Sharma, M., Thakur, V. K., Sharma, G. D., Ranjitha, J., & Gupta, V. K. (2022). Second-generation bioethanol production from corncob – A comprehensive review on pretreatment and

bioconversion strategies, including techno-economic and lifecycle perspective.

Industrial Crops and Products. 186: 115245.

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115245>

Ghosh, P., Shah, G., Sahota, S., Singh, L., & Vijay, V. K. (2020). Chapter 7 - Biogas production from waste: technical overview, progress, and challenges. In L. Singh, A. Yousuf & D. Madhab Mahapatra (Ed.), *Bioreactors*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821264-6.00007-3>. Fecha de consulta: 18 de mayo de 2022.

IEA, International Energy Agency (2022). Data and statistics. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org>. Fecha de consulta: 7 de abril de 2022.

Ilham, Z. (2022). Chapter 3 - Biomass classification and characterization for conversion to biofuels, In S. Yusup, & N. Adilla Rashidi (Ed.), *Value-Chain of Biofuels*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824388-6.00014-2>. Fecha de consulta: 2 de julio de 2022.

Kapoor, R., Ghosh, P., Tyagi, B., Vijay, V. K., Vijay, V., Thakur, I. S., Kamyab, H., Nguyen, D. D., & Kumar, A. (2020). Advances in biogas valorization and utilization systems: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*. 273: 123052.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123052>

Kazemi Shariat Panahi, H., Dehghani, M., Kinder, J. E., & Ezeji, T. C. (2019). A review on green liquid fuels for the transportation sector: a prospect of microbial solutions to climate change. *Biofuel Research Journal*. 6: 995-1024.
doi: 10.18331/BRJ2019.6.3.2

Leong, W., Lim, J., Lam, M., Uemura, Y., & Ho, Y. (2018). Third generation biofuels: A nutritional perspective in enhancing microbial lipid production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 91: 950-961.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.066>

Melendez, J. R., Mátyás, B., Hena, S., Lowy, D. A., & El Salous, A. (2022). Perspectives in the production of bioethanol: A review of sustainable methods, technologies, and bioprocesses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 160, 112260.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112260>

Mitra, S., Ghose, A., Gujre, N., Senthilkumar, S., Borah, P., Paul, A., & Rangan, L. (2021). A review on environmental and socioeconomic perspectives of three promising biofuel plants *Jatropha curcas*, *Pongamia pinnata* and *Mesua ferrea*. *Biomass and Bioenergy*. 151, 106173.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106173>

Naik, S., Goud, V. V., Rout, P. K., & Dalai, A. K. (2010). Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14(2): 578-597. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.003>

Nguyen, D., Nitayavardhana, S., Sawatdeenarunat, C., Surendra, K., & Khanal, S. K. (2019). Chapter 31 - Biogas Production by Anaerobic Digestion: Status and Perspectives. In A. Pandey, C. Larroche, D. Claude-Gilles, E. Gnansounou, S. Kumar Khanal & S. Ricke (Ed.), *Biomass, Biofuels, Biochemicals, Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816856-1.00031-2>. Fecha de consulta: 26 de mayo de 2022.

ONU, Organización de las Naciones Unidas (2022). COP26: Juntos por el planeta. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/es/climatechange/cop26>. Fecha de consulta: 3 de marzo de 2022.

Özçimen, D., Koçer, A. T., İnan, B., & Özer, T. (2020). Chapter 14 -Bioethanol production from microalgae. In E. Jacob-Lopes, M. Manzoni Maroneze, M.I. Queiroz, L. & Queiroz Zepka (Ed.), *Handbook of Microalgae-Based Processes and Products*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818536-0.00014-2>. Fecha de consulta: 18 de junio de 2022.

Paravantis, J. A. (2022). 38 - Socioeconomic aspects of third-generation biofuels. In E. Jacob-Lopes, L. Queiroz Zepka, I. Aguiar Severo, & M. Manzoni Maroneze (Ed.), *3rd Generation Biofuels*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90971-6.00046-2>. Fecha de consulta: 15 de mayo de 2022.

Popescu, C. & Jurcoane, S. (2015). Evaluation of biogas potential of some organic substrates from agriculture and food industry and co-digestion in large scale biogas plant, in *Romanian Biotechnological Letters*. [En línea]. Disponible en: <http://www.rombio.eu/rbl4vol20/11.pdf>. Fecha de consulta: 4 de mayo de 2022.

Pruszko, R. (2020). Chapter 23 - Biodiesel production. In A. Dahiya (Ed.), *Bioenergy*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815497-7.00023-3>. Fecha de consulta: 28 de mayo de 2022.

Ravanal, M. C., Camus, C., Buschmann, A. H., Gimpel, J., Olivera-Nappa, Á., Salazar, O., & Lienqueo, M. E. (2019). Chapter 4 - Production of Bioethanol From Brown Algae, In M. Hosseini (Ed.), *Advances in Feedstock Conversion Technologies for Alternative Fuels and Bioproducts*. [En línea]. Disponible en:

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817937-6.00004-7>. Fecha de consulta: 28 de junio de 2022.

Sun, Q., Li, H., Yan, J., Liu, L., Yu, Z., & Yu, X. (2015). Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 51: 521-532.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.029>

U.S. Department of Energy (2022). Alternative Fuels Data Center, en Energy Efficiency & Renewable Energy (2022). [En línea]. Disponible en: https://afdc.energy.gov/fuels/ethanol_fuel_basics.html. Fecha de consulta: 13 de junio de 2022.

Wang, X., Jiang, D., & Lang, X. (2017). Future extreme climate changes linked to global warming intensity. *Science Bulletin*. 62(24): 1673-1680.
<https://doi.org/10.1016/j.scib.2017.11.004>

Ward, V. C. (2020). Chapter 7 – Biofuels. In A. Gomes Rodrigues (Ed.), *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64301-8.00007-X>. Fecha de consulta: 4 de mayo de 2022.

Yong, Z., Dong, Y., Zhang, X., & Tan, T. (2015). Anaerobic co-digestion of food waste and straw for biogas production. *Renewable Energy*. 78, 527-530.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.033>

Yuan, Z., & Gerbens-Leenes, P. (2021). Biogas feedstock potentials and related water footprints from residues in China and the European Union. *Science of The Total Environment*. 793, 148340.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148340>

Zhao, Q., Yu, P., Mahendran, R., Huang, W., Gao, Y., Yang, Z., Ye, T., Wen, B., Wu, Y., Li, S., & Guo, Y. (2022). Global climate change and human health: Pathways and possible solutions. *Eco-Environment & Health*. 1(2): 53-62.

<https://doi.org/10.1016/j.eehl.2022.04.004>