



UNAM

**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**“BIOCOMBUSTIBLES Y SU POTENCIAL
COMO FUENTE DE ENERGÍA PRIMARIA”**

TRABAJO MONOGRÁFICO DE ACTUALIZACIÓN

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA:

JOSÉ MARÍA RODRIGO RENERO MARTÍNEZ

TUTOR:

CARLOS ÁLVAREZ MACIEL

Ciudad Universitaria, CDMX.

2023





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor: LUNA PABELLO VICTOR MANUEL**

SECRETARIO: **Profesor: DURAN MORENO ALFONSO**

VOCAL: **Profesor: ALVAREZ MACIEL CARLOS**

1er. SUPLENTE: **Profesor: GARCIA GONZALEZ SERGIO ADRIAN**

2do. SUPLENTE: **Profesor: GUINEA CORRES ELISA ELVIRA**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX.

ASESOR DEL TEMA:

CARLOS ÁLVAREZ MACIEL

SUSTENTANTE (S):

JOSE MARÍA RODRIGO RENERO MARTÍNEZ

Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que han sido parte fundamental en mi trayectoria académica y en la realización de este trabajo. Sus contribuciones y apoyo incondicional han sido cruciales en este viaje.

A mis padres, Jorge y Marisa, quienes desde el primer día han sido mi fuente de fortaleza y motivación. Gracias por su amor, paciencia y sacrificio. Todo lo que he logrado es el resultado de su dedicación y valores inculcados en mí. Quiero dedicar especialmente este trabajo a ustedes y a mis hermanos, Jimena, Regina y Jorge, por su constante ánimo y apoyo.

A mis amigos y compañeros de carrera. Juntos compartimos desafíos, éxitos y momentos inolvidables. El trabajo en equipo que construimos y compartimos han hecho posible superar múltiples obstáculos y progresar en conjunto en nuestros estudios.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, una institución que ha sido mi hogar intelectual durante estos años. Gracias por brindarme oportunidades excepcionales de aprendizaje y crecimiento personal y académico. A mis profesores, por dedicar su tiempo y esfuerzo a forjar el futuro de las generaciones venideras. Estoy agradecido de formar parte de esta comunidad académica.

Al maestro Carlos Álvarez, por su experta guía, paciencia y compromiso en mi desarrollo académico. Su orientación ha sido fundamental para dar forma a este proyecto de investigación y para mi crecimiento como estudiante. A mis sinodales, Dr. Víctor Luna y Dr. Alfonso Durán por su tiempo y dedicación en la revisión y evaluación de mi trabajo. Sus valiosos comentarios y sugerencias han enriquecido significativamente este proyecto.

Finalmente, agradezco a todas las demás personas que de alguna manera contribuyeron a este logro. Su apoyo moral y aliento fueron un motor que me impulsó a seguir adelante. Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo y la colaboración de todos ustedes. Mis más sinceros agradecimientos por ser parte de este importante capítulo en mi vida académica.

ÍNDICE

| | |
|--|------------|
| 1. Resumen | 5 |
| 2. Introducción | 6 |
| 2.1 Marco teórico de referencia | 6 |
| 2.2 Biocombustibles | 9 |
| 2.3 Clasificación de biocombustibles por generación | 17 |
| 2.3.1 Generación cero..... | 17 |
| 2.3.2 Primera generación..... | 18 |
| 2.3.3 Segunda generación..... | 18 |
| 2.3.4 Tercera generación | 19 |
| 2.3.5 Cuarta generación..... | 20 |
| 3. Alcance | 22 |
| 4. Objetivos | 22 |
| 4.1 Objetivo general | 22 |
| 4.2 Objetivos particulares | 22 |
| 5. Análisis de Biocombustibles por Generación | 23 |
| 5.1 Primera generación | 23 |
| 5.1.1 Insumos, tecnología, biocombustibles y residuos obtenidos..... | 23 |
| 5.1.2 Evaluación de biocombustibles de primera generación | 46 |
| 5.1.2.1 Evaluación de la producción | 46 |
| 5.1.2.2 Evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero | 48 |
| 5.1.2.3 Evaluación de la eficiencia energética | 50 |
| 5.1.3 Viabilidad y criterio de selección..... | 51 |
| 5.2 Segunda generación | 54 |
| 5.2.1 Insumos, tecnología, biocombustibles y residuos obtenidos..... | 54 |
| 5.2.2 Evaluación de biocombustibles de segunda generación..... | 82 |
| 5.2.2.1 Evaluación de la producción | 82 |
| 5.2.2.2 Evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero..... | 86 |
| 5.2.2.3 Evaluación de la eficiencia energética | 88 |
| 5.2.3 Viabilidad y criterio de selección..... | 90 |
| 6. Recomendaciones | 95 |
| 7. Conclusiones | 101 |
| 8. Fuentes de información | 103 |
| 9. Anexos | 121 |

1. Resumen

Los biocombustibles son combustibles obtenidos mediante el tratamiento físico o químico de biomasa o de residuos orgánicos, y son considerados una fuente de energía renovable.

Los biocombustibles se dividen en cinco categorías o generaciones dependiendo de las materias primas empleadas en su producción, existen: cero, primera, segunda, tercera y cuarta generación. Este trabajo se enfocará en estudiar y evaluar la viabilidad de los biocombustibles de primera (producidos a partir de cultivos alimentarios) y segunda generación (obtenidos principalmente a partir de materias primas no alimentarias).

Los elementos que este trabajo analiza son: insumos requeridos, tecnologías empleadas, biocombustibles y residuos obtenidos por cada generación (primera y segunda), así como la evaluación de sus procesos de producción, emisiones de gases de efecto invernadero y eficiencia energética. Todo lo anterior con el propósito de generar un panorama que permita brindar una recomendación sobre el potencial y viabilidad de ambas generaciones como fuentes de energía primaria.

2. Introducción

2.1 Marco teórico de referencia

El constante e incremental uso de combustibles no renovables como fuentes de energía primaria ha provocado el aumento progresivo del calentamiento global y la emisión de varios contaminantes atmosféricos que son perjudiciales para el medio ambiente y la salud pública, debido a esto nuestro planeta está experimentando más desgracias naturales que son graves en términos de intensidad y duración (Khan et al., 2021).

Además de la variabilidad climática natural; el aumento de la tasa de crecimiento de la población y la industrialización han dado lugar a un cambio climático antropogénico debido al uso extensivo de energía, que conduce a un aumento en los niveles de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que, según se informa, son responsables de causar múltiples fenómenos naturales como inundaciones, sequías, incendios forestales, derretimiento de los glaciares a un ritmo acelerado, y otras calamidades naturales (IEA, 2007; IPCC, 2007; Stocker et al., 2013; IPCC, 2014; Kumar, 2018a, b; Kumar et al., 2019; Khan et al., 2021).

Hay pruebas abrumadoras que demuestran que la actividad humana es el principal motor del cambio climático y que sus consecuencias están afectando a la producción de alimentos, a los patrones de migración y a la estabilidad económica y política a escala mundial (Liu et al., 2021).

En 2019 se emitieron cerca de 34 gigatoneladas de GEI por explotación de combustibles fósiles y las mayores fracciones se atribuyen a la generación de electricidad (39%), transporte (24%) y a la industria (23%) (EIA, 2020). Como todas estas actividades dependen en gran medida de los combustibles fósiles, los avances tecnológicos y la diversificación de las fuentes de energía alternativas son prometedoras para reducir considerablemente las emisiones de carbono y paliar el cambio climático.

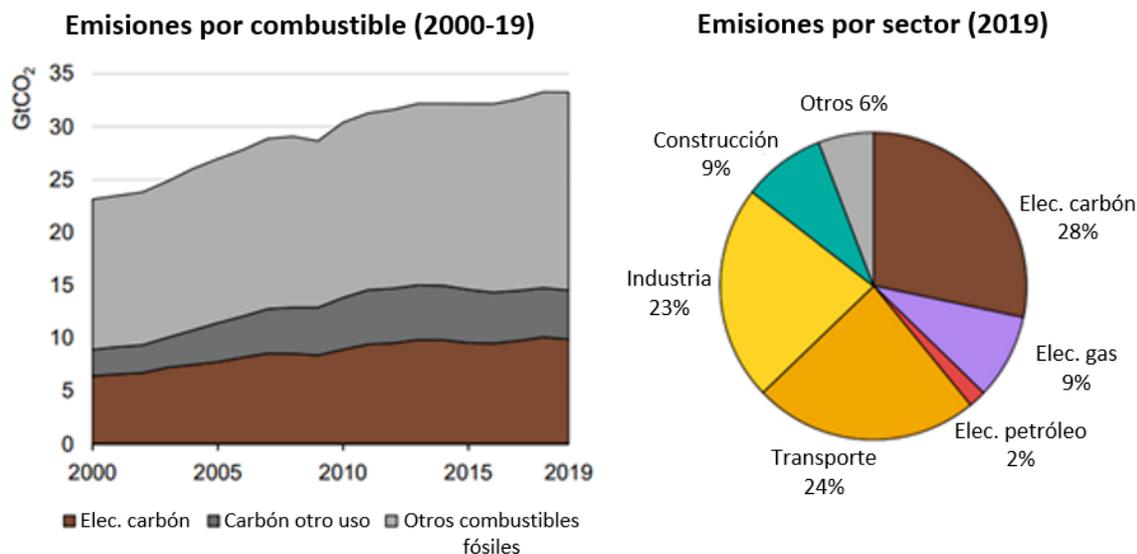


Figura 1. Gráfica de emisiones mundiales de CO₂ relacionadas con la energía, por combustible (izquierda), 2000-19 y sector (derecha), 2019.

*Elec: Generación de electricidad vía

Adaptado de: Energy Technology Perspectives 2020 Analysis IEA (2020)

Los combustibles fósiles clasificados como no renovables producen una parte importante de los gases de efecto invernadero (IPCC, 2014). En 2020, casi el 88% del uso actual de la energía procedía de la quema de combustibles fósiles, lo que contribuye a aumentar las concentraciones de CO₂ en la atmósfera (Kumar, 2020). Aunado a esta explotación, el tiempo natural de formación de estos recursos energéticos es mucho mayor a los tiempos de consumo por parte del ser humano, por lo cual se les considera finitos. Asimismo, se ha observado una disminución considerable en las reservas mundiales de estos recursos, sin poderse vislumbrar nuevos yacimientos que permitan evitar el abatimiento de su disponibilidad en el mediano o largo plazo (Álvarez, 2018).

Con base en las políticas actuales, se espera que la demanda mundial de energía aumente un 1.3% al año hasta 2040 si no se produce y/o recicla energía de forma drástica (IEA, 2019).

Para 2070, la Agencia Internacional de la Energía (IEA por sus siglas en inglés) prevé que el transporte mundial (medido en kilómetros por pasajero) se cuadruple y que las tasas de

propiedad de automóviles aumenten un 60%. De igual forma, de acuerdo con el estudio *Energy Technology Perspective*, la demanda de aviones de pasajeros y de carga se triplicará (IEA, 2020).

Existe una clara necesidad de cambiar la dependencia energética de los combustibles fósiles a las fuentes de energía renovables para hacer frente al ritmo sin precedentes del cambio climático debido a la acumulación de GEI en la atmósfera.

La generación de energía renovable es uno de los principales retos del mundo actual, moviliza complejos sistemas de producción vinculados a aspectos sociales, económicos, políticos, tecnológicos y medioambientales. Un suministro energético seguro favorece el crecimiento socioeconómico de los países y ayuda a conseguir una mayor calidad de vida para sus habitantes. Así, cada país tiene como objetivo aumentar su propia disponibilidad de energía principalmente para impulsar su desarrollo económico.

Alcanzar este objetivo requiere el uso de diferentes tipos de fuentes de energía, que deben ser adecuados a su realidad económica y a las fuentes de energía que tenga disponibles. Todo esto representa un gran desafío que va más allá de las cuestiones logísticas que garantizan que la disponibilidad de energía llegue a los principales consumidores, como las industrias, empresas y hogares. Asegurar el suministro confiable de la energía eléctrica es esencial, pero el alto costo y las fuentes limitadas de los combustibles fósiles, además de la necesidad de reducir la emisión de gases de efecto invernadero, han hecho que las fuentes renovables de energías sean atractivas para las economías mundiales en el ámbito energético.

En cuanto a los precios de los combustibles fósiles y de las energías renovables, los costos sociales y ambientales se mueven en direcciones opuestas, haciendo que los mecanismos económicos y políticos necesarios para apoyar la difusión generalizada de los mercados sostenibles de los sistemas de energía renovable estén evolucionando y surgiendo rápidamente. Todo esto indica que el crecimiento futuro del sector energético pasará principalmente por el nuevo régimen de las energías de fuente renovable. Por lo tanto, la transición a las energías renovables puede ayudar a cumplir el doble objetivo de reducir las

emisiones de gases de efecto invernadero y garantizar un suministro de energía fiable, oportuno y rentable (Mendes & Bordignon, 2020).

En los últimos años han aumentado considerablemente las energías renovables procedentes de diferentes fuentes, como la eólica, la solar, la biomasa y la hidroeléctrica, cuyo uso es conocido por ser respetuoso con el medio ambiente (Goldemberg, 2009). De igual forma, invertir en energías renovables puede tener considerables dividendos para la seguridad energética (Ellabban et al., 2014).

Durante la Conferencia de las Partes del Clima de Egipto (2022), se logró un acuerdo jurídicamente vinculante y universal sobre el cambio climático, con el objetivo de mantener el calentamiento global por debajo de los 2 °C. Para lograr este objetivo, es necesario lograr reducciones drásticas en las emisiones de contaminantes para conseguir estabilizar la concentración de GEI en la atmósfera. La transición gradual al uso de energías de fuentes renovables como los biocombustibles, es una de las soluciones más factibles para conseguirlo.

2.2 Biocombustibles

Los biocombustibles son combustibles que se producen a partir de biomasa y son considerados una fuente renovable de energía a diferencia de los combustibles fósiles. La biomasa a su vez puede definirse como el conjunto de materia orgánica que compone a los organismos biológicos (Kumar, 2018a, b).

Los biocombustibles convencionales más populares consisten en el biodiesel de ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME por sus siglas en inglés) producido de semillas oleaginosas (como el aceite de soja o soya, y el aceite de palma), y el bioetanol, derivado de cultivos de azúcar (como la caña de azúcar y la remolacha azucarera) o de cultivos de almidón (como el maíz y el trigo).

Las tecnologías con las que se producen biocombustibles convencionales están bien establecidas, por lo que su producción a gran escala es posible. Los niveles de producción antes de la pandemia de Covid-19 ascendía a 2 millones de barriles diarios (mb/d). No obstante, para el caso de los biocombustibles convencionales, hay que prestar mucha atención a los problemas de sostenibilidad que su producción conlleva. Entre ellos, la competencia por las tierras agrícolas con los cultivos alimentarios y los posibles impactos directos e indirectos del cambio de uso de la tierra que pueden afectar negativamente a la biodiversidad. No obstante, las evaluaciones de sostenibilidad de este tipo deben realizarse caso por caso (IEA, 2020a).

Es importante considerar que la producción de estos biocombustibles no está exenta de generar subproductos no deseados que a su vez representan un desafío ambiental.

En el caso del bioetanol, uno de los subproductos más relevantes es la vinaza. Esta sustancia residual se genera durante el proceso de destilación del bioetanol a partir de fuentes como la caña de azúcar o el maíz. Las vinazas contienen altas concentraciones de materia orgánica y compuestos nitrogenados, lo que puede tener un impacto negativo en los cuerpos de agua si no se trata adecuadamente. Además, las aguas residuales generadas en la producción de bioetanol también pueden contener residuos de plaguicidas y fertilizantes, lo que demanda un manejo adecuado para evitar cualquier impacto negativo en el medio ambiente (Carrilho et. al., 2016).

En el caso del biodiesel, uno de los subproductos no deseados es la glicerina residual. Durante el proceso de transesterificación para producir biodiesel a partir de grasas y aceites vegetales, se obtiene como subproducto una gran cantidad de glicerina. La glicerina residual presenta un desafío en términos de tratamiento y disposición, ya que su alta viscosidad y contenido de impurezas pueden dificultar su utilización o eliminación segura (National Biodiesel Board, n.d).

Por otro lado, en el caso del biometano, el principal subproducto no deseado es el lodo digerido generado durante el proceso de producción. El biometano se obtiene a partir de la

digestión anaerobia de residuos orgánicos, como los desechos agrícolas o las aguas residuales. Este proceso también produce lodo digerido, que contiene altos niveles de materia orgánica y nutrientes. El manejo adecuado de este subproducto es esencial para evitar la contaminación del suelo y los cuerpos de agua cercanos (Environment Agency, 2011).

El tratamiento de los residuos generados durante la producción de biocombustibles implica un consumo energético, y, por ende, emisiones de gases de efecto invernadero. En el caso de las vinazas provenientes del bioetanol, la glicerina residual en el caso del biodiesel y el lodo digerido en el caso del biometano requieren procesos de tratamiento físico, químico o biológico para su adecuado tratamiento y disposición.

El consumo energético empleado para el tratamiento de residuos puede variar dependiendo del tipo de residuo y del proceso de tratamiento utilizado. Por ejemplo, el tratamiento de las vinazas del bioetanol puede implicar su evaporación para concentrar los sólidos, seguido de un proceso de secado térmico u otro tratamiento para su disposición adecuada. Estos procesos consumen energía para la operación de equipos como evaporadores, secadores, bombas y sistemas de control (Palmero-Marrero et al., 2019).

En el caso de la glicerina residual del biodiesel, esta puede ser sometida a procesos de purificación para eliminar impurezas y posteriormente ser utilizada en aplicaciones químicas o energéticas. Estos procesos de purificación y tratamiento también requieren energía, como la energía térmica para la evaporación y la energía eléctrica para el funcionamiento de equipos de purificación (The National Biodiesel Board, n.d.; Benavente et al., 2016).

El tratamiento de lodos digeridos en la producción de biometano también implica consumir energía para su deshidratación y procesamiento. Los lodos digeridos son sometidos a procesos de filtrado y deshidratación para obtener un producto final más seco y apto para su disposición o uso beneficioso, como la producción de biofertilizantes (Benavente et al., 2016). Al igual que en los casos anteriores, estos procesos consumen energía en la operación de equipos y es importante buscar la eficiencia energética para mitigar emisiones, contaminantes y costos.

En la actualidad, la biomasa vegetal proporciona aproximadamente el 10% de la energía primaria mundial. Se espera que la producción de etanol y biodiesel aumente hasta alcanzar, respectivamente, casi 135 y 39 mil millones de litros en 2024 (OCDE/FAO. Agricultural Outlook, 2015) (IPCC, 2014; Souza et al., 2015).

Los biocombustibles líquidos derivados de la biomasa sostenible pueden constituir una alternativa con menos emisiones de carbono en comparación al diesel y a la gasolina convencional basadas en petróleo (Kumar, 2020).

Cuando hablamos de combustibles, una de las principales preocupaciones es la huella de carbono. Si bien los biocombustibles ayudan a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los combustibles fósiles, durante su producción también se libera CO₂. Sin embargo, parte de este CO₂ puede ser capturado y utilizado para otras aplicaciones.

En el caso de los residuos sólidos generados, como las vinazas en la producción de bioetanol, se pueden utilizar como materia prima para la producción de biogás o bien, someterlas a procesos de compostaje para obtener un fertilizante orgánico rico en nutrientes (Palmero-Marrero et al., 2019). De esta manera, el CO₂ que no se reincorpora a la atmósfera puede ser aprovechado de forma útil, reduciendo la huella de carbono de la producción de biocombustibles.

Aunado a esto, el CO₂ emitido durante su combustión es compensado por la absorción de CO₂ que ocurre durante el crecimiento de la biomasa utilizada para producir los biocombustibles. Esto se debe a que las plantas absorben dióxido de carbono de la atmósfera a medida que crecen. Si bien, aunque no se logra una eliminación total de emisiones de CO₂ ya que se liberan durante el proceso de producción y utilización de los biocombustibles, se considera que tienen una menor huella de carbono en comparación con los combustibles fósiles (Gnansounou & Dauriat, 2010).

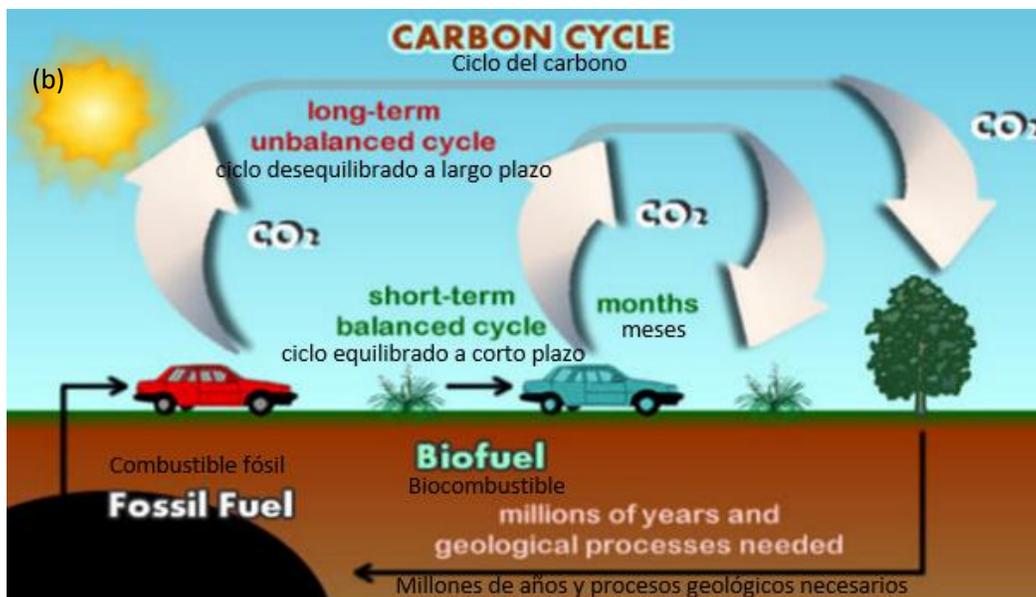
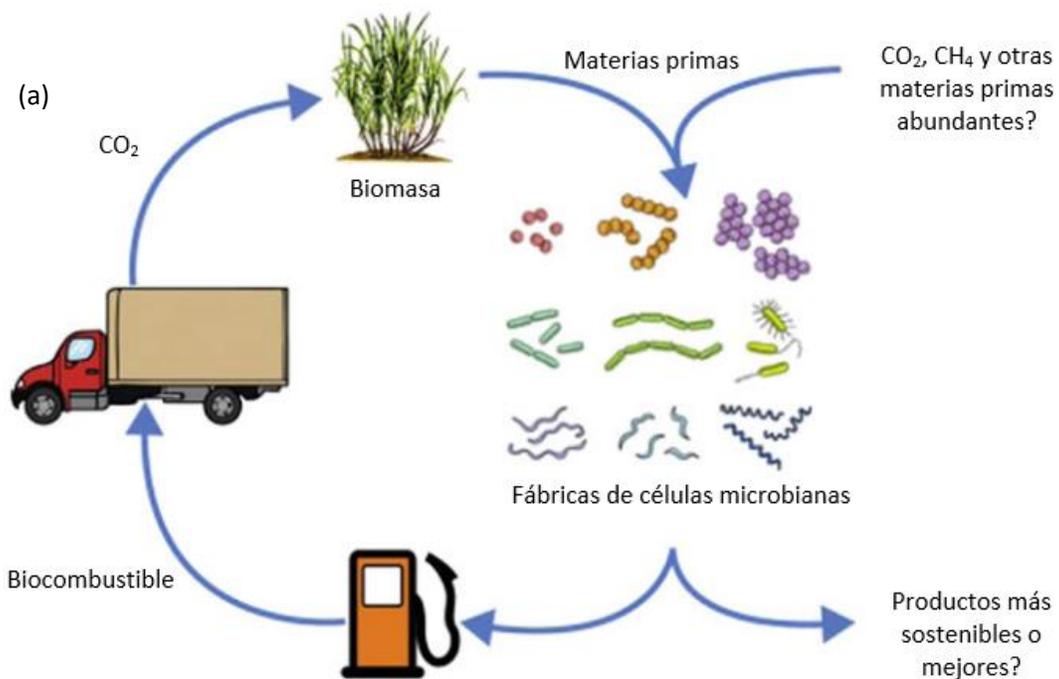


Figura 2. (a) Ciclo del carbono para un biocombustible microbiano y (b) Ciclo del carbono para un biocombustible y combustible fósil.

Adaptado de: Climate Change: Challenges to Reduce Global Warming and Role of Biofuels (2020) & Dimic-Misic et al., 2019.

En la actualidad existen esfuerzos para mejorar la eficiencia de los biocombustibles y reducir las emisiones de CO₂ en su producción. Uno de ellos es la investigación del uso de técnicas

de captura y almacenamiento de carbono (CAC) en las plantas de producción de biocombustibles para capturar el CO₂ antes de que se emita a la atmósfera (Wang et al., 2007). Sin embargo, estas técnicas aún están en desarrollo y no se implementan de manera generalizada en la industria de biocombustibles en la actualidad.

Adicionalmente, otra de las ventajas principales de los biocombustibles es la conveniencia de que puedan utilizarse como mezclas con combustibles convencionales en los vehículos existentes. Algunos de estos biocombustibles líquidos pueden mezclarse con los combustibles convencionales, tanto a bajas como a altas concentraciones. Sin embargo, es necesario realizar ajustes a la tecnología de dichos vehículos (IEA, 2020a).

Como antes se mencionó, en la actualidad los dos biocombustibles más populares son:

- Bioetanol (producido a partir de maíz, caña de azúcar y otros cultivos), adecuado para motores de ciclo Otto.
- Biodiesel (ésteres metílicos de ácidos grasos, combustibles derivados de aceites y grasas vegetales, incluidos residuos como el aceite de cocina usado), generalmente adecuado para motores de ciclo diesel.

El bioetanol se obtiene del maíz en Estados Unidos y de la caña de azúcar en Brasil, juntos representan el 84% de la producción mundial total. En Estados Unidos, la producción de bioetanol alcanzó un volumen de 15,700 millones de galones en 2019 (US Department of Energy, 2020a), cumpliendo así con el requisito obligatorio de complementar la gasolina en un 10% con biocombustibles (109th US Congress, 2005). Mientras que en Europa, la falta de tierras cultivables y la prohibición de los cultivos modificados genéticamente han limitado en gran medida la producción de bioetanol. Por ello, el 75% del mercado de biocombustibles de la Unión Europea se compone de biodiesel derivado de la colza, el aceite de palma, la soja y el aceite de cocina usado.

En 2040, la proporción de biocombustibles en los combustibles convencionales para el transporte terrestre oscilará -dependiendo de las políticas- entre el 5 y el 18% a nivel mundial,

entre el 11 y el 31% en la Unión Europea y entre el 11 y el 29% en Estados Unidos (Agencia Internacional de la Energía. World Energy Outlook, 2015) (Popp et al., 2016).

La demanda mundial de energía primaria en 2019 fue de 606 EJ/año, frente a los 230 EJ en 1971. Y de esos 606 EJ, alrededor de 57 EJ (9.4%) se produjeron a partir de biomasa.

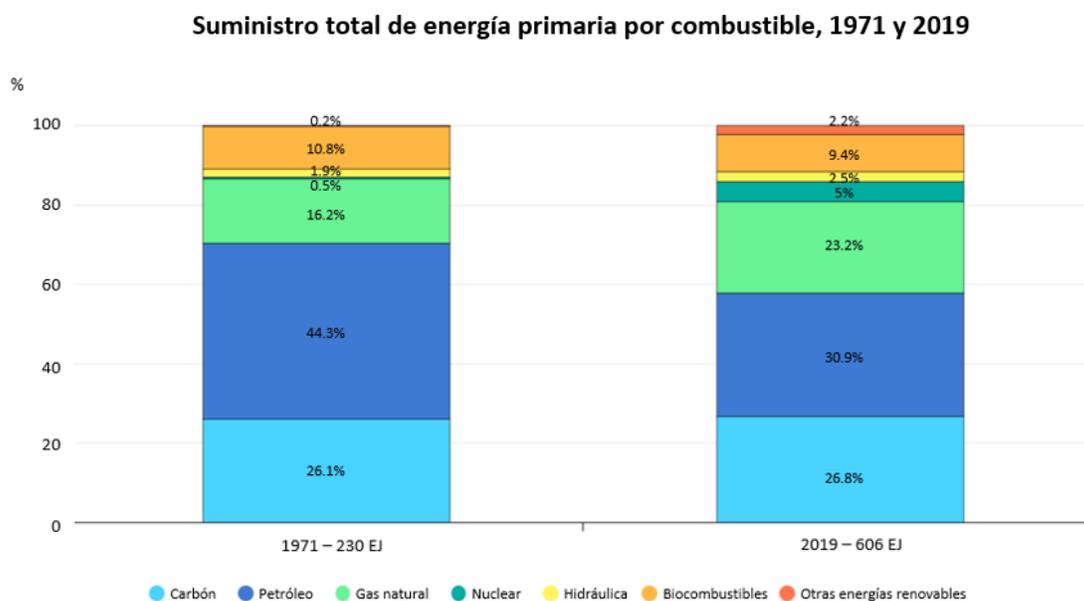


Figura 3. Gráfica de Suministro total de energía primaria por combustible, 1971 y 2019

Adaptado de: World Energy Balances IEA

La evaluación de expertos sugiere niveles potenciales de despliegue de bioenergía (energía renovable procedente de fuentes biológicas) para 2050 en el intervalo de 100-300 EJ/año. Asimismo, se prevé que el potencial anual de biomasa oscile entre 200 y 500 EJ/año a partir de cultivos energéticos, excedente de crecimiento forestal y al aumento de la actividad agrícola, silvicultura y a los residuos agrícolas de otros residuos orgánicos (incluidos los residuos sólidos urbanos).

Por su cuenta, el nivel de CO₂ en la atmósfera ha pasado de 317 ppm en 1958 a aproximadamente 415 ppm en 2021 y se prevé que alcance 450 ppm en el año 2040. Para múltiples investigadores, cruzar el umbral de 400 ppm es una señal de que esta generación

se encuentra firmemente asentada en el "Antropoceno", una época humana en la que las personas están ocasionando impactos importantes y duraderos en el planeta. Debido a la larga vida del CO₂, para otros significa que se está marchando inexorablemente hacia un "punto de no retorno", hacia un territorio desconocido para la raza humana (NASA, 2021). La Agencia de Energía (IEA, 2008) proyectó que se necesitará un 27% de penetración en el mercado de los biocombustibles para 2050 con el fin de mantener las emisiones de CO₂ debajo de 450 ppm.

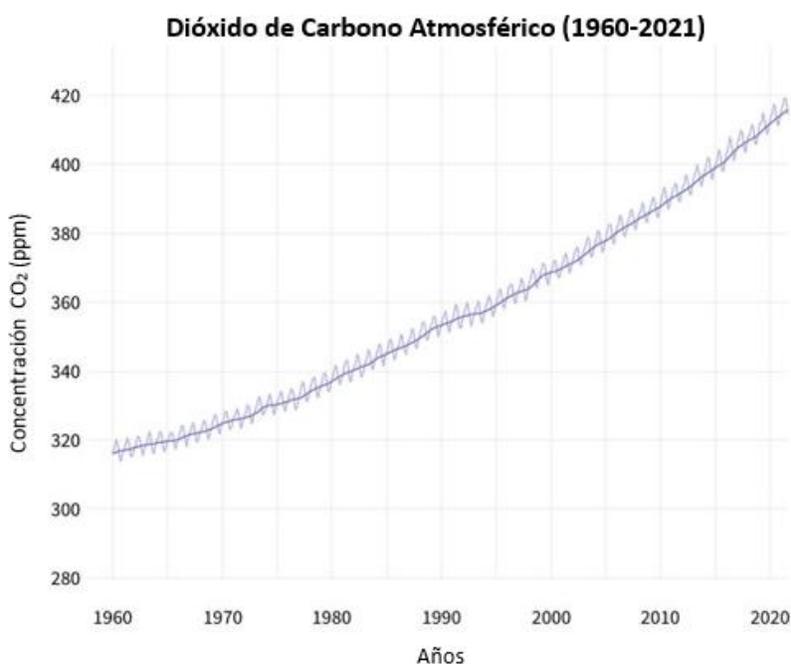


Figura 4. Gráfica de CO₂ Atmosférico 1960-2021. Adaptado de: Climate.gov (2021)

En los últimos 35 años, el suministro mundial de energía casi se ha duplicado, pero la contribución relativa de las energías renovables únicamente ha aumentado del 13 al 19%, incluyendo alrededor del 9.4% de la biomasa tradicional y alrededor del 9.7% de las energías renovables modernas (Sarkar et al., 2012; Espaux et al., 2015).

De acuerdo con Kumar et al., (2018c) la sustitución del petróleo por biocombustibles derivados de biomasa vegetal tiene el potencial de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. De misma forma, Khan et al. (2021) menciona que utilizar biocombustibles como vía para llevar a nuestro planeta a un desarrollo energético sostenible parece factible.

Dado que los combustibles fósiles líquidos dominan el sector del transporte, la sustitución de estos combustibles por energías renovables contribuiría significativamente a la realización de los objetivos globales de energía y sostenibilidad (Khan et al., 2021). En 2015, los biocombustibles redujeron las emisiones de carbono en 589.3 millones de toneladas (Biotechnology Innovation Organization, 2016).

En la actualidad, con las políticas medioambientales que impulsan la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, y con la ayuda de los recientes avances en la ingeniería de cultivos y los procesos de fermentación, la producción de bioetanol y biodiesel ha vuelto a convertirse en sustitutos parciales viables y de menor impacto ambiental que los combustibles derivados del petróleo (Liu et al., 2021).

2.3 Clasificación de biocombustibles por generación

2.3.1 Generación cero

Se basa en la utilización directa de la biomasa sin procesamiento alguno, más que la sola recolección y el transporte de esta por parte del hombre (Álvarez, 2018). Ejemplos de esta biomasa son la leña, la paja de trigo, el rastrojo (desechos agrícolas) de otras plantas de cultivo, el estiércol del ganado y el carbón vegetal. Este tipo de energéticos se ha empleado por la humanidad desde hace miles de años para la calefacción de hogares, la cocción de alimentos y el alumbrado interior y exterior de construcciones. Se utilizaron en las primeras fábricas de Inglaterra a lo largo de la Primera Revolución Industrial, sin embargo, fueron sustituidos por carbón mineral, un combustible fósil, ya que éste cuenta con una densidad energética superior a la biomasa. En la actualidad, en ciertos países de Europa y Norteamérica son hechos pellets y briquetas de madera por medio de la compresión de residuos forestales e industriales maderables, con objetivos energéticos. Aunque no son propiamente biocombustibles según la definición expuesta con anterioridad, se menciona esta generación con la finalidad de mostrar la base a partir de la cual surgieron histórica y tecnológicamente los biocombustibles.

2.3.2 Primera generación

Algunos de los insumos son de procedencia agrícola y están conformados por las partes alimenticias de las plantas, las cuales tienen un alto contenido de almidón, azúcares y aceites (Álvarez, 2018). Ejemplos de estas materias son el jugo de la caña de azúcar, granos de maíz, jugo de la remolacha o betabel, aceite de semilla de girasol, aceite de soya, aceite de palma, aceite de ricino, aceite de semilla de algodón, aceite de coco, aceite de maíz, aceite de maní o cacahuete, entre otros. También se emplea como insumos a las grasas animales, grasas y aceites de desecho provenientes de la cocción y elaboración de alimentos, y desperdicios sólidos orgánicos. Los biocombustibles son producidos empleando tecnología convencional como la fermentación (para azúcares y carbohidratos), transesterificación (para los aceites y grasas), y la digestión anaerobia (para los desperdicios sólidos orgánicos). Los aceites vegetales puros y los aceites y grasas usados también son empleados de forma directa para fines energéticos, previa refinación. Las principales ventajas de estos biocombustibles son su facilidad de procesamiento, sus bajas emisiones de gases de efecto invernadero (con excepciones como en el caso del maíz, donde el balance global de estas emisiones durante su procesamiento es casi nulo) y un balance positivo en dichas emisiones, pero tienen como desventajas el desvío de recursos alimenticios hacia la producción de energéticos, con un consecuente incremento en los precios de los alimentos vegetales y animales, y una mayor demanda de suelo y agua para la agricultura, en perjuicio de los ecosistemas y las sociedades.

2.3.3 Segunda generación

Los insumos son residuos agrícolas y forestales compuestos por celulosa (cadena polimérica de glucosa, principal carbohidrato usado en la producción de biocombustibles de primera generación), hemicelulosa y lignina (heteropolímeros amorfos que junto a la celulosa dan estructura a las plantas y conforman la biomasa “lignocelulósica”) (Álvarez, 2018). Ejemplos de estos insumos son el bagazo de la caña de azúcar, el rastrojo de maíz (tallo, hojas y olote), paja de trigo, aserrín, hojas y ramas secas de árboles, etcétera, así como papel usado, desperdicios de la industria del papel, y otros desperdicios celulósicos industriales. Los procesos de producción tienen un nivel de complejidad más alto que los de primera

generación, y como ejemplos destacan la sacarificación-fermentación y el proceso Fischer-Tropsch. Este último proceso también recibe los nombres de proceso GTL y proceso BTL, cuyas siglas en inglés provienen de “Gas-To-Liquids” y “Biomass-To-Liquids” respectivamente, los cuales consisten en la gasificación del carbón y de la materia lignocelulósica de la biomasa, para después sintetizar algún combustible líquido como el etanol. La ventaja principal en la producción de estos biocombustibles es la inexistencia de desviaciones de alimentos provenientes de la agricultura hacia el sector energético, pero su desventaja es la poca ganancia en disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero durante el procesamiento de los insumos, respecto a los biocombustibles de primera generación.

2.3.4 Tercera generación

Los insumos son vegetales no alimenticios de crecimiento rápido y con una alta densidad energética almacenada en sus componentes químicos, por lo que se les denomina “cultivos energéticos” (Álvarez, 2018). Entre estos vegetales están los pastos perennes, árboles y plantas de crecimiento rápido, y las algas, a las cuales se les clasifica en macroalgas (algas marinas macroscópicas) y microalgas (algas microscópicas y cianobacterias). Algunos de estos cultivos energéticos son organismos genéticamente modificados y otros fueron desarrollados mediante una reproducción selectiva de los organismos con una mayor producción de carbohidratos o lípidos (aceites y grasas), además de tener un menor tiempo de crecimiento y una mayor resistencia a condiciones adversas (clima extremo, plagas y enfermedades). La mayor parte de los procesos actuales de obtención de estos combustibles son muy diferentes a los de segunda generación, aunque sus nombres sean semejantes.

Las ventajas de estos biocombustibles son el secuestro de dióxido de carbono (CO₂) para la producción de los insumos y un balance positivo en la emisión de gases de efecto invernadero, pero su principal desventaja es la utilización de tierras de cultivo de alimentos para sembrar los insumos, con excepción de las algas que pueden ser reproducidas en el mar o en desiertos y tierras dañadas por sustancias industriales. Para evitar esta desventaja se ha propuesto emplear tierras erosionadas y degradadas para sembrar cultivos

energéticos. Otra de las desventajas más evidentes es la posible contaminación genética y bioquímica hacia otras especies (vegetales o animales) por parte de los organismos genéticamente modificados (Álvarez, 2018).

Esta generación se menciona para dar contexto a las distintas generaciones de biocombustibles existentes, sin embargo, no será analizada en este escrito.

2.3.5 Cuarta generación

Los biocombustibles son producidos a partir de bacterias genéticamente modificadas, las cuales emplean dióxido de carbono (CO₂) o alguna otra fuente de carbono para la obtención de los biocombustibles (Álvarez, 2018). A diferencia de las generaciones anteriores, en las que también se pueden emplear bacterias y organismos genéticamente modificados como insumo o para realizar alguna parte de los procesos, en la cuarta generación, la bacteria es la que efectúa la totalidad del proceso de producción.

Un objetivo de esta generación es proporcionar un método para la producción de biocombustibles o moléculas precursoras de biocombustibles a partir de insumos novedosos y utilizando organismos que aún no se han aprovechado para este fin. Otro objetivo es dar un sistema que utilice bacterias fotosintéticas modificadas para facilitar la producción de biocombustibles y precursores de biocombustibles. Otra ventaja de la invención es que el sistema produce biocombustibles con o sin fermentación o destilación, por lo que es más flexible desde el punto de vista del uso de la energía y la eficiencia en comparación con los procesos de producción de biocombustibles más avanzados (Laible & Snyder, 2011).

Actualmente esta generación de biocombustibles se encuentra en gran parte en fase teórica, ya que su desarrollo depende totalmente de una bacteria artificial y puede tener limitaciones termodinámicas importantes. Esta generación no será analizada en este escrito.



Figura 5. Generaciones de biocombustibles. Adaptado de: Mendes & Bordignon (2020).

La importancia de centrar el análisis en los biocombustibles de primera y segunda generación radica en su trascendencia histórica y su actual predominio en la producción mundial de biocombustibles. Las tecnologías y procesos asociados a esta generación sientan las bases para la creación y desarrollo de biocombustibles avanzados. Asimismo, el análisis de estas generaciones conducirá a una comprensión más profunda de la industria de los biocombustibles del presente y el pasado (Atabani et al., 2019).

Por último, la investigación intergeneracional es importante cuando se trata de resolver cuestiones relacionadas con la sostenibilidad, la eficiencia energética y la economía de los biocombustibles (Magdoulí, Monlau, Tremier, & Trably, 2017). Este enfoque proporcionará una ventana de análisis que busca generar información útil para la mejora constante de la producción de biocombustibles.

3. Alcance

Con una población creciente y una urbanización en constante expansión, la demanda y el consumo de combustibles fósiles se espera aumente en los próximos años, así como las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de la explotación de estos. Los biocombustibles presentan una alternativa parcial para abastecer energía y reducir el consumo de energías de fuentes no renovables. Tomando en cuenta lo anterior, se busca profundizar sobre la factibilidad de los biocombustibles (primera y segunda generación) como fuentes de energía primaria, analizando los insumos y tecnologías que estas emplean, así como su respectiva viabilidad en el mercado actual.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Presentar la información publicada sobre el potencial de los biocombustibles de primera y segunda generación como fuentes de energía primaria. La recopilación se hará mediante la búsqueda en bases de datos de artículos publicados entre los años 2005-2022.

4.2 Objetivos particulares

- Analizar la información publicada en fuentes técnicas confiables (Google Scholar, Elsevier, Tesiunam, entre otras) sobre el potencial de los biocombustibles de primera y segunda generación (individualmente) a través del análisis de insumos, tecnologías y viabilidad en el mercado.
- Examinar y comparar los resultados extraídos de las plataformas previamente mencionadas de la primera y segunda generación de biocombustibles.
- Dar una recomendación con base en la información rescatada de las plataformas antes mencionadas, de las ventajas y desventajas de cada una de las generaciones analizadas.

5. Análisis de Biocombustibles por Generación

5.1 Primera generación

5.1.1 Insumos, tecnología, biocombustibles y residuos obtenidos

En la producción de biocombustibles, la materia prima representa por sí sola más del 75% del costo total de producción de bioetanol y biodiesel (Hirani et al., 2018). La óptima selección de materias primas es crucial para garantizar un bajo costo de producción que pueda brindar una ventaja competitiva sobre los combustibles fósiles.

La dramática subida de los precios del petróleo registrada en los últimos años también ha permitido que los biocombustibles líquidos sean competitivos en cuanto a costos frente a los combustibles de transporte derivados del petróleo, lo que ha provocado un aumento en la investigación y producción en todo el mundo.

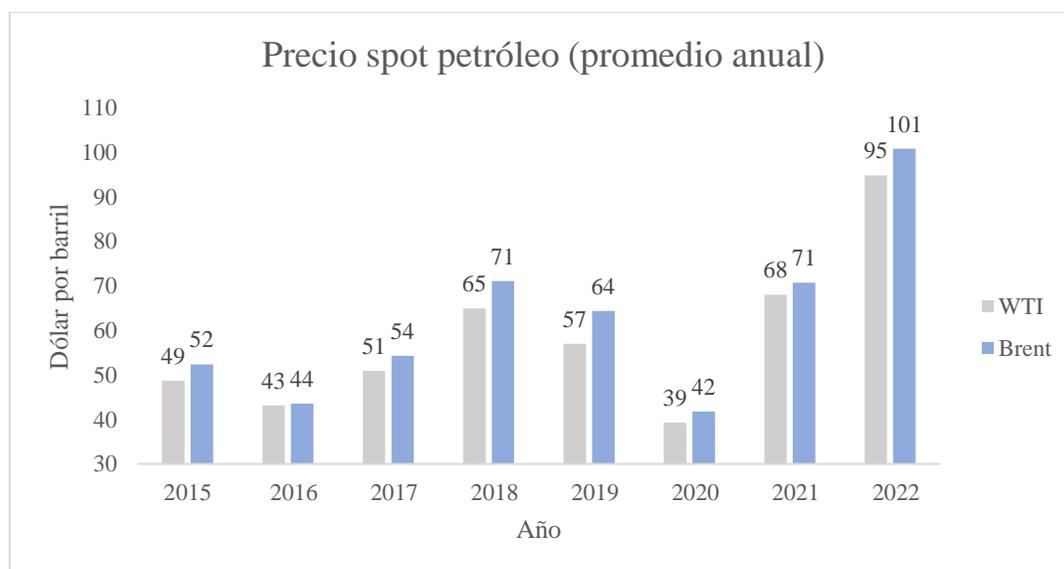


Figura 6. Precio spot de barril WTI y Brent, promedio anual. Adaptado de: EIA.gov

Los tres principales tipos de biocombustibles de primera generación utilizados comercialmente son el biodiesel (bioésteres), el bioetanol y el biogás, de los que se han

producido hasta ahora grandes cantidades en todo el mundo y cuyo proceso de producción ya se considera como una "tecnología establecida".

El biodiesel es un sustituto del diesel y se produce mediante la transesterificación de aceites vegetales y aceites y grasas residuales, con pequeñas modificaciones en el motor también puede servir como sustituto completo. El bioetanol es un sustituto parcial de la gasolina, y es un sustituto mayoritario de la gasolina en los vehículos flex-fuel o FFVs (capaces de funcionar únicamente con gasolina o con una mezcla de gasolina y etanol (entre 51% y 83%, dependiendo de la geografía y temporada del año)) y se obtiene principalmente a partir de azúcar o almidón mediante su fermentación. El bioetanol también puede servir de materia prima para el éter butílico terciario (ETBE), que se mezcla más fácilmente con la gasolina. El biogás, o biometano, es un combustible que puede utilizarse en vehículos de gasolina con ligeras adaptaciones. Puede producirse mediante la digestión anaerobia del estiércol líquido y otras materias primas digeribles. En la actualidad, el biodiesel, el bioetanol y el biogás se producen a partir de materias primas que también se utilizan para la alimentación.

El bioetanol es un biocombustible líquido que puede producirse a partir de diferentes tipos de biomasa como materia prima, utilizando diversas tecnologías de conversión. Es necesario que la biomasa utilizada cuente con cantidades apreciables de azúcar o con materiales que pueden convertirse en azúcar (para su posterior fermentación), como el almidón, la celulosa y las hemicelulosas. Para la producción de bioetanol de primera generación, las materias primas pueden clasificarse en tres tipos:

- (a) Cultivos que contienen azúcar: Caña de azúcar, trigo, raíz de remolacha, frutas, jugo de palma, etc.
- (b) Cultivos que contienen almidón: Granos como el trigo, cebada, arroz, sorgo dulce, maíz, etc. y plantas de raíz como la patata y la yuca.
- (c) Biomasa celulósica: Madera y residuos de madera, cedro, pino, madera, etc. residuos agrícolas y fibras.

Para el caso del biodiesel, a nivel mundial se han identificado unos 350 cultivos oleaginosos como fuentes potenciales de producción de biodiesel de primera generación; este es el factor más significativo del aumento constante de la producción de biodiesel (Hirani et al., 2018). Las materias primas para el biodiesel pueden clasificarse en cuatro grupos diferentes en función de su origen:

- (a) Cultivos de aceites vegetales comestibles: colza, soja, coco, palma, cacahuete, girasol, cártamo, maíz, semilla de algodón, camelina, etc.
- (b) Cultivos de aceites vegetales no comestibles: ricino, jatropha, malva marina, algas, halófitos, sebo chino, etc.
- (c) Aceite reciclado o aceite de cocina usado
- (d) Grasas animales: sebo, grasa amarilla, grasa de pollo, aceite de pescado y otros productos

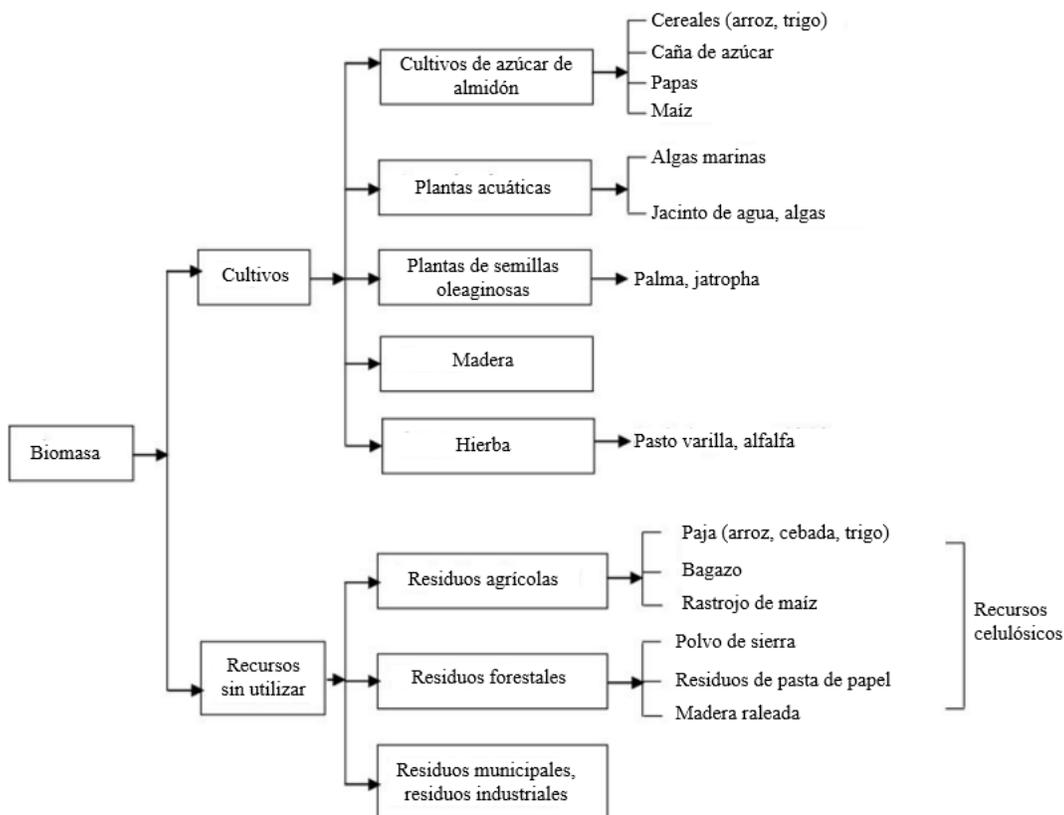


Figura 7. La biomasa como materia prima renovable. Adaptado de: Naik et al., 2010.

Finalmente, el gas generado a partir de la digestión orgánica en condiciones anaerobias por una amplia gama de microorganismos se conoce comúnmente como biogás, y es una fuente alternativa de energía producida tanto a pequeña escala en explotaciones agrícolas (granjas) como a gran escala en niveles industriales. El biogás está compuesto por mezclas de gases que incluyen metano (55- 65%), dióxido de carbono (35-40%), nitrógeno (0-3%), hidrógeno (0-1%) y sulfuro de hidrógeno (0-1%) (Hirani et al., 2018). La producción y utilización de biogás inició tanto en zonas rurales como industriales desde 1958. El biogás se produce a partir de una amplia gama de materias primas que incluyen residuos agrícolas, estiércol animal, lodos de depuradora, residuos sólidos municipales, vertederos y residuos orgánicos industriales.

Procesos de conversión de los biocombustibles de primera generación.

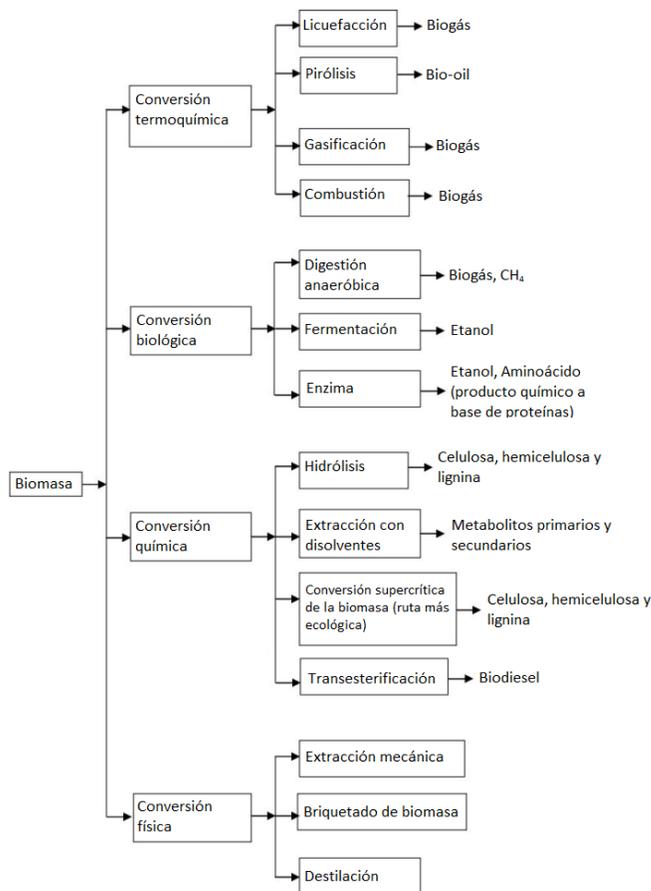


Figura 8. Procesos de conversión de biomasa (no exclusivo a primera generación).

Adaptado de: Naik et al., 2010.

A. Transesterificación

Los ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) a base de aceite vegetal, conocidos popularmente como biodiesel, están ganando importancia como sustituto o diluyente respetuoso con el medio ambiente del diesel. El biodiesel es un diesel alternativo, elaborado a partir de fuentes biológicas renovables, como los aceites vegetales y las grasas animales, mediante la reacción química del aceite o la grasa con un alcohol, en presencia de un catalizador homogéneo y/o heterogéneo. El producto de la reacción es una mezcla de ésteres metílicos, que se conocen como biodiesel y glicerol (coproducto de alto valor).

A.1. Transesterificación por catálisis homogénea.

La transesterificación es una reacción reversible y procede esencialmente por la mezcla de los reactivos en la que el catalizador es un ácido o una base líquida. El proceso conocido como transesterificación, se muestra en la Fig. 9.

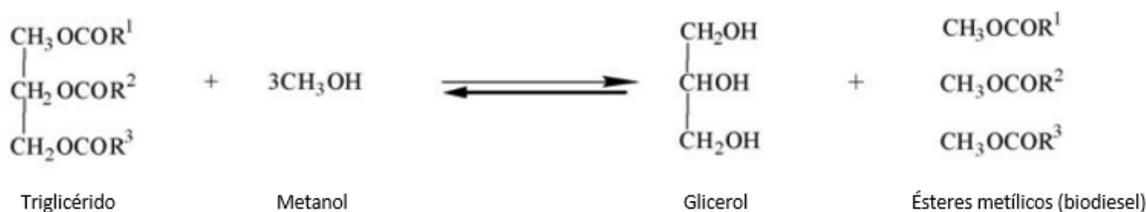


Figura 9. Proceso de transesterificación (alcohólica). Adaptado de: Naik et al., 2010.

A.2. Transesterificación por catálisis heterogénea.

Para aceites con alto contenido en ácidos grasos libres (FFA) no es posible realizar un proceso de transesterificación básica porque disminuye la conversión del aceite en éster metílico debido a la reacción de saponificación. Para aceites con alto contenido de ácidos grasos libres se recomienda el uso de catalizadores sólidos, esto se debe a que los catalizadores ácidos sólidos pueden catalizar simultáneamente la transesterificación de los triglicéridos y la esterificación del ácido graso libre (FFA) presente en el aceite a ésteres metílicos (biodiesel). Los catalizadores ácidos sólidos tienen un gran potencial para sustituir a los catalizadores homogéneos, dado a que reducen los problemas de separación, corrosión e impacto medioambiental (Naik et al., 2010). La producción de biodiesel catalizada por ácidos sólidos mediante la esterificación y transesterificación simultánea de aceite de baja calidad que

contiene un alto contenido de FFA fue probada por Kulkarni et al., en 2006. El mecanismo de reacción de la esterificación y transesterificación simultáneas utilizando ácido de Lewis se muestra en la Fig. 10. En dónde la esterificación tiene lugar entre los ácidos grasos libres (RCOOH) y el metanol (CH₃OH) mientras que la transesterificación tiene lugar entre el triglicérido (RCOOR') (tomado como representante de los triglicéridos en este caso) y el metanol adsorbido en el sitio ácido (L⁺) de la superficie del catalizador. La interacción del oxígeno carbonílico del ácido graso libre o del monoglicérido con el sitio ácido del catalizador forma un carbocatión. El ataque nucleofílico del alcohol al carbocatión produce un intermedio tetraédrico.

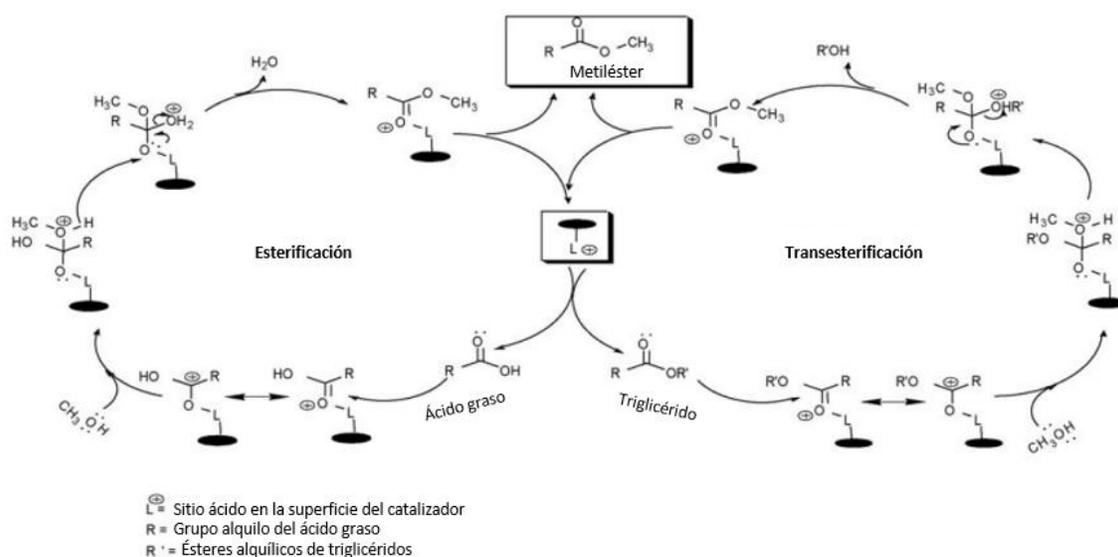


Figura 10. Esterificación y transesterificación simultáneas catalizadas por ácido sólido.

Adaptado de: Naik et al., 2010.

Durante la esterificación, el intermedio tetraédrico elimina la molécula de agua para formar un mol de éster (RCOOCH₃). El mecanismo de transesterificación puede extenderse a los tri- y di-glicéridos. Es bien sabido que la transesterificación es una reacción escalonada. En la secuencia de la reacción, el triglicérido se convierte paso a paso en di- y monoglicérido y finalmente en glicerol. El intermedio tetraédrico que se forma durante la reacción elimina los di-, monoglicéridos y el glicerol cuando los tri-, di y monoglicéridos entran en contacto con los sitios ácidos, respectivamente, para dar un mol de éster (RCOOCH₃) en cada paso. En algunos casos, la esterificación y la transesterificación producen el mismo producto final,

ésteres metílicos. Además, como se muestra en la Fig. 10, el catalizador se regenera tras las reacciones de esterificación y transesterificación simultáneas. El uso de alcohol en exceso favorece la reacción hacia delante y, por tanto, maximiza el rendimiento del éster (Naik et al., 2010).

B. Procesos de conversión del etanol.

Una gran variedad de materias primas que contienen carbohidratos se han utilizado para la producción de etanol mediante un proceso de fermentación. Estas materias primas, como se ha mencionado anteriormente, se clasifican en tres categorías:

- (a) Cultivos que contienen azúcar
- (b) Cultivos que contienen almidón
- (c) Biomasa celulósica

El alcohol producido a partir de cultivos alimenticios como el maíz, el trigo, la cebada o el sorgo dulce se denomina alcohol de grano, mientras que el etanol producido a partir de biomasa lignocelulósica, como los residuos agrícolas (p. ej., paja de arroz, paja de trigo) y las hierbas (pasto varilla) se conoce como etanol de biomasa o bioetanol. Ambos alcoholes se producen mediante un proceso bioquímico (Naik et al., 2010).

En el caso del almidón, su estructura química consiste en un polímero de cadena larga de glucosa. El almidón macromolecular no puede ser fermentado directamente a etanol mediante la tecnología de fermentación convencional, en vez de eso la estructura macromolecular se descompone primero en glucosa más simple y pequeña. En este proceso, las materias primas de almidón se trituran y se mezclan con agua para producir un batido que suele contener entre un 15 y un 20% de almidón. El batido se cuece a continuación a su punto de ebullición o por encima del mismo y se trata posteriormente con dos preparaciones enzimáticas. La primera enzima hidroliza las moléculas de almidón hasta convertirlas en cadenas cortas de glucosa. La primera enzima es la amilasa, que libera oligosacáridos de "maltodextrina" por proceso de licuefacción. La dextrina y los oligosacáridos son hidrolizados posteriormente por enzimas como la pullulanasa y la glucoamilasa en un

proceso conocido como sacarificación. La sacarificación convierte todos los dextranos en glucosa, maltosa e isomaltosa. Luego, el batido se enfría a 30 °C y se añade la levadura para su posterior fermentación.

La producción de etanol generalmente se obtiene a través de la hidrólisis enzimática de cultivos que contienen almidón como el maíz y el trigo. Las instalaciones de producción de etanol de maíz pueden clasificarse en dos grupos: procesos de molienda húmeda y seca. Los molinos secos suelen ser de menor tamaño (capacidad) y se construyen principalmente para la fabricación de etanol (Naik et al., 2010). Según Shapouri et al., las plantas modernas de molienda húmeda son capaces de producir 1 galón de etanol consumiendo 35,150 BTU de energía térmica y 2,134 KWh de electricidad. Si se utilizan tamices moleculares, el consumo de energía térmica desciende a 32,150 BTU/gal.

El grano de almidón se prepara para la fermentación del etanol por medio de molienda en húmedo o la molienda en seco, como se muestra en la Fig. 11a y b. El proceso de etanol por molienda húmeda produce una variedad de valiosos coproductos como nutracéuticos, productos farmacéuticos, ácidos orgánicos y disolventes. Mientras que el proceso de molienda en seco está especialmente diseñado para la producción de etanol y alimentos para animales.

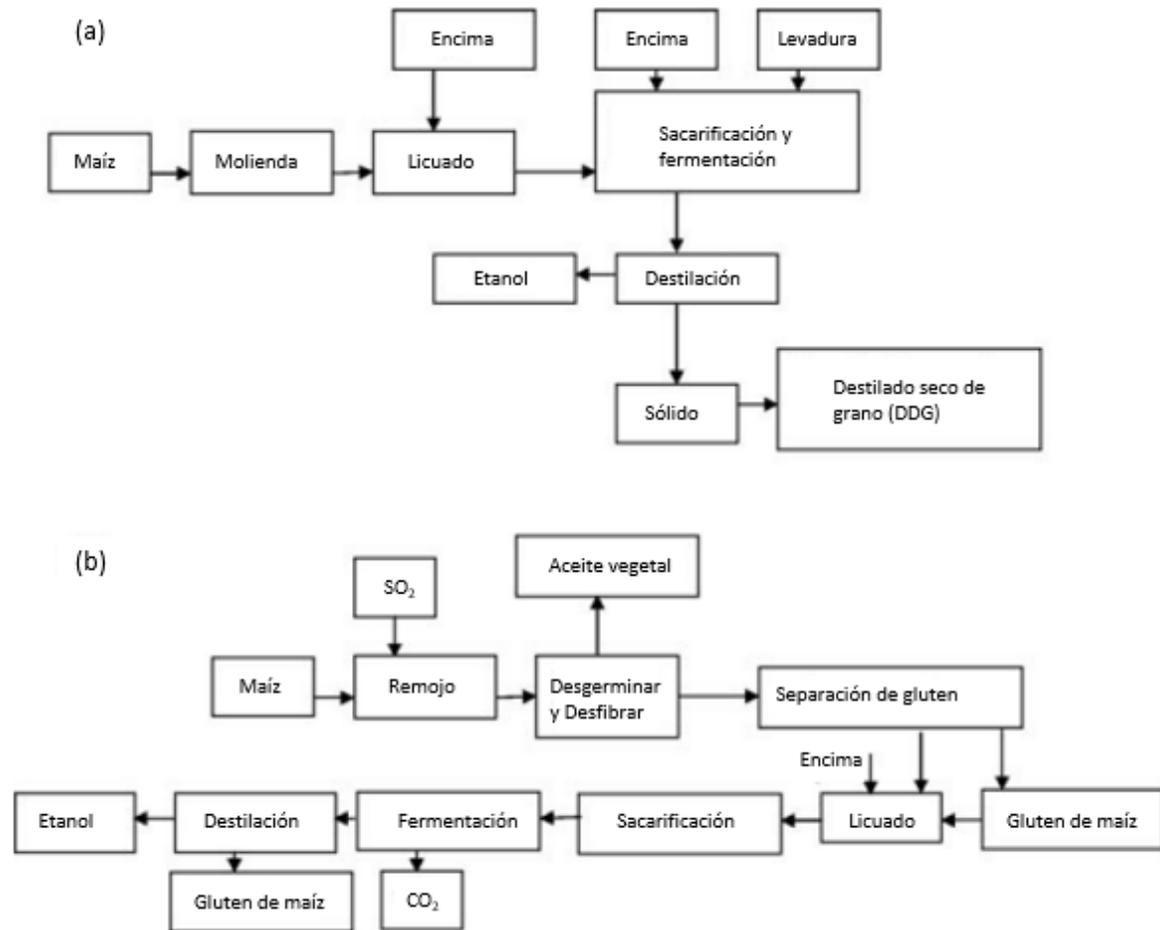


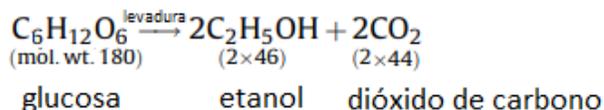
Figura 11. (a) Proceso de molienda en seco y (b) Proceso de molienda en húmedo.

Adaptado de: Naik et al., 2010.

C. Proceso de fermentación.

El término fermentación puede definirse generalmente como el proceso metabólico en el que un sustrato orgánico sufre cambios químicos debido a las actividades de las enzimas secretadas por los microorganismos. Existen dos tipos básicos de fermentación, aeróbica y anaeróbica, dependiendo de si se necesita o no oxígeno (respectivamente) en el proceso. Hay miles de microorganismos en la naturaleza capaces de proporcionar cambios fermentativos. Algunos de ellos son capaces de producir etanol a partir de azúcar y almidón. Los microorganismos empleados para la producción de etanol se clasifican en tres categorías: levaduras (especies de *Saccharomyces*), bacterias (especies de *Zymomonas*) y mohos (micelio). Estos microorganismos se encuentran en la naturaleza y son muy selectivos en sus características de fermentación, algunos de ellos fermentan específicamente las hexosas o las

pentosas, o mezclas de ambas. Existen esfuerzos por parte de varios investigadores para producir microorganismos ideales, que sean capaces de producir etanol a partir de cualquier carbohidrato.



Como ya se mencionó, el almidón es un polímero de la glucosa y no puede ser fermentado directamente a etanol mediante la tecnología de fermentación convencional. Previo al proceso de fermentación, el almidón se descompone en moléculas de glucosa una vez tratado con levaduras como las especies *saccharomyces cerevisiae*, *saccharomyces uvarum*, *schizosaccharomyces pombe* y *kluveromyces*. En condiciones anaeróbicas, las levaduras metabolizan la glucosa en etanol. Teóricamente, la máxima eficiencia de conversión de la glucosa en etanol es del 51% con base en el peso, lo que resulta de un cálculo estequiométrico de: (Naik et al., 2010).

$$\begin{aligned}
 & \frac{2 \times (\text{peso molecular del etanol})}{\text{peso molecular de la glucosa}} \times 100 \\
 & \frac{2 \times \left(\frac{46 \text{ g}}{1 \text{ mol}}\right)}{\frac{180 \text{ g}}{1 \text{ mol}}} \times 100 = 51\%
 \end{aligned}$$

Sin embargo, una parte de la glucosa es utilizada por la levadura para la producción de masa celular y para productos metabólicos distintos del etanol, lo que reduce la eficiencia de conversión respecto a su máximo teórico. En la práctica, entre el 40 y el 48% de la glucosa se convierte realmente en etanol con una eficiencia de fermentación del 46%, es decir, 1000 kg de azúcar fermentable producirían unos 583 litros de etanol puro (considerando gravedad específica a 20 °C de 0.789) (Naik et al., 2010). El restante 49% del azúcar no se convierte completamente en etanol. En su lugar, se convierte en una variedad de remanentes y subproductos. Estos subproductos incluyen principalmente dióxido de carbono y subproductos no alcohólicos como glicerol, ácido acético, ácido láctico, ácidos grasos volátiles y otros compuestos orgánicos (Serna-Loaiza et al., 2016).

D. Digestión anaerobia de la biomasa

La digestión anaerobia de los residuos sólidos es un proceso muy similar al utilizado en la producción de biogás (Fig. 12). Se utilizan bacterias anaeróbicas en ausencia de oxígeno para descomponer la materia orgánica de la biomasa, y durante la conversión se produce una mezcla de gases de metano y dióxido de carbono. La proporción típica de la mezcla de gases es de 60-70% de metano y 30% de dióxido de carbono. El gas tiene un valor calorífico de 650-750 BTU/ft³. Debido al aumento del costo de la energía, la digestión anaerobia de la biomasa es una alternativa atractiva para la producción de combustible y biofertilizante para el cultivo orgánico. Las digestiones anaerobias en vertederos son una fuente potencial de producción de metano a partir de residuos sólidos. La digestión anaerobia de la parte biodegradable de los residuos sólidos municipales (principalmente biomasa y residuos biológicos) produce metano y dióxido de carbono en cantidades aproximadamente iguales. Estos dos componentes, junto con el nitrógeno atmosférico, el oxígeno y las trazas de compuestos orgánicos, se conocen como gas de vertedero (LFG). Según la Agencia de Protección Ambiental (EPA), por cada libra (454 gramos) de residuos orgánicos biodegradables se puede producir entre 10 y 12 pies cúbicos estándar de gas (28.7 – 34.4 kJ). El gas de vertedero es similar al gas natural de baja calidad, ya que requiere la eliminación de contaminantes orgánicos volátiles y del CO₂ para obtener un valor comercial sustancial. La eliminación de estos contaminantes tóxicos (cloruro de vinilo y sulfuro de hidrógeno) y otros contaminantes del LFG requieren de tecnología de separación eficaz para que éstos puedan ser tratados y utilizados posteriormente como sustituto del gas natural.

El uso convencional del LFG para obtener energía incluye la generación de electricidad mediante un motor de combustión interna, una turbina, una microturbina, el uso directo en calderas, secadores, hornos, invernaderos y la cogeneración. La investigación actual del LFG se centra en la generación de combustibles líquidos en lugar del combustible gaseoso de la digestión anaerobia, debido al alto costo asociado a la purificación y recolección del metano. La producción de metanol como líquido tiene un par de ventajas evidentes. La primera, se pueden fabricar combustibles bajos en azufre y ceniza para su uso comercial. Por otra parte, el combustible líquido es mucho más fácil de manejar, almacenar y transportar que los productos gaseosos. Mediante la utilización de los residuos de biomasa lignocelulósica a

través del proceso de digestión anaeróbica ilustrado en la Fig. 12 se obtienen combustibles líquidos y biofertilizantes para fines agrícolas.

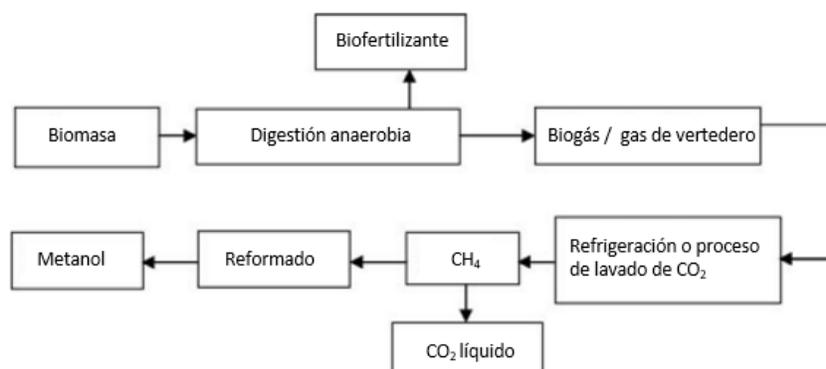


Figura 12. Digestión anaerobia. Adaptado de: Naik et al., 2010.

E. Biorrefinería de cultivo completo

Una biorrefinería de cultivo completo procesa y consume toda la cosecha para obtener productos de utilidad. Las materias primas, como las semillas oleaginosas, pueden utilizarse como materia prima en las operaciones unitarias de una biorrefinería de cultivo completo, como se muestra en la Fig. 13. En este contexto, se ha analizado el ejemplo del cultivo de semillas oleaginosas de *jatropha*. El grano de la semilla de *jatropha* contiene un 35-40% de aceite y se pueden producir entre 1 y 1.5 toneladas de aceite por cada hectárea de cultivo. El proceso de conversión de la biomasa en energía se inicia con la separación de la biomasa en diferentes componentes que se tratan por separado. El aceite obtenido actúa como material de partida para la producción de biodiesel o puede someterse a una modificación química para producir productos oleoquímicos, mientras que la fracción de *de-oil cake* (proteína residual), tras su purificación, puede utilizarse como materia prima básica para la síntesis de productos químicos valiosos o para la gasificación (ilustrado en Fig. 13). La biomasa lignocelulósica producida durante las operaciones de la refinería puede servir como material de partida en la biorrefinería lignocelulósica para la producción de syngas, donde el syngas puede utilizarse como material básico para la síntesis de combustibles y metanol mediante el proceso Fischer-Tropsch (explicado en capítulo 4.2.1, proceso de segunda generación)

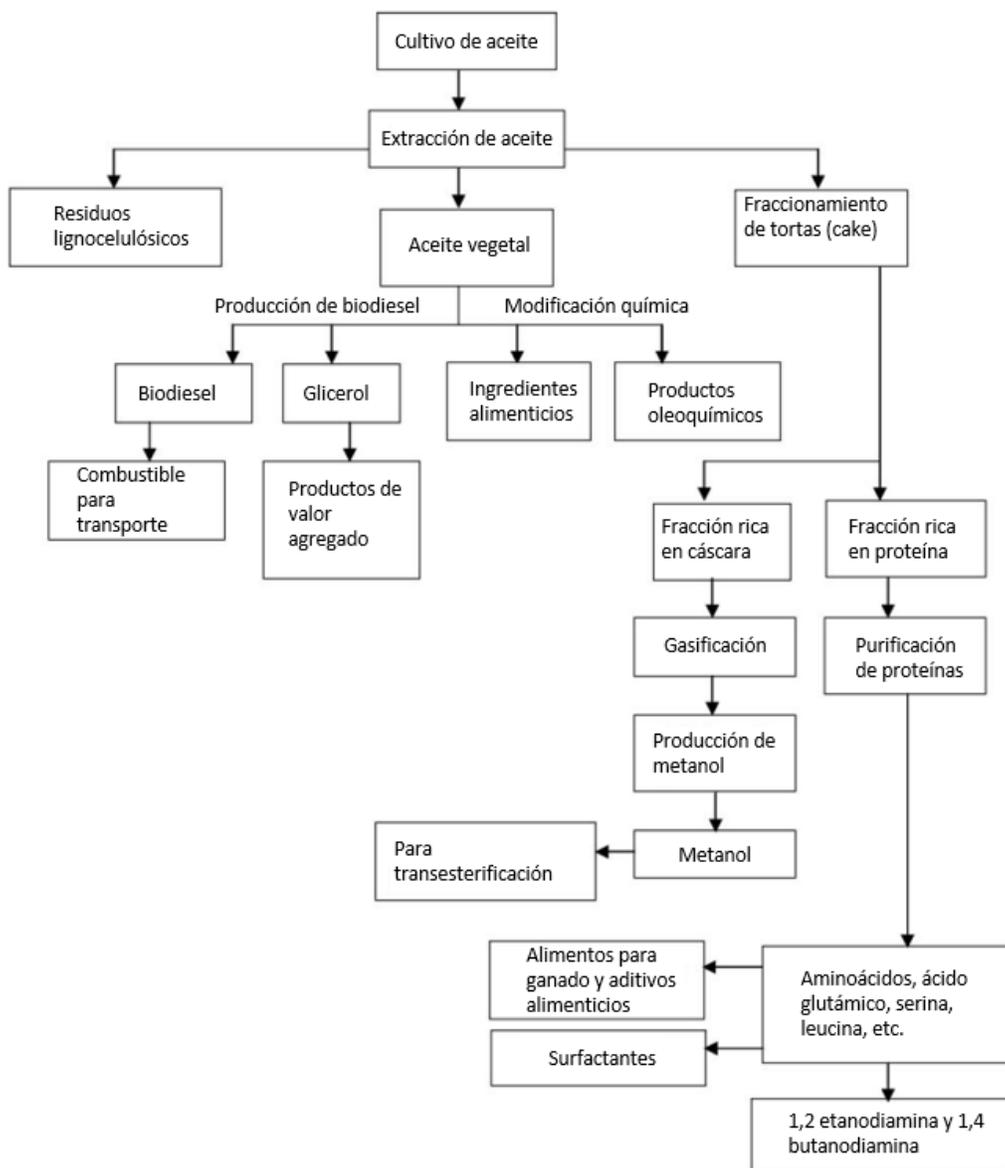
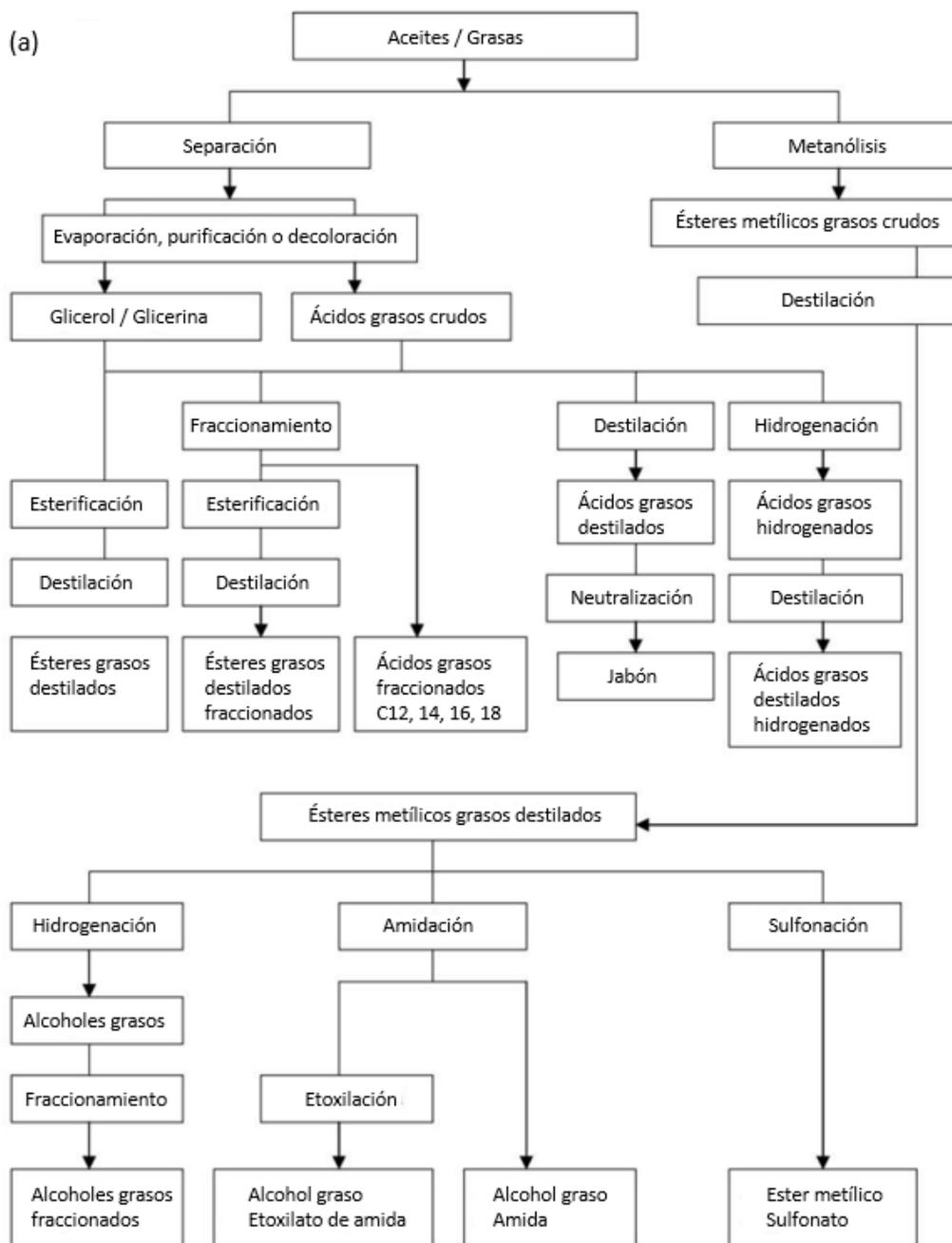


Figura 13. Biorrefinería de cultivos enteros. Adaptado de: Naik et al., 2010.

E.1. Oleoquímicos

Los oleoquímicos son sustancias químicas derivadas de aceites y grasas naturales de origen vegetal y animal. Básicamente, los oleoquímicos se refieren a los ácidos grasos y al glicerol derivados de la división de las estructuras de los triglicéridos de los aceites y las grasas. Sin embargo, también incluyen a los derivados de la posterior modificación del grupo del ácido carboxílico de los ácidos grasos por medios químicos o biológicos, y otros compuestos obtenidos de reacciones posteriores de estos derivados. Los oleoquímicos se suelen clasificar

en oleoquímicos básicos, como los ácidos grasos, los ésteres metílicos grasos, los alcoholes grasos, las aminas grasas y el glicerol; y sus derivados obtenidos a partir de modificaciones químicas posteriores de estos oleoquímicos básicos, se muestran en la Fig. 14a y b.



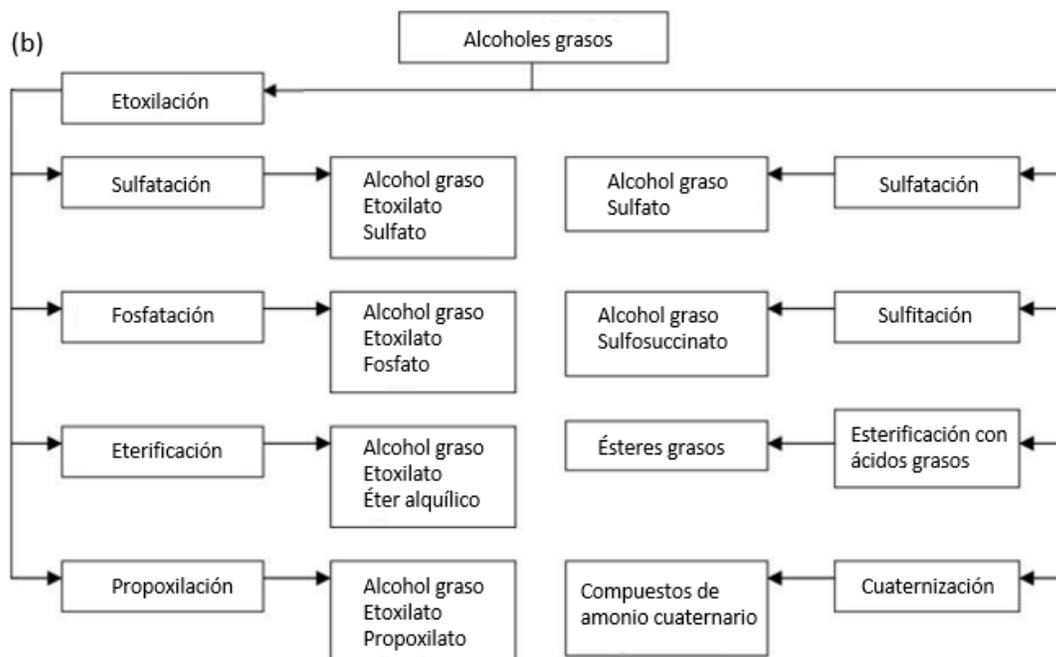


Figura 14. (a) Productos oleoquímicos básicos y derivados y (b) flujo de producción de productos oleoquímicos básicos y derivados. Adaptado de: Naik et al., 2010.

De hecho, hasta la década de 1980, casi el 95% de los aceites naturales se utilizaban en alimentos y sólo un pequeño porcentaje se empleaba en aplicaciones no alimentarias, como la fabricación de jabones y los aceites de secado. No fue hasta después de la década de 1980 que los oleoquímicos encontraron amplios usos tanto en aplicaciones alimentarias como no alimentarias, que anteriormente eran del dominio de los "productos químicos sintéticos" derivados del petróleo o más conocidos como petroquímicos (Tabla 1).

En la actualidad, los oleoquímicos se utilizan en la fabricación de productos como alimentos y grasas de especialidad, jabones y detergentes, cosméticos y productos de cuidado personal, lubricantes y grasas, aceite de secado, revestimientos de superficies y polímeros, y biocombustibles. En teoría, los oleoquímicos podrían sustituir parte de las aplicaciones de los petroquímicos (Tabla 1). Por múltiples razones, en primer lugar, los productos oleoquímicos proceden de recursos renovables, en comparación con los productos petroquímicos, que se obtienen a partir de un petróleo agotable o no renovable; en segundo lugar, los productos derivados de los oleoquímicos se degradan con mayor facilidad y, por

tanto, no suponen una amenaza para el medio ambiente; en tercer lugar, los productos derivados del petróleo utilizan más energía y provocan mayores emisiones de contaminantes como NO_x, SO₂, CO e hidrocarburos.

Tabla 1. Aplicaciones de productos oleoquímicos. Adaptado de: Naik et al., 2010.

| Industria / Producto | Uso |
|-----------------------------------|--|
| Pieles | Ablandamiento, acondicionamiento, pulido y tratamiento de pieles |
| Metalurgia y fundición | Aceites de corte, refrigerantes, compuestos de pulido y abrillantado |
| Minería | Agentes tensoactivos para la flotación de espuma de mineral y perforación de pozos de petróleo |
| Caucho | Vulcanizadores, ablandadores y desmoldeantes |
| Electrónicos | Aislamiento y componentes plásticos especiales |
| Lubricantes y fluidos hidráulicos | Lubricantes industriales generales y especiales y aceites base biodegradables, fluidos hidráulicos |
| Pinturas y revestimientos | Resinas alquídicas, aceites secantes, barnices y otros revestimientos protectores |
| Impresión y reciclado de papel | Tintas de impresión, revestimientos de papel, impresión fotográfica, tensoactivos de destintado |
| Plásticos | Estabilizadores, plastificantes, agentes desmoldeantes, lubricantes, agentes antiestáticos, auxiliares antiniebla, emulsionantes de polimerización |
| Biocombustibles | Ésteres metílicos y alcoholes |
| Ceras | Ingredientes de ceras y pulidores |
| Jabones y detergentes | Productos industriales y domésticos, tensoactivos de especialidad |
| Salud y cuidado personal | Medios de cultivo, coadyuvantes de la elaboración de comprimidos, jabones, shampoos, cremas, lociones |
| Alimentación | Emulsificantes, confitería y grasas especiales para pan, pasteles, bollería, margarina, helados y otros productos alimenticios |
| Alimentos para animales | Suplementos nutricionales |

E.2. Proteína residual (*De-oil cake*)

La biomasa utilizada para la producción de biodiesel generaría millones de toneladas de proteínas residuales, si no fuera por el fraccionamiento de tortas (*cake*) (Fig. 13). El uso de proteínas para aplicaciones no alimentarias es actualmente más limitado en comparación con la utilización de derivados de ácidos grasos. La proteína comestible puede utilizarse para la producción de aminoácidos esenciales para la alimentación animal y el consumo humano (Fig. 13). Algunas de las tortas de semillas oleaginosas no comestibles, como la jatropha, el neem, la karanja, etc., son utilizadas para producir bioplaguicidas y aminoácidos para aplicaciones no alimentarias. Sanders et al., 2007 informó de la aplicación de materias primas basadas en proteínas para la producción de 1,2-etanodiamina y 1,4-butanodiamina a partir de aminoácidos (Fig. 13). Esta producción de aminoácidos a partir de proteína residual añadiría valor a los cultivos destinados para la producción de biocombustibles a gran escala. Asimismo, la producción de 1,2-etanodiamina a partir de etileno es versátil y se puede conseguir a través de diversas rutas (Fig. 15).

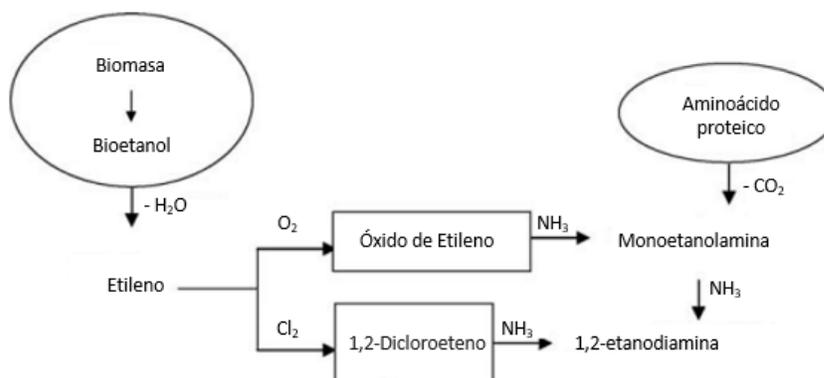


Figura 15. Producción de 1,2-etanodiamina por diversas rutas. Adaptado de: Naik et al., 2010.

La 1,2-etanodiamina y la 1,4-butanodiamina pueden sintetizarse a partir de aminoácidos como la serina y la arginina, respectivamente. La descarboxilación de la serina formará etanolamina, que se convierte en diamina por adición de amoníaco. La arginina puede ser hidrolizada a ornitina y urea. La ornitina formará 1,4- butanodiamina tras la carboxilación. Los tensoactivos basados en proteínas son los tensoactivos blandos más valiosos, dado que la estructura y propiedades de los aminoácidos de estos tensoactivos son similares al tejido

de los aminoácidos de la piel, provocando una fuerte afinidad y una sensación de suavidad en la piel. Asimismo, los derivados acílicos del ácido glutámico y la serina son muy eficaces en comparación con los tensoactivos convencionales. Esta producción de tensoactivos basados en proteínas implica la hidrólisis de la proteína con ácido sulfúrico, seguida de la acilación con RCOCl ($\text{R}=\text{C}_{12}\text{-C}_{18}$) para formar sales de sodio de aminoácidos acilados que se convierten en ésteres de aminoácidos por esterificación con un alcohol graso.

Residuos

La producción de biocombustibles de primera generación, como el bioetanol, el biodiesel y el biometano, ofrece una alternativa prometedora para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar el impacto ambiental de nuestras necesidades energéticas. Sin embargo, al igual que con cualquier proceso de producción, también se generan subproductos y residuos que requieren una gestión adecuada. A continuación, se describirán los residuos más comunes obtenidos en el proceso de producción de bioetanol, biodiesel y biometano de primera generación, así como su impacto ambiental y opciones de manejo y disposición asociadas a cada uno de ellos, con el objetivo de minimizar el impacto ambiental y maximizar la eficiencia del proceso.

Es fundamental destacar que estos son solo algunos de los residuos más comunes generados en el proceso de producción de biocombustibles de primera generación. Cada planta de producción puede tener diferentes subproductos o residuos, por lo que es necesario evaluar cada caso de manera individual para determinar el manejo y la disposición más adecuados.

La producción de **bioetanol de primera generación** a partir de fuentes de biomasa como maíz, trigo y caña de azúcar genera varios residuos o subproductos no deseados, algunos de ellos:

1. Bagazo de caña de azúcar: Durante la extracción del jugo de caña de azúcar para la producción de etanol, se genera una cantidad significativa de bagazo como residuo. Este subproducto se utiliza como combustible en las plantas de etanol debido a su alto contenido

de celulosa y hemicelulosa. Además, el bagazo de caña de azúcar se puede utilizar para la generación de energía eléctrica y térmica en las instalaciones, reduciendo así la dependencia de fuentes de energía no renovables (Iswanto, 2015). A pesar de ser utilizado como combustible y facilitar la generación de energía renovable, la quema del bagazo de caña de azúcar puede contribuir a la emisión de gases contaminantes y partículas finas en la atmósfera, especialmente si no se utilizan tecnologías adecuadas de control de emisiones (Iswanto, 2015).

2. Vinaza: La vinaza es un subproducto líquido que se obtiene durante la fermentación. El manejo adecuado de la vinaza implica su aplicación como fertilizante líquido en la agricultura. Sin embargo, debido a su alta carga de elementos contaminantes, se recomienda una dosificación cuidadosa y la implementación de medidas preventivas para minimizar el impacto ambiental en los suelos (Maghsoudi et al., 2018). La aplicación inadecuada o excesiva de vinaza como fertilizante puede resultar en la acumulación de nutrientes en el suelo y la lixiviación de compuestos contaminantes hacia las fuentes de agua, causando la eutrofización de los cuerpos de agua y afectando la calidad del agua (Maghsoudi et al., 2018).

3. Torta de destilería: Durante el proceso de producción de etanol, se genera una torta sólida conocida como torta de destilería. Esta torta se utiliza principalmente como alimento para animales, ya que contiene nutrientes esenciales como proteínas, minerales y vitaminas. Al utilizar la torta de destilería como alimento animal, se reduce la necesidad de piensos convencionales y se le da un valor agregado a este residuo (Pradeep et al., 2017). Si bien la utilización de la torta de destilería como alimento animal es beneficiosa para reducir la dependencia de los piensos convencionales, su manejo inadecuado o su disposición sin control pueden tener impactos negativos en el medio ambiente, como la contaminación del suelo y de las aguas superficiales y subterráneas (Pradeep et al., 2017).

4. Biogás: Durante algunos procesos de fermentación como en el de la caña de azúcar, se produce biogás como subproducto. El biogás se puede utilizar para generar energía eléctrica y térmica. Además, el biogás puede someterse a un proceso de purificación para obtener biometano, lo que permite su uso en el transporte o como combustible alternativo (Rosala et

al., 2019). Sin embargo, su obtención puede tener efectos negativos. Estos efectos incluyen la emisión de gases de efecto invernadero durante el proceso de digestión anaeróbica, los olores desagradables y la posible contaminación del aire, así como la competencia de cultivos y el uso de recursos agrícolas. Es fundamental implementar tecnologías y prácticas que minimicen estas implicaciones negativas, como el control de emisiones, el tratamiento adecuado del biogás, la adopción de buenas prácticas de gestión y una planificación equilibrada para optimizar la producción de bioetanol y reducir su impacto ambiental (Amon et al., 2017; Astals et al., 2014; Gómez et al., 2019).

5. Cachaza: La cachaza es un residuo sólido que se obtiene durante la clarificación del jugo de caña de azúcar. Este subproducto se utiliza como fertilizante orgánico en la agricultura debido a su contenido de nutrientes. Sin embargo, es importante asegurarse de su correcta aplicación para evitar la contaminación de los suelos y las fuentes de agua (Chen et al., 2017). La aplicación excesiva o inadecuada de cachaza puede llevar a la acumulación de nutrientes y afectar la calidad del suelo y la calidad del agua debido a la lixiviación de compuestos contaminantes (Chen et al., 2017)

La producción de **biodiesel de primera generación** a partir de aceites vegetales y grasas animales es una ruta ampliamente utilizada para la obtención de biocombustibles. Sin embargo, este proceso también genera una serie de subproductos o residuos no deseados, a continuación, se mencionarán algunos de los más comunes:

1. Glicerol: Durante la producción de biodiesel a partir de aceites vegetales o grasas animales, se genera glicerol como subproducto. El glicerol puede ser utilizado en diferentes aplicaciones como la industria de alimentos, cosméticos y productos farmacéuticos. Sin embargo, debido a la gran cantidad de glicerol producido en relación con la demanda, es importante buscar alternativas adicionales para su uso o someterlo a procesos de purificación para obtener un grado de alta pureza (Hu et al., 2018). Aunque el glicerol puede ser utilizado en diversas aplicaciones de valor agregado, es fundamental considerar la cantidad generada en relación con la demanda y la capacidad de utilización. El exceso de glicerol puede generar problemas de gestión y disposición, incluyendo los desafíos asociados con su

almacenamiento y transporte, así como el potencial riesgo ambiental si se descarta de manera inadecuada (Hu et al., 2018).

2. Lodos: Durante el proceso de transesterificación del aceite para producir biodiesel, se generan lodos como residuo sólido. Estos lodos suelen contener impurezas y un alto contenido de humedad. Para gestionar adecuadamente los lodos, se pueden considerar diferentes enfoques, como la separación de líquidos y sólidos, seguidos de un proceso de secado y disposición adecuada. Además, se pueden explorar opciones de tratamiento de los lodos, como el compostaje o su uso como aditivo en la producción de cemento (Wu et al., 2016). Los lodos generados pueden contener componentes contaminantes y requieren un tratamiento adecuado. La gestión inadecuada de los lodos puede dar lugar a la liberación de compuestos tóxicos en el suelo y el agua, lo que representa un riesgo para el medio ambiente y la salud humana. Es esencial contar con sistemas de manejo de lodos que cumplan con las regulaciones ambientales y aseguren la protección de los recursos naturales (Wu et al., 2016).

3. Residuos de lavado: Durante el proceso de producción de biodiesel, se generan residuos líquidos de lavado que contienen impurezas. Estos residuos deben ser tratados antes de su disposición final. Se pueden aplicar técnicas de tratamiento fisicoquímico, como la adsorción o la destilación, para eliminar los contaminantes y obtener un efluente que cumpla con los estándares ambientales antes de su liberación (Calero et al., 2016). Los residuos líquidos resultantes del proceso de lavado en la producción de biodiesel de segunda generación pueden contener restos de ácidos grasos y metanol residual. Si estos residuos líquidos no son tratados adecuadamente, pueden tener un impacto negativo en cuerpos de agua cercanos y en los ecosistemas acuáticos. Es esencial implementar tecnologías de tratamiento y cumplir con los estándares ambientales para garantizar una disposición responsable de estos residuos (Calero et al., 2016).

4. Cenizas: Si se utiliza una fuente de aceite vegetal o grasa animal con alto contenido de ácidos grasos saturados para la producción de biodiesel, puede generarse ceniza como un subproducto no deseado. Estas cenizas pueden requerir tratamientos específicos para una disposición adecuada, como la encapsulación o el aprovechamiento en la producción de

fertilizantes (González-García et al., 2019). Las cenizas pueden contener residuos minerales y otros compuestos nocivos. Si se manejan o disponen de manera inadecuada, las cenizas pueden contaminar suelos, aguas subterráneas y el aire, afectando negativamente el medio ambiente y la salud humana. Es importante implementar prácticas adecuadas de manejo y disposición, como la encapsulación o el reciclaje de cenizas, para minimizar el impacto ambiental asociado (González-García et al., 2019).

El **biometano de primera generación** se produce a partir de la digestión anaeróbica de fuentes de biomasa, como residuos agrícolas, estiércol animal y lodos de depuradoras, con el objetivo de obtener un combustible gaseoso renovable. Aunque este proceso es relativamente establecido, también genera diversos subproductos y residuos que requieren de un adecuado manejo y disposición. A continuación, se analizarán algunos de los principales residuos generados:

1. Digestato: El digestato es un subproducto líquido que se obtiene después de la digestión anaeróbica. Este subproducto suele ser rico en nutrientes y se utiliza comúnmente como fertilizante orgánico en la agricultura. Sin embargo, debido a su contenido de nitrógeno y fósforo, es necesario aplicarlo de manera adecuada y controlada para evitar la contaminación del suelo y las fuentes de agua (EBA, 2019). Si no se gestiona adecuadamente, puede ocasionar la contaminación del suelo y el agua. El exceso de nutrientes en el suelo puede causar la eutrofización de los cuerpos de agua, lo que puede resultar en la proliferación de algas y la disminución del nivel de oxígeno en el agua, afectando la vida acuática. Para mitigar este impacto, es importante aplicar el digestato de manera controlada y según las regulaciones ambientales, evitando la sobre aplicación y maximizando la absorción de nutrientes por los cultivos (Dias et al., 2020).

2. Residuos de grasas: Durante el proceso de producción de biometano a partir de grasas animales o residuos grasos, pueden generarse residuos sólidos. Estos residuos pueden ser utilizados como combustible para generar calor o electricidad en las propias instalaciones de biometano. Además, en algunos casos, pueden procesarse adicionalmente para obtener productos de alto valor, como ácidos grasos para su uso en diversas aplicaciones industriales

(Soares et al., 2018). Si bien los residuos de grasas pueden ser utilizados como combustible y pueden tener aplicaciones en la producción de productos químicos y materiales de valor agregado, su producción y manejo incorrecto pueden tener impactos negativos. La producción de residuos de grasas puede implicar el uso de recursos agrícolas y generar competencia con los cultivos alimentarios. Además, la gestión inadecuada de los residuos de grasas puede dar lugar a la contaminación del suelo y el agua si no se toman las precauciones adecuadas (Stoklosa et al., 2017).

3. Cenizas y otros subproductos de la combustión: Si se utiliza biomasa agrícola o forestal en el proceso de producción de biometano, puede generarse ceniza como un subproducto no deseado. Estas cenizas pueden contener nutrientes y minerales que pueden ser retornados al suelo como enmiendas para mejorar la fertilidad. Además, si se utilizan tecnologías de gasificación o pirólisis, se pueden obtener subproductos como el biochar que se pueden aprovechar en la agricultura o como filtro en la purificación de aguas residuales (Bello et al., 2019). Las cenizas y otros subproductos generados durante la combustión pueden contener contaminantes que, si no se manejan adecuadamente, pueden tener un impacto negativo en el medio ambiente y la salud humana. La liberación de cenizas en el suelo o el agua puede contribuir a la contaminación de estos recursos. Por lo tanto, es esencial un manejo y disposición adecuados de las cenizas y otros subproductos, siguiendo las regulaciones ambientales y considerando prácticas de gestión responsables (Bello et al., 2019).

4. Biogás residual: Durante el proceso de producción de biometano, se puede obtener biogás residual con niveles más bajos de metano y con componentes no deseados. Este biogás residual puede ser utilizado para generar energía térmica en plantas de biometano o en aplicaciones de cogeneración para generar electricidad y calor. También puede ser refinado a través de procesos de purificación adicionales para obtener un biometano de alta pureza adecuado para su inyección en la red de gas natural (Pestana et al., 2012). El biogás residual puede contener compuestos como dióxido de carbono, nitrógeno y trazas de contaminantes. Si este biogás no se quema o utiliza adecuadamente, puede contribuir a las emisiones atmosféricas de gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos, como óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles. Por lo tanto, el manejo adecuado del biogás

residual implica implementar tecnologías de purificación o quemado controlado para minimizar el impacto ambiental y cumplir con las regulaciones ambientales correspondientes (Lora et al., 2015).

Es esencial abordar estos efectos negativos y buscar soluciones que permitan minimizar su impacto. La implementación de tecnologías más limpias, prácticas de gestión y disposición adecuadas, así como la investigación continua en tecnologías de tratamiento y aprovechamiento de residuos, contribuirán a una producción de biocombustibles más sostenible y con menores impactos ambientales.

5.1.2 Evaluación de biocombustibles de primera generación

5.1.2.1 Evaluación de la producción

La producción de biocombustible depende de la productividad del cultivo, del rendimiento del biocombustible y del área ocupada por el cultivo. La mayoría de los países industrializados se están esforzando por producir biocombustible a nivel comercial para lograr un impacto económico y medioambiental positivo (Hossain et al., 2020). Un estudio de Hossain et al. demostró que los distintos tipos de cultivos tienen diferente capacidad para crecer y sobrevivir en el mismo tipo de entorno. Alrededor del 2% de la superficie agrícola mundial se destina a cultivos energéticos y cubre el 10% del suministro total de energía (Paschalidou et al., 2016). La Tabla 2 resume el rendimiento de biocombustibles de 1G.

Tabla 2. Rendimiento de biocombustible de las materias primas de primera generación.

Adaptado de: Mat Aron et al., 2020.

| Cultivo | Rendimiento de biocombustible (L/kg) |
|---------|--------------------------------------|
| Cebada | 0.41 |
| Maíz | 0.40 – 0.46 |
| Yuca | 0.15 – 0.20 |
| Avena | 0.41 |
| Arroz | 0.48 |

| | |
|----------------|-------------|
| Sorgo | 0.44 |
| Trigo | 0.40 |
| Caña de azúcar | 0.25 – 0.50 |

El proceso de producción de biocombustibles puede conllevar impactos negativos para el medio ambiente. Para esto, es importante entender el análisis del ciclo de vida (ACV) de la producción de biocombustibles para evaluar los impactos ambientales. El ACV es el análisis metodológico de los efectos ambientales de los productos en particular (aunque también de procesos y servicios). Normalmente, tiene en cuenta el ciclo de vida completo, desde la producción y el uso hasta la eliminación, así como los procesos *upstream* (exploración, descubrimiento y producción) y *downstream* (preparación y uso del producto) asociados; por ejemplo, la extracción de materias primas o la fabricación de productos intermedios. Así pues, el ACV es un proceso para analizar y evaluar los productos o procesos en términos de su impacto ambiental. El análisis de ciclo de vida de los combustibles debe tener en cuenta los procesos de extracción de materiales y procesamiento de materias primas, por una parte, y la contaminación ambiental producida por la combustión, por otra.

La acidificación del suelo es una de las principales amenazas medioambientales derivadas de las actividades agrícolas debido al uso de fertilizantes. La acidificación del suelo es un proceso en el que el pH del suelo disminuye con el tiempo. Este proceso se ve acelerado por la producción agrícola y puede afectar tanto a la superficie del suelo como al subsuelo; los suelos excesivamente ácidos pueden provocar un descenso drástico de la producción de cultivos y pastos, ya que el pH del suelo modifica la disponibilidad de los nutrientes del suelo (Gobierno de Queensland, 2013). El cultivo de la papa tiene la mayor influencia en la acidificación del suelo ($31.5 \text{ kgSO}_2 \text{ eq.ha}^{-1}$) seguida de la colza, el sauce, el pasto miscanthus y el trigo, con $24.5 \text{ kgSO}_2 \text{ eq.ha}^{-1}$, $14.9 \text{ kgSO}_2 \text{ eq.ha}^{-1}$, $13.0 \text{ kgSO}_2 \text{ eq.ha}^{-1}$, y $11.0 \text{ kgSO}_2 \text{ eq.ha}^{-1}$, respectivamente (Borzecka-Walker et al., 2011). Esto se debe a que las papas tienen una baja capacidad de cationes básicos, lo que conduce a la lixiviación de estos iones en el suelo (Borzecka-Walker et al., 2011).

Aparte de éste, la eutrofización es también uno de los principales problemas derivados de las actividades agrícolas, se produce cuando el medio ambiente se enriquece con nutrientes, lo que aumenta la cantidad de plantas y algas que crecen en los estuarios y las aguas costeras. El exceso de nutrientes provoca la proliferación de algas y aguas poco oxigenadas (hipóxicas) que pueden causar la muerte de peces y hierbas marinas y reducir los hábitats esenciales de los peces (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA). Un estudio de Borzecka-Walker et al. muestra que el cultivo de pasto miscanthus tiene el mayor impacto en la eutrofización en comparación con la patata, el sauce, la colza y el trigo.

5.1.2.2 Evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero

Se dice que la materia prima de primera generación es una fuente prometedora de biocombustibles que puede minimizar el uso de combustibles fósiles, lo que indirectamente reduce la cantidad de gases de efecto invernadero en la atmósfera. La sostenibilidad es un aspecto indispensable para considerar en el desarrollo de la energía del futuro.

El uso de las materias primas de primera generación para la producción de biocombustibles es un buen incentivo para cumplir con el objetivo global de reducción de las emisiones de GEI, teniendo en cuenta el hecho de que la quema de biocombustibles emite menos CO₂ que los combustibles fósiles y que el cultivo de las materias primas absorbe CO₂ de la atmósfera (Viesturs & Melece, 2014). En la Tabla 3 se muestra una comparación de las emisiones de CO₂ generadas a partir de las materias primas empleadas en biocombustibles de primera generación. Las emisiones de CO₂ se ven influenciadas por la eficiencia de la conversión del biocombustible y el rendimiento de los cultivos; importante considerar que diferentes hipótesis y análisis de las emisiones de carbono conducen a diferentes valores de salida (Mat Aron et al., 2020).

La reducción de las emisiones de GEI en el caso del etanol generado a partir de caña de azúcar fue del 59% al 82% en comparación con la base de emisiones de gasolina convencional (Cai et al., 2013). Sin embargo, al estudiar el ACV del etanol de caña de azúcar, se encontró una tremenda liberación de emisiones de GEI durante el cultivo y el

procesamiento del etanol debido al uso de fertilizantes y recursos de la tierra (Garlapati et al., 2019).

Esto se debe a los fertilizantes a base de nitrógeno que dan lugar a la emisión de N₂O. El coproducto del procesamiento de la caña de azúcar también provoca emisiones de N₂O (Carmo et al., 2013). Las emisiones de N₂O procedentes de la producción de biocombustible de colza y trigo no solucionan los problemas medioambientales de las emisiones de GEI (Mat Aron et al., 2020). El ACV de los biocombustibles de soja ha demostrado tener menores emisiones de GEI en comparación con el biocombustible de aceite de colza y girasol (Sanz Requena et al., 2011). Bajo las mismas condiciones de cultivo y métodos de procesamiento, es probable que la producción de diesel de girasol reduzca entre un 45% y un 65% las emisiones de GEI en comparación con el diesel de petróleo (Garlapati et al., 2019).

Tabla 3. Emisiones de dióxido de carbono de las materias primas de primera generación.

Adaptado de: Mat Aron et al., 2020.

| Materia prima | Emisión neta de carbono (g CO ₂ eq/ MJ) | Emisión de carbono del combustible para aviones (g CO ₂ eq/ MJ) | Reducción de GEI en comparación con la gasolina / diesel (%) |
|------------------------------|--|--|--|
| Maíz | 43 – 78 | - | 20 – 50 |
| Caña de azúcar | 16 – 45 | - | 59 – 82 |
| Trigo | 45 – 68 | - | 45 – 75 |
| Remolacha azucarera | 37 | - | |
| Colza | - | 50 | 20 – 85 |
| Etanol celulósico | | | 63 – 118 |
| Semillas de girasol | - | 42 | 35 – 110 |
| Palma aceitera 16% turba | - | 42 – 61 | 31 |
| Palma aceitera 100% turba | - | 80 – 100 | 31 |
| Palma aceitera suelo mineral | - | 35 – 50 | 31 |
| Soja o soya | - | - | 45 – 110 |

5.1.2.3 Evaluación de la eficiencia energética

El Instituto de Estudios Medioambientales y Energéticos (EESI por sus siglas en inglés) define la eficiencia energética como la energía mínima necesaria para realizar o suministrar los mismos servicios limitando la merma de energía.

El incentivo adoptado por los gobiernos para reducir las emisiones de GEI consiste en subsidiar los biocombustibles y la bioenergía. Por ejemplo, los gobiernos de la Unión Europea (UE) y de Estados Unidos concedieron en 2008 subvenciones por valor de más de 3,000 y 11,000 millones de dólares, respectivamente. Hacer que el biocombustible sea accesible y promover el uso de energía verde es insuficiente para alcanzar los objetivos de reducción de GEI (Jung et al., 2014, Mat Aron et al., 2020). Un estudio de Grafton et al., 2014, muestra que el subsidio al biocombustible impulsa a las compañías petroleras y de gas a extraer más combustibles fósiles para reducir el precio del combustible fósil y hacerlo más asequible en comparación con el biocombustible. Viesturs y Melece (2014) afirmaron que es necesario realizar esfuerzos para aumentar la eficiencia energética y la conversión de los biocombustibles de primera generación para cumplir el objetivo global de reducción de GEI. Asimismo, los tipos de materias primas utilizadas desempeñan un papel importante en el balance energético. Los tres principales medios de consumo energético son la energía utilizada para el cultivo, el transporte y la conversión del bioetanol.

Los requisitos energéticos de la producción de etanol de primera generación están en el rango de 0.9 a 1.7 MJ *in/* MJ etanol (O'Connell et al., 2019). En el caso del aceite vegetal tratado con hidrógeno, los requisitos energéticos oscilan entre 0.6 y 2.5 MJ *in/*MJ de combustible *out* (O'Connell et al., 2019). La producción de 1 L de etanol de maíz requiere aproximadamente 15 MJ de entrada de energía, por lo que el 36% de la entrada de energía se utiliza para la molienda de maíz y el 63% se utiliza para la destilación y deshidratación (Cheroennet & Suwanmanee, 2017). Asimismo, se informó que la soja tiene una alta ganancia neta de energía de hasta el 93% (Garlapati et al., 2019). La ganancia neta de energía de los biocombustibles depende de la viabilidad del sistema de producción. Por ejemplo, la ganancia neta de energía del biocombustible de colza es tres veces menor que la del

biocombustible de remolacha azucarera (Börjesson & Tufvesson, 2011). Esto se debe principalmente a la generación de coproductos a partir del biocombustible de colza, lo que provoca una pérdida de energía.

Tabla 4. Eficiencia energética de las materias primas de primera generación.

Adaptado de: Garlapati et al., 2019, O'Connell et al., 2019, Cai et al., 2013, Mat Aron et al., 2020, Edwards et al., 2019

| Materia prima | Eficiencia energética (%) |
|-----------------|---------------------------|
| Maíz | 26 – 68 |
| Trigo | 16 – 85 |
| Caña de azúcar | 78 – 100 |
| Colza | 43 – 80 |
| Soja o soya | 27 – 100 |
| Girasol | 10 – 79 |
| Aceite de palma | 67 – 139 |

La eficiencia energética de las materias primas depende en gran medida de la procedencia de su producción (p. ej., país, tipo de suelo) y del proceso de conversión del biocombustible (Garlapati et al., 2019). La información detallada sobre la eficiencia energética está restringida a información limitada para cada etapa de la producción y conversión del biocombustible.

5.1.3 Viabilidad y criterio de selección

La viabilidad económica de los biocombustibles de primera generación se puede definir como la capacidad de estos combustibles para producirse y venderse con beneficios en el mercado. El costo de producción de los biocombustibles, el precio al que pueden venderse y su demanda son los principales factores que determinan su viabilidad económica.

Los criterios de selección de los biocombustibles de primera generación se basan en varios factores, entre ellos:

1. Disponibilidad de materias primas: La disponibilidad de materias primas, como cultivos, residuos y materiales orgánicos, es un factor crítico en la selección de biocombustibles. La materia prima debe poder obtenerse fácilmente y en cantidades suficientes para soportar una producción a gran escala. De acuerdo con el USDA, en Estados Unidos en 2020, el maíz fue la principal materia prima utilizada para producir etanol, representando aproximadamente el 90% de toda la producción de etanol; esto es discutiblemente una desventaja, ya que estas materias primas comestibles compiten con los cultivos alimentarios, ya que requieren una cierta cantidad de superficie, fertilizantes y suministro de agua.

2. Costo de producción: El costo de producción de los biocombustibles es un factor importante para determinar su viabilidad. El costo de la materia prima, el transporte, el procesamiento y otros costos de producción deben ser lo suficientemente bajos como para permitir una producción y venta rentables. El costo de producción de los biocombustibles de primera generación se estima actualmente entre 1.00 y 1.50 dólares por galón, según el Departamento de Energía de EE.UU., en comparación con el costo de la gasolina, que es de aproximadamente 2.00 dólares por galón.

3. Rendimiento energético: La producción energética de los biocombustibles es otro factor crítico para determinar su viabilidad. Los biocombustibles deben ser capaces de producir suficiente energía para ser competitivos con los combustibles fósiles tradicionales. Los biocombustibles de primera generación suelen tener un rendimiento energético de aproximadamente 80,000 BTU por galón, según el Departamento de Energía de EE.UU., en comparación con la gasolina tradicional, que tiene un rendimiento energético de aproximadamente 115,000 BTU por galón.

4. Emisiones y sostenibilidad: La sostenibilidad y el impacto medioambiental de los biocombustibles son factores cada vez más importantes a la hora de seleccionarlos. Los biocombustibles deben producir menos emisiones que los combustibles fósiles tradicionales y producirse de forma sostenible y responsable con el medio ambiente. Según con la Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos, los biocombustibles de primera

generación emiten entre un 20 y un 50% menos de gases de efecto invernadero que la gasolina tradicional.

5. Demanda del mercado: La demanda de biocombustibles en el mercado es un factor crítico para su viabilidad económica. La demanda debe ser lo suficientemente alta como para que su producción y venta sean rentables. La demanda de biocombustibles de primera generación se estima actualmente en 15,000 millones de galones al año, según el Departamento de Energía estadounidense, frente a la demanda de gasolina, que se estima en 140,000 millones de galones al año.

La viabilidad económica de esta generación de biocombustible (como cualquier combustible) está sujeta a varios factores cambiantes como la variación del costo de producción (que en gran medida depende del costo de la materia prima, del procesamiento y de la demanda del mercado). El costo de la materia prima puede verse influido por las condiciones meteorológicas, plagas y otros factores que afectan al rendimiento de los cultivos. El costo de procesamiento también puede verse influido por la tecnología utilizada y la escala de producción. Así como de la demanda de biocombustibles en el mercado, impulsada por una combinación de mandatos gubernamentales y preferencias de los consumidores por los combustibles renovables. Adicionalmente, la demanda también puede verse afectada por la disponibilidad de combustibles alternativos de bajo costo, como el gas natural y los vehículos eléctricos, así como por cambios en las políticas y normativas gubernamentales.

A pesar de las dificultades, los biocombustibles tienen potencial para ser económicamente viables, sobre todo si pueden producirse a gran escala.

5.2 Segunda generación

5.2.1 Insumos, tecnología, biocombustibles y residuos obtenidos

Avances en la investigación y el desarrollo han hecho que los biocombustibles de segunda generación estén disponibles para su producción a escala comercial. Los biocombustibles de segunda generación es el término designado a aquellos biocombustibles que incluyen al bioetanol, syngas y al biodiesel que se producen a partir de materiales no comestibles como materia prima. Últimamente, estos biocombustibles no competirán, o lo harán en menor medida, con los cultivos comestibles, y los residuos de las cosechas y otras especies de plantas no cosechadas se cultivarán exclusivamente para la producción de bioenergía (aunque mucho dependerá de la compatibilidad de la biomasa y de la disponibilidad de cepas de enzimas y levaduras comestibles) (Naik et al., 2010).

En el contexto de la producción de biocombustibles, el término "biomasa vegetal" se refiere en gran medida al material lignocelulósico, ya que éste constituye la mayor parte de los materiales no alimentarios baratos y abundantes disponibles procedentes de las plantas. La biomasa vegetal representa uno de los recursos biológicos más abundantes e infrautilizados del planeta y se considera una fuente prometedora de material para combustibles y materias primas. En su forma más básica, la biomasa vegetal puede simplemente quemarse para producir calor y electricidad. Sin embargo, existe un gran potencial en el uso de la biomasa vegetal para producir biocombustibles líquidos. La biomasa vegetal está compuesta en su mayor parte por las paredes celulares de las plantas, de las que normalmente el 75% está compuesto por polisacáridos (Naik et al., 2010). Estos polisacáridos representan una valiosa reserva de azúcares potenciales, e incluso en los cultivos alimentarios tradicionales, como el trigo, hay tanta azúcar acumulada en los tallos como la que se encuentra en el almidón de los granos. A la fecha, el potencial para proporcionar materias primas azucaradas para la producción de biocombustibles de muchos residuos de cultivos, como la paja y las virutas de madera, no se ha aprovechado plenamente. Sin embargo, la producción de biocombustibles a partir de subproductos agrícolas sólo podría satisfacer una parte de la creciente demanda

de combustibles líquidos, esto ha generado un gran interés en el uso de cultivos de biomasa específicos como materia prima para la producción de biocombustibles (Naik et al., 2010).

El bioetanol (avanzado o de segunda generación) es un sustituto parcial de la gasolina y un sustituto total de ésta en los llamados vehículos flex-fuel (FFV), a través de la hidrólisis se extraen los azúcares de la materia prima lignocelulósica, tras lo cual los azúcares se fermentan en etanol. La mezcla de etanol y gasolina, también conocida como gasohol o biogasolina, se utiliza ampliamente en muchos países como una alternativa más sostenible y menos contaminante a los combustibles fósiles. La proporción de mezcla varía según la normativa de cada país, siendo común encontrar mezclas como E10 (10% de etanol) y E85 (85% de etanol) (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, 2011).

El diesel Fischer-Tropsch (FT-diesel), GTL (*Gas-to-Liquids*) ó BTL (*Biomass-to-Liquids*) es un sustituto completo o parcial del diesel. El biodiesel puro, conocido como B100, puede ser utilizado en motores diésel sin modificaciones, pero también se mezcla con diesel en diferentes proporciones según la legislación de cada país. Algunas mezclas comunes incluyen B5 (5% de biodiesel) y B20 (20% de biodiesel) (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, 2011).

La biomasa lignocelulósica también se puede gasificar para producir syngas que, a su vez, se transforma en hidrocarburos líquidos (principalmente diesel y queroseno) y metano. El syngas, o también conocido como Bio-SNG o gas natural sintético, es un combustible que puede utilizarse en vehículos de gasolina con ligeras adaptaciones. Por último, el Bio-DME (éter dimetílico) es un combustible que puede utilizarse en vehículos diesel con ligeras adaptaciones.

Los insumos de los biocombustibles de segunda generación se agrupan en dos grupos: biomasa lignocelulósica y biomasa de cultivos celulósicos (divididos a su vez en hierbas perennes y residuos de cultivos y cultivos de corta rotación).

Biomasa Lignocelulósica

Los recursos naturales abundantes y renovables son esenciales para el funcionamiento de las sociedades industriales y vitales para el desarrollo de una economía global sostenible, este es el caso de la biomasa lignocelulósica y su uso para la producción de etanol para las industrias del transporte en todo el mundo. La madera y los subproductos de la madera derivados de los residuos de la industria de la madera y la silvicultura (álamos híbridos, aserrín, astillas de madera, pellets de madera, etc.) pueden someterse a hidrólisis y el azúcar resultante puede procesarse mediante fermentación para producir bioetanol. La madera contiene alrededor de 30 a 45 % de celulosa, 25 % de hemicelulosa y 20 a 30 % de lignina, y el resto contiene proteína y pectina. La utilización eficiente de estos tres componentes, celulosa, hemicelulosa y lignina desempeña un papel importante en la producción económicamente viable de bioetanol. A nivel mundial, se están realizando numerosos esfuerzos para aumentar la producción de bioetanol a partir de materiales lignocelulósicos de restos vegetales (Hirani et al., 2018).

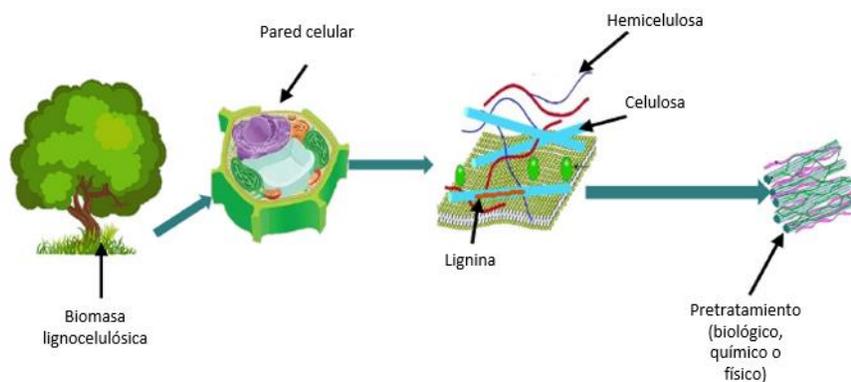


Figura 16. Material lignocelulósico. Adaptado de: Khan et al., 2021.

Biomasa de cultivos celulósicos

Hierbas perennes

El pasto varilla es una especie de hierba perenne C4 (*Panicum virgatum L.*) nativa de las praderas de Norteamérica. Requiere pocos cuidados en comparación con otros cultivos

anuales (vegetal que germina, florece y sucumbe en el curso de un año) para una alta producción de biomasa con características agronómicas sostenibles y es conocida por su eficiente secuestro de carbono en el suelo y sus beneficios energéticos netos relativamente altos, lo que la hace muy adecuada como cultivo bioenergético para la conservación del suelo de las tierras de cultivo. Dien et al. (2013) estudió especies de pasto varilla de tierras altas y bajas para la conversión de biomasa en bioetanol y sugirió una producción eficiente de bioetanol de 80-150 gramos por kilogramo de biomasa seca de este pasto.

Por su parte, el pasto *Miscanthus* es un híbrido de hierba estéril perenne y se propaga a través de rizomas (tallo subterráneo con varias yemas que crecen de forma horizontal emitiendo raíces y brotes herbáceos de sus nudos). Puede utilizarse como materia prima para producir 2.5 veces más etanol que el maíz, en la misma superficie. Crece en tierras marginales y no compete con los cultivos comerciales y es de naturaleza perenne; también protege la erosión del suelo y fija más carbono atmosférico en el suelo en comparación con los cultivos comerciales anuales (Naik et al., 2010). Diversas especies de *Miscanthus* tienen un alto potencial de rendimiento con un contenido apreciable de carbohidratos y lignina para ser utilizados en la futura producción de biocombustibles (Jørgensen, 2011; Brosse et al., 2012).

Residuos de cultivos y cultivos de corta rotación

Los residuos de cultivos, por ejemplo, el rastrojo de maíz, la paja de trigo, la paja de arroz y el bagazo de caña de azúcar, son los subproductos más abundantes de la producción de cultivos utilizados como biomasa en todo el mundo. La utilización de estos residuos de cultivos para la producción de bioetanol puede suponer un gran beneficio energético neto junto con la reducción de gases de efecto invernadero. Otro recurso típico para estos combustibles son los cultivos forestales de corta rotación, como el álamo, el sauce y el eucalipto.

El bioetanol producido a partir de estos residuos de cultivos y cultivos de corta duración tendrá un mayor beneficio energético neto en comparación con el bioetanol basado en

cereales (Hirani et al., 2018), además de contar con mayor disponibilidad, cuenta con materias primas más baratas que los biocombustibles de primera generación.

Procesos de conversión de los biocombustibles de segunda generación.

Existen dos vías principales para producir biocombustibles líquidos a partir de biomasa; una implica el procesamiento termoquímico y la otra el procesamiento bioquímico. El procesamiento termoquímico define la conversión de la biomasa en una serie de productos, mediante la descomposición térmica y la reformación química, y consiste esencialmente en calentar la biomasa en presencia de diferentes concentraciones de oxígeno. La clara ventaja del procesamiento termoquímico es que puede convertir esencialmente todos los componentes orgánicos de la biomasa en comparación con el procesamiento bioquímico que se centra principalmente en los polisacáridos (Naik et al., 2010).

En este capítulo los procesos de conversión de los biocombustibles de segunda generación se clasificarán en: conversión física, conversión termoquímica, hidrotratamiento de aceites vegetales/diesel verde, *bio-oil*, FT oil o combustible verde, bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica y conversión química.

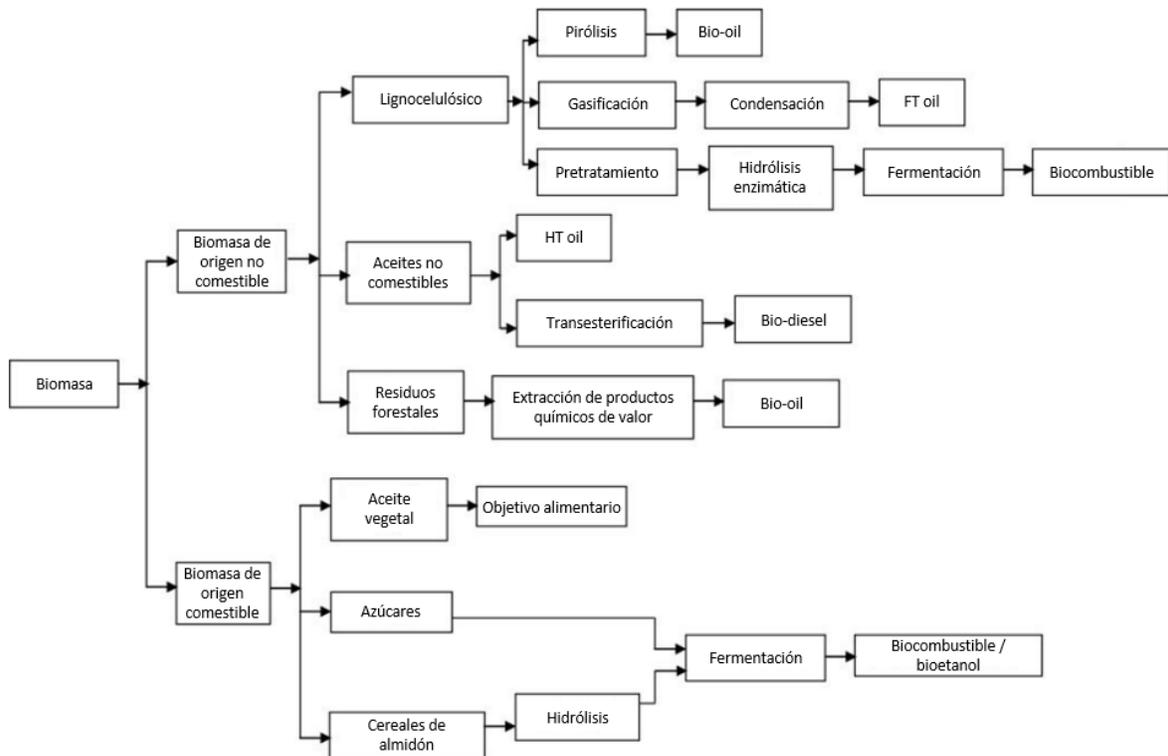


Figura 17. Producción de biocombustibles de segunda generación a partir de biomasa.

Adaptado de: Naik et al., 2010.

Conversión Física

A. Extracción mecánica

Los aceites vegetales crudos se recuperan de las semillas oleaginosas aplicando una presión mecánica mediante una prensa de tornillo. La prensa de tornillo puede aplicarse de dos maneras: prepresado y prensado completo. En el prepresado, sólo se recupera una parte del aceite y la harina parcialmente desaceitada (torta con un 18-20% de aceite) y se trata posteriormente mediante la extracción con disolventes. El prensado previo y la extracción con disolventes se aplican habitualmente a las semillas oleaginosas con un alto contenido de aceite (30-40%). El prensado completo requiere 95.000 kPa para exprimir la mayor cantidad de aceite posible, preferiblemente hasta un 3-5% de grasa residual en el caso de los materiales animales. El prensado completo también puede llevarse a cabo en una prepresa y una prensa final.

B. Briquetado de biomasa

Los residuos agrícolas y forestales, así como otros materiales de desecho de la biomasa, suelen ser difíciles de utilizar como biocombustibles debido a sus características voluminosas y problemáticas. Este inconveniente puede superarse mediante la densificación de los residuos en formas regulares compactas. Durante la densificación, la biomasa se encierra en cámaras de compresión. Hay dos métodos principales de densificación, el prensado y la maceración. Algunas veces estos dos procesos se combinan, en el prensado hay una estrecha correlación de un aumento de la densidad con un aumento de la presión aplicada en la etapa inicial de la compresión, pero la tasa de aumento de la densidad cae rápidamente cuando la densidad del material prensado se acerca a la densidad del agua. No existe una correlación tan estrecha entre el cambio de densidad y el grado de maceración, el cual puede ser picado, molido y pulverizado. El picado grueso de algunos materiales puede ser tan eficaz como la molienda ultrafina. Por ejemplo, las ramas de los árboles sufren una gran reducción de volumen cuando se astillan, pero la molienda fina proporcionaría poca, o ninguna, reducción adicional de volumen.

C. Destilación

La destilación es el método más importante para extraer el aceite esencial y se basa en la evaporación de los componentes más volátiles de una mezcla para separarlos de las partes no volátiles. Las plantas se trituran para que liberen sus aceites. Las plantas se destilan con vapor, y los aceites esenciales se vaporizan y suben con el vapor. Los vapores se capturan y se dejan condensar de nuevo en líquidos. Un proceso químico más avanzado es la destilación molecular. Se utiliza para producir fragancias que no se pueden destilar por métodos convencionales.

Conversión termoquímica

La biomasa se puede convertir en energía principalmente a través de dos procesos: termoquímicos o biológicos. El proceso de conversión termoquímica incluye la combustión directa, la gasificación, la licuefacción y la pirólisis, como se muestra en la Fig. 18. Cuando la biomasa se calienta en condiciones deficientes de oxígeno, genera gas de síntesis, o syngas,

que consiste principalmente en hidrógeno y monóxido de carbono. Este gas de síntesis puede quemarse directamente o procesarse posteriormente para obtener otros productos gaseosos o líquidos.

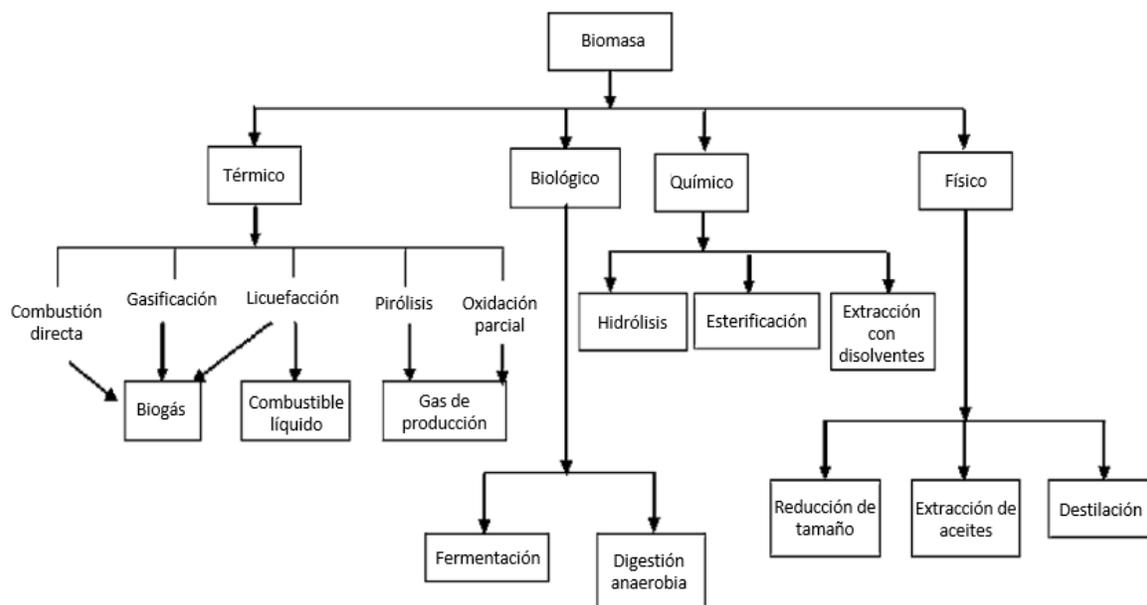


Figura 18. Procesos de conversión de biomasa. Adaptado de: Naik et al., 2010.

D. Combustión directa

La combustión es la reacción química entre un combustible y el oxígeno que suele tener lugar en el aire y que se conoce comúnmente como quemado. Los productos de la reacción son dióxido de carbono y agua con la liberación de calor. Cuando la combustión directa de la biomasa se lleva a cabo en una zona bien ventilada, la quema de biomasa utilizada para las estufas y calderas domésticas puede ser un sustituto sólido de la combustión del combustible fósil convencional. Las emisiones de azufre (0.05-0.2 wt%) son mucho menores y la formación de partículas puede controlarse desde el origen.

E. Gasificación

En general, la gasificación no es una tecnología nueva, pero su uso para convertir la biomasa en un combustible viable sólo se ha investigado en los últimos cuarenta años (Naik et al., 2010). El gas de síntesis puede producirse a partir de la biomasa por dos vías, de forma catalítica o no catalítica. El proceso no catalítico requiere una temperatura de funcionamiento

muy alta, de hasta 1,300 °C, mientras que el proceso catalítico puede funcionar a una temperatura sustancialmente inferior. Con más avances en la catálisis, se espera que el requisito de temperatura baje aún más del valor actual de 900 °C. La etapa de gasificación implica la reacción de la biomasa con aire, oxígeno o vapor para producir una mezcla gaseosa de CO, CO₂, H₂, CH₄ y N₂, conocida como gas de producción o gas de síntesis o syngas, dependiendo de las proporciones relativas de los gases componentes. El gas de producción es útil principalmente como combustible para la generación de energía estacionaria, mientras que el gas de síntesis puede utilizarse, y se utiliza actualmente, para fabricar una serie de combustibles y productos químicos intermedios. En el caso de los combustibles para el transporte, las principales rutas derivadas del gas de síntesis son el hidrógeno mediante la reacción de cambio de gas a agua (WGS water-gas-shift), los hidrocarburos mediante la síntesis de Fischer-Tropsch (F-T) o la síntesis de metanol seguida de otra reacción para producir hidrocarburos o combustibles líquidos oxigenados. La reacción WGS utiliza CO, H₂O para dar H₂ y CO₂ y puede utilizarse para convertir el gas de producción en gas de síntesis enriqueciendo el contenido de H₂ o para producir H₂ como producto final por sí mismo. La síntesis F-T por su lado, se ha utilizado desde la década de 1930 para producir combustibles de hidrocarburos a partir del syngas. La producción de metanol a partir del gas de síntesis se practica desde la década de 1920.

F. Licuefacción

La licuefacción de la biomasa se ha investigado en presencia de soluciones alcalinas, glicerina, propanol, butanol o licuefacción directa y ésta suele producir aceites insolubles en agua de alta viscosidad y suele requerir la presencia de disolventes, gases reductores como el CO o el H₂ y/o catalizadores además de la biomasa. En el campo de la conversión termoquímica de la biomasa, los materiales lignocelulósicos pueden convertirse directamente en un líquido similar a los combustibles pesados al hacerlos reaccionar con gas de síntesis en presencia de un catalizador adecuado. La licuefacción acuosa de materiales lignocelulósicos implica la desagregación de la ultraestructura de la madera, seguida de la despolimerización parcial de los compuestos constitutivos. En la licuefacción alcalina, la desoxigenación se produce a través de la descarboxilación del éster formado por el grupo hidroxilo y el ion formiato derivado del carbonato. Las sales alcalinas, como el carbonato de sodio y el

carbonato de potasio, pueden actuar como catalizadores para la hidrólisis de macromoléculas como la celulosa y la hemicelulosa en fragmentos más pequeños. El aceite pesado que se obtiene del proceso de licuefacción es un bulto viscoso y alquitranado, que a veces causa problemas de manipulación. Por esta razón, es necesario añadir algunos disolventes orgánicos (por ejemplo, propanol, butanol, acetona, metil etil cetona, acetato de etilo) al sistema de reacción. Todos estos disolventes, excepto el acetato de etilo, pueden reproducirse de la madera durante el proceso de licuefacción. Esto sugiere que el disolvente puede recuperarse durante el proceso para su reutilización. El rendimiento de aceite es mayor con la licuefacción acuosa catalítica que con la licuefacción acuosa no catalítica. El rendimiento medio del aceite es de alrededor del 31% en el proceso no catalítico y del 63% en el proceso catalítico (Naik et al., 2010). En el proceso de licuefacción, la cantidad de residuos sólidos aumenta en proporción al contenido de lignina. La lignina es una macromolécula, que consiste en alquilfenoles y tiene una estructura tridimensional compleja. En general, se acepta que los radicales fenoxi libres se forman por descomposición térmica de la lignina por encima de 525 K (252 °C) y que éstos tienen una tendencia aleatoria de formar residuos sólidos mediante condensación y polimerización.

El *bio-oil* (o bioaceite) obtenido a partir de madera secada al aire por licuefacción a alta presión (HPL) da lugar a una mezcla compleja de ácidos orgánicos volátiles, alcoholes, aldehídos, éteres, ésteres, cetonas y componentes no volátiles. Estos aceites podrían mejorarse catalíticamente para obtener un producto orgánico destilado rico en hidrocarburos y sustancias químicas útiles. En comparación con el *bio-oil* obtenido por el método de pirólisis rápida, el rendimiento a partir del proceso HPL es mucho menor y su consistencia altamente viscosa (Naik et al., 2010).

G. Pirólisis

La pirólisis es la degradación térmica de la biomasa por el calor en ausencia de oxígeno, que da lugar a la producción de carbón (sólido), *bio-oil* (líquido) y productos gaseosos combustibles. La pirólisis de la biomasa se ha estudiado con los objetivos finales de recuperar un biocombustible con poder calorífico medio-bajo. Dependiendo de las condiciones de

funcionamiento, el proceso de pirólisis puede dividirse en tres subclases: (a) Pirólisis convencional, (b) Pirólisis rápida, y (c) Pirólisis flash.

(a) Pirólisis convencional

La pirólisis convencional se produce con una velocidad de calentamiento lenta (0.1 - 1 K/s) y un tiempo de permanencia de 45 a 550 s y con trozos masivos de madera. La primera etapa de la descomposición de la biomasa, que se produce entre 550 y 950 K (277 – 677 °C) (Naik et al., 2010), se denomina prepirólisis, durante esta etapa tienen lugar algunos reordenamientos internos como la eliminación de agua, la ruptura de enlaces, la aparición de radicales libres y la formación de grupos carbonilo, carboxilo e hidroperóxido. La segunda etapa de descomposición de los sólidos corresponde al proceso principal de pirólisis, donde procede con una tasa de reacción alta y conduce a la formación de productos de pirólisis. Durante la tercera etapa, el carbón se descompone a un ritmo muy lento y forma residuos sólidos ricos en carbono.

(b) Pirólisis rápida

La pirólisis rápida se recomienda para la producción de productos líquidos y/o gaseosos. En el proceso de pirólisis rápida, la biomasa se descompone para generar vapores, aerosoles y algo de carbón vegetal. Tras el enfriamiento y la condensación de los vapores y el aerosol, se forma un líquido móvil de color marrón oscuro que tiene un valor calorífico equivalente a la mitad del combustible convencional. La pirólisis rápida produce un 60-75% de *bio-oil*, un 15-25% de carbón vegetal sólido y un 10-20% de gases no condensados, dependiendo de las materias primas (Naik et al., 2010).

(c) Pirólisis flash

Difiere mucho de la pirólisis convencional, que se realiza lentamente con trozos masivos de madera. Se produce en el rango de temperaturas de 1050-1300 K (777 – 1027 °C)), con una velocidad de calentamiento rápida (>1000 K/s), un tiempo de residencia corto (<0.5 s) y partículas muy finas (<0.2 mm) (Naik et al., 2010). La producción de *bio-oil* a partir de la pirólisis de la biomasa suele realizarse mediante pirólisis flash y el aceite producido puede mezclarse con el carbón para producir lodo biológico (*bioslurry*). Este lodo biológico puede

introducirse más fácilmente en el gasificador bajo condiciones de: 26 bares; 927-1227 K (654 – 954 °C) para una conversión eficiente en syngas. La conversión de biomasa en crudo puede tener una eficiencia de hasta el 70% en el proceso de pirólisis flash. El llamado *bio-fuel* (o biocrudo) puede utilizarse en motores y turbinas, también se está estudiando su uso como materia prima para refinerías.

Hidrotratamiento de aceites vegetales/diesel verde

Los aceites vegetales son materias primas renovables que se utilizan actualmente para la producción de biocombustibles a partir de recursos de biomasa sostenibles. La tecnología existente para producir diesel a partir de aceites vegetales como la colza, la soja, la canola y el aceite de palma como ya se ha mencionado, se centra en gran medida en la transesterificación de aceites con metanol para producir ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) o biodiesel. La utilización generalizada de los biocombustibles en el futuro depende en gran medida del desarrollo de nuevas tecnologías de proceso que permitan producir combustibles de transporte de alta calidad a partir de materias primas de origen biológico. Estos nuevos biocombustibles deben ser compatibles con las infraestructuras de combustible y transporte existentes para que sean económicamente viables. Investigadores de todo el mundo están buscando diferentes rutas de procesamiento para convertir los aceites vegetales en un combustible diesel de alta calidad o en una mezcla de diesel que sea totalmente compatible con el combustible diesel derivado del petróleo. El diesel rico en isoparafinas conocido como "diesel verde" se produce a partir de materias primas renovables que contienen triglicéridos y ácidos grasos mediante un proceso de saturación catalítica, hidredesoxigenación, descarboxilación e hidroisomerización (Naik et al., 2010). Esta tecnología puede utilizarse ampliamente para cualquier tipo de materia prima petrolera para producir un sustituto del diesel rico en isoparafinas. Este producto, denominado diesel verde, es un combustible diesel aromático y sin azufre que tiene un valor de mezcla de cetano muy alto. Las propiedades de flujo en frío del combustible pueden ajustarse en el proceso para cumplir las especificaciones de punto de turbidez específicas del clima, tanto en el combustible puro como en el mezclado. La Tabla 5 compara las propiedades del diesel verde con el diesel de petróleo y el biodiesel. El diesel verde tiene un mayor valor de cetano y

buenas propiedades de flujo en frío, así como una excelente estabilidad de almacenamiento y es completamente compatible con la mezcla estándar de combustibles diesel derivados del petróleo. A diferencia de los ésteres metílicos de ácidos grasos, las propiedades del diesel verde no dependen del origen de la alimentación ni de la configuración del proceso, y el biocombustible totalmente desoxigenado se mezcla fácilmente con el combustible diesel.

Tabla 5. Propiedades de combustibles. Adaptado de: Naik et al., 2010.

| | ULSD <i>(ultra low sulphur diesel)</i> | Biodiesel (FAME) | Diesel verde |
|------------------------------|--|-------------------------|---------------------|
| % oxígeno | 0 | 11 | 0 |
| Gravedad específica | 0.84 | 0.88 | 0.78 |
| Azufre (ppm) | <10 | <1 | <1 |
| Poder calorífico (MJ/kg) | 43 | 38 | 44 |
| Punto de enturbiamiento (°C) | -5 | -5 a 15 | -10 a 20 |
| Destilación (°C) | 200-350 | 340-355 | 365-320 |
| Cetano | 40 | 50-65 | 70-90 |
| Estabilidad | Buena | Marginal | Buena |

Bio-oil

El *bio-oil*, bioaceite, biopetróleo o aceite de pirólisis se produce mediante un proceso de pirólisis rápida. En este proceso, los compuestos orgánicos, como la celulosa, la hemicelulosa y la lignina, se descomponen térmicamente a una temperatura moderada (400-600 °C) en ausencia de oxígeno para producir un producto líquido, compuesto por *bio-oil* (60-70%), carbón vegetal (13-25%) y gases como CO, H₂ e hidrocarburos ligeros (13-25%). El rendimiento y la composición química del *bio-oil* dependen de las materias primas y de las condiciones del proceso: tamaño de las partículas de biomasa (2-5 mm), tiempo de residencia (0.1- 2 s) y tipo de reactor (Naik et al., 2010). En general, los tipos de reactores que se utilizan actualmente son: reactor de lecho fluidizado, lecho fluidizado circulante o lecho fluidizado rápido (Fig. 19).

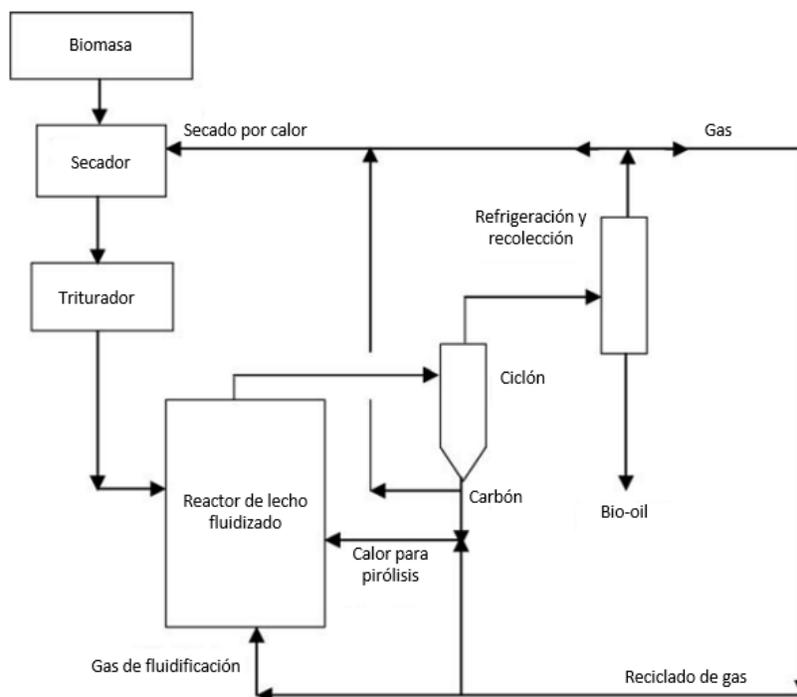
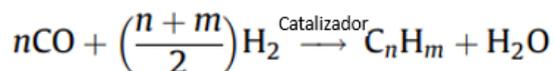


Figura 19. Proceso de pirólisis rápida en lecho fluido. Adaptado de: Naik et al., 2010.

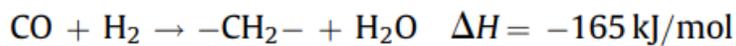
El *bio-oil* es un producto viscoso de color marrón oscuro, corrosivo y ácido con un olor ahumado característico que se utiliza como combustible para calderas, turbinas de gas, motores diesel, hornos y motores estacionarios. El *bio-oil* tiene una composición química compleja que contiene productos químicos procedentes de la biomasa lignocelulósica, como alcoholes/aldehídos alifáticos, furanoides, piranoides, bencenoides, ácidos grasos e hidrocarburos de alta masa molecular. Estos componentes se mezclan con agua (25- 45%), que se forma en el proceso de pirólisis para formar una emulsión con los componentes orgánicos. A partir de esta, se puede extraer una amplia gama de "productos químicos verdes" del *bio-oil* mediante la extracción con disolventes. La extracción con fluidos supercríticos, como el CO₂ supercrítico, puede extraer selectivamente los productos químicos de valor añadido del biopetróleo. Estos compuestos químicos pueden utilizarse para obtener resinas naturales, aromas alimentarios, conservantes de la madera, fertilizantes de liberación lenta, productos farmacéuticos, etc. (Naik et al., 2010).

FT oil o combustible verde a partir de biomasa

Franz Fisher y Hans Tropsch estudiaron por primera vez la conversión del gas de síntesis ($\text{CO} + \text{H}_2$) en muchos compuestos orgánicos útiles en 1923. El gas de síntesis producido por la gasificación de la biomasa puede convertirse en un gran número de compuestos orgánicos. El proceso de conversión de la mezcla de CO y H_2 en combustibles líquidos o hidrocarburos sobre catalizadores de metales de transición se conoce como aceite Fisher-Tropsch (FT oil) o combustible de motor verde (Naik et al., 2010). Los procesos de síntesis FT (FTS) tienen flexibilidad en cuanto a las materias primas (carbón, biomasa, gas natural) y el combustible producido por el proceso FTS contiene poco azufre. El principal inconveniente del proceso FTS es la polimerización en el proceso, que produce ceras de muy alta masa molecular que deben ser hidrocraqueadas para poder producir diesel verde. Algunas de las publicaciones recientes indican que el uso de la tecnología del proceso FT para la conversión de biomasa en hidrocarburo sintético puede ser una alternativa prometedora y neutra en carbono a los combustibles convencionales. El diagrama de flujo del proceso FT se muestra en la Fig. 12. La gasificación de la biomasa puede ofrecer la oportunidad de convertir el biosyngas en combustibles verdes como el H_2 y el aceite FT. La gasificación de la biomasa produce biosíntesis, que contiene productos degradados de la biomasa como carbohidratos (celulosa, hemicelulosa) y lignina. Las mezclas de gas consisten en monóxido de carbono (28- 36%), dióxido de carbono (22-32%), hidrógeno (21-30%), metano (8-11%), benceno/tolueno/xileno (0.84-0.96), etano (0.16-0.22), alquitrán (0.15-0.24). La reacción FTS se muestra a continuación.



donde n es la longitud promedio de la cadena de hidrocarburos y m es el número de átomos de hidrógeno por carbono. Todas las reacciones son exotérmicas y el producto es una mezcla de diferentes hidrocarburos en la que la parafina y las olefinas son los componentes principales. En la FTS, un mol de CO reacciona con dos moles de H_2 en presencia de un catalizador para formar una cadena de hidrocarburos.



El $-\text{CH}_2-$ es el bloque de construcción de los hidrocarburos más largos. Los productos del FTS son principalmente hidrocarburos alifáticos de cadena lineal. Además de los hidrocarburos de cadena lineal, también se forman hidrocarburos ramificados y alcoholes primarios en cantidades menores. La distribución de los productos obtenidos del FTS incluye hidrocarburos ligeros como el metano (CH_4), el etileno (C_2H_4) y el etano (C_2H_6), el gas licuado de petróleo o LPG (C_3-C_4), el propano (C_3H_8), el butano (C_4H_{10}), la gasolina (C_5-C_{12}), el diesel ($\text{C}_{13}-\text{C}_{22}$) y la cera ($\text{C}_{23}-\text{C}_{33}$). Algunas biomásas crudas contienen trazas de contaminantes como NH_3 , H_2S , HCl , polvo y álcalis en las cenizas. La distribución de los productos depende del catalizador y de los parámetros del proceso, como la temperatura, la presión y el tiempo de permanencia.

Bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica

Las tecnologías de conversión biológica se basan en procesos microbianos y enzimáticos para producir azúcares a partir de biomasa como la lignocelulósica, el almidón o la celulosa. Los azúcares pueden convertirse posteriormente en alcohol y otros disolventes de interés para el combustible y productos químicos.

La conversión de biomasa en combustibles líquidos, como el etanol, requiere una serie de operaciones básicas que incluyen el pretratamiento, la producción de enzimas, la hidrólisis, la fermentación y la recuperación del etanol. La Fig. 20 detalla los pasos necesarios para la conversión de biomasa lignocelulósica en etanol y la utilización de productos intermedios para productos químicos de valor añadido.

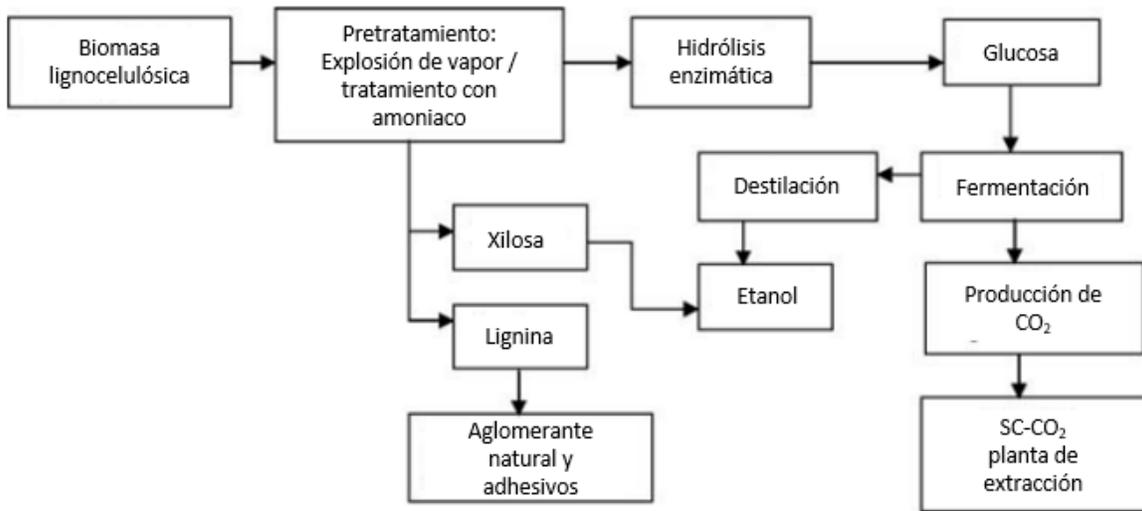


Figura 20. Conversión de biomasa lignocelulósica en etanol. Adaptado de: Naik et al., 2010.

La investigación sobre la conversión de biomasa en etanol hace hincapié en la reducción de los costos, lo que requiere el mejoramiento en la conversión de celulosa y hemicelulosa en azúcar, la fermentación combinada de xilosa y glucosa, la reducción de los requerimientos de energía para el pretratamiento, la conversión de lignina en productos de valor agregado y un proceso eficiente de separación para los alcoholes. Los residuos agrícolas, los residuos forestales y el procesamiento posterior a la cosecha de cultivos comestibles industriales generan enormes cantidades de residuos lignocelulósicos que contienen carbohidratos. Esta biomasa lignocelulósica como ya se ha indicado, consta de tres unidades estructurales principales: celulosa, hemicelulosa y lignina. La celulosa es un polímero cristalino de glucosa, la hemicelulosa es un polímero amorfo de xilosa y arabinosa, y la lignina es un compuesto poli aromático de gran tamaño. La conversión de biomasa lignocelulósica compleja en alcohol es más difícil en comparación con las materias primas basadas en el almidón. La conversión de la biomasa lignocelulósica en alcohol requiere un proceso de tres pasos: pretratamiento de la biomasa, hidrólisis ácida o enzimática y fermentación/destilación. Los procesos de pretratamiento separan la xilosa y la lignina de la celulosa cristalina. El procedimiento de explosión de vapor es un método eficaz de pretratamiento para la conversión de la biomasa lignocelulósica, en este proceso la muestra de biomasa se coloca en un recipiente a presión (el digestor es un equipo característico de este proceso, sin

embargo, existen diferentes tipos de dispositivos para realizar la explosión de vapor) y se vaporiza utilizando vapor saturado durante un corto periodo de tiempo (de 20 s a 20 min) a una temperatura de 473-543 K (200-270 °C) y una alta presión de 14-16 bar (Naik et al., 2010). Después, la presión en el digestor se reduce rápidamente abriendo el flujo de vapor para exponer el material a la presión atmosférica normal y así provocar una explosión que desintegre la biomasa lignocelulósica. La explosión de vapor hace que la hemicelulosa y la lignina de la madera se descompongan y se conviertan en fracciones de bajo peso molecular que pueden extraerse fácilmente. Por lo tanto, la mayor parte de la fracción hidrosoluble de la hemicelulosa puede eliminarse mediante la extracción con agua. A su vez, también se extrae una parte de la fracción de bajo peso molecular de la lignina. Por su parte, la xilosa puede fermentarse para obtener etanol y la lignina puede seguir procesándose para producir otros combustibles. La celulosa cristalina permanece sólida después del pretratamiento y posteriormente se descompone en glucosa mediante un proceso de hidrólisis enzimática. La glucosa se fermenta en alcohol y la fracción de hemicelulosa se convierte en xilosa. La conversión de la xilosa en etanol es un proceso difícil, por lo que es necesario un pretratamiento para reducir la cristalinidad de la celulosa para disminuir la polimerización de la celulosa y de la cubierta de hemicelulosa-lignina que rodea la celulosa y para aumentar la superficie disponible en la que se pretende la enzima actúe.

El etanol puede mezclarse con la gasolina para producir un combustible oxigenado con menos emisiones de hidrocarburos y gases de efecto invernadero, aunque esto ocasiona que algunos aldehídos aumenten su concentración, lo que puede causar problemas de salud si no se regula. Los automóviles convencionales pueden funcionar con mezclas de etanol/gasolina de entre el 5% y el 10% sin necesidad de alterar los equipos del motor ni su configuración. Los principales problemas de funcionamiento del motor con los combustibles mezclados con alcohol son la calidad del combustible, la volatilidad, el número de octano, el arranque en frío, el funcionamiento en caliente, el consumo del combustible y la erosión de partes por el porcentaje de alcohol en la mezcla.

Conversión química

H. Hidrólisis química

Consiste en la ruptura de los enlaces β -1,4-glicosídicos que unen las moléculas de celulosa y hemicelulosa, obteniendo los monómeros (azúcares) correspondientes. La primera tecnología desarrollada en este aspecto se conoce como el proceso Scholler, proceso desarrollado en Alemania en 1920 (Faba et al., 2014). Los factores específicos importantes en la hidrólisis química son la relación superficie/volumen, la concentración de ácido, la temperatura y el tiempo. La relación superficie/volumen es especialmente importante, ya que también determina la magnitud del rendimiento de la glucosa. Por lo tanto, cuanto menor sea el tamaño de las partículas, mejor será la hidrólisis en términos de extensión y velocidad de reacción. Con respecto a la relación líquido/sólido, cuanto más alta sea la relación, más rápida será la reacción.

I. Extracción con disolventes

La extracción con disolventes implica diferentes operaciones unitarias: extracción del aceite de las semillas oleaginosas utilizando hexano como disolvente; evaporación del disolvente (a través de la destilación de la mezcla de aceite y hexano, llamada miscela) y tostado de la harina desaceitada. En casos especiales, se pueden utilizar otros disolventes, como: disolventes halogenados (principalmente diclorometano), acetona, etanol o isopropanol. También se puede realizar una extracción supercrítica con CO₂. La extracción se refiere al proceso en el que la sustancia deseada se elimina selectivamente de las materias primas permitiendo que la sustancia deseada se disuelva en el disolvente, y recuperando posteriormente la sustancia del disolvente. Para eliminar la sustancia concreta de la biomasa, la extracción y la separación son esenciales. Normalmente, la biomasa (madera, paja de trigo, hierbas aromáticas, etc.) contiene un gran volumen de compuestos macromoleculares (polisacáridos, celulosa, hemicelulosa y lignina) denominados metabolitos primarios. Las otras moléculas bioquímicas de bajo volumen y alto valor, como los terpenoides, las ceras, las resinas, los esteroides y los alcaloides, se conocen como metabolitos secundarios o biomasa extractiva. En el proceso de biorrefinería, estas sustancias químicas se extraen inicialmente de la biomasa utilizando la extracción con disolventes o la extracción con fluidos

supercríticos. Dewarte et al., 2007 y Clark et al., 2006 informaron de la biorrefinería integrada basada en la paja y aislaron sustancias químicas de alto valor como ceras, policosanol y esterol utilizando dióxido de carbono supercrítico. La extracción con fluidos supercríticos puede utilizarse para la extracción de maderas aromáticas (madera de cedro, madera de sedal, madera de pino) para aislar los extractivos. La biomasa lignocelulósica extraída se utiliza además para la hidrólisis y la fermentación para la producción de biocombustibles. Los demás disolventes, como el etanol, la acetona, el metanol y el agua, pueden utilizarse para aislar el extracto deseado de la biomasa.

J. Conversión de biomasa en agua supercrítica

Un fluido supercrítico se define como una sustancia que se encuentra en condiciones de temperatura y presión superiores a su punto crítico de vapor-líquido (para el agua es 644 K (371 °C) y 22 MPa; para el CO₂ es 304 K (31 °C) y 7.4 MPa). En condiciones supercríticas, un fluido no es ni líquido ni gas, ya que no se puede hacer ebullición disminuyendo la presión a temperatura constante, y no se condensaría enfriando a presión constante. El procesamiento en fluido supercrítico de la biomasa para convertirla en productos químicos representa una vía alternativa a la hidrólisis ácida y a la hidrólisis enzimática de la celulosa en azúcares. Con la hidrólisis ácida, la recuperación del ácido es un problema costoso y contaminante. Mientras que la sacarificación enzimática necesita un tratamiento previo de la biomasa lignocelulósica.

El agua supercrítica puede convertir rápidamente la celulosa en azúcar y convertir la biomasa en una mezcla de aceites, ácidos orgánicos, alcohol y metano. En estado supercrítico (es decir, 300-644 K (27-371 °C); 200-250 bar) y casi crítico (523-573 K (250-300 °C)); los componentes ácidos (H⁺) y básicos (OH⁻) del agua están separados y se disuelven en la biomasa. El agua supercrítica disuelta rompe rápidamente los enlaces de la celulosa y la hemicelulosa para producir pequeñas moléculas de azúcar, glucosa, xilosa y oligosacáridos. Estas propiedades hacen del agua supercrítica un medio de reacción muy prometedor sin necesidad de utilizar ningún catalizador para la conversión de la biomasa en productos de valor agregado. El esquema de la conversión de biomasa en agua supercrítica y las corrientes laterales de utilización integral del proceso se muestran en la Fig. 21.

La tecnología de gasificación con agua supercrítica se ha demostrado para la conversión de celulosa en glucosa en el rango de 10-20 s y por encima de los 45 s de inicio de la pirólisis. A medida que la temperatura aumenta hasta 873 K (600 °C), el agua supercrítica se convierte en un fuerte oxidante y da lugar a la desintegración completa de la estructura del sustrato mediante la transferencia de oxígeno del agua a los átomos de carbono del sustrato. El átomo de hidrógeno del agua se libera y forma hidrógeno. El agua supercrítica también rompe los enlaces celulósicos y forma productos gaseosos.

La reacción general típica para la biomasa es la siguiente:

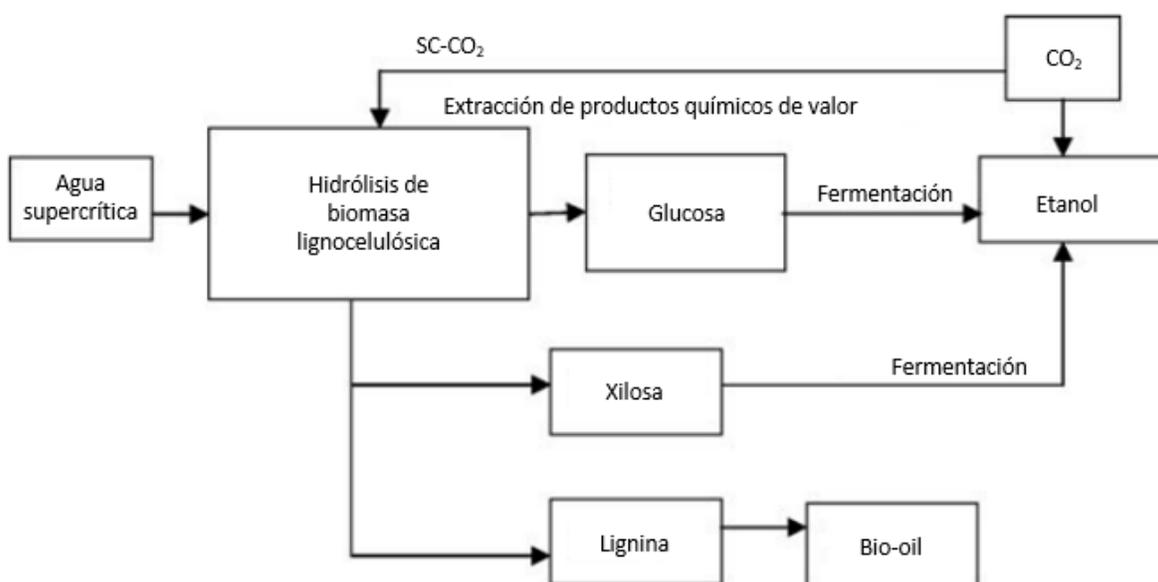
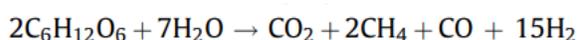


Figura 21. Conversión de biomasa en agua supercrítica. Adaptado de: Naik et al., 2010.

Residuos

La producción de biocombustibles de segunda generación, como el bioetanol, el biodiesel y el biometano, se presenta como una opción prometedora para reducir nuestra dependencia de los combustibles fósiles y mitigar el impacto ambiental asociado con nuestras necesidades energéticas. No obstante, al igual que en cualquier proceso de producción, también se generan subproductos y residuos que necesitan ser gestionados de manera apropiada. A

continuación, se abordará un análisis sobre los residuos más comunes que surgen en el proceso de producción de bioetanol, biodiesel y biometano de segunda generación, considerando su impacto ambiental y las opciones disponibles para su manejo y disposición, con el objetivo de minimizar el impacto ambiental y optimizar la eficiencia del proceso.

Es importante resaltar que estos son apenas algunos de los residuos más frecuentes que se generan en el proceso de producción de biocombustibles de segunda generación. Cada planta de producción puede tener distintos subproductos o residuos, por lo que se debe realizar una evaluación individual en cada caso para determinar el manejo y la disposición adecuados.

La producción de **bioetanol de segunda generación**, a partir de biomasa lignocelulósica como residuos forestales, residuos agrícolas y cultivos energéticos, representa una prometedora ruta para la obtención de biocombustibles. Aunque este proceso es más complejo que la producción de bioetanol de primera generación también genera una serie de subproductos y residuos que requieren un adecuado manejo y disposición.

1. Lignina: Durante el proceso de sacarificación y fermentación de la biomasa lignocelulósica, se obtiene lignina como un subproducto no deseado. La lignina puede ser utilizada como fuente de energía renovable en plantas de energía o puede ser sometida a procesos de modificación química para obtener productos de alto valor agregado, como adhesivos, polímeros y productos químicos (Alvira et al., 2010). La lignina se puede utilizar como fuente de energía mediante su combustión para generar electricidad y calor en las plantas de bioetanol. Sin embargo, el manejo de la lignina puede ser un desafío debido a su alta resistencia y dificultad para su uso en aplicaciones de mayor valor agregado. Se requiere una mayor investigación y desarrollo de tecnologías para aprovechar al máximo la lignina y reducir su impacto ambiental (Budzinski et al., 2011). Si bien la lignina puede ser utilizada como fuente de energía a través de su combustión, este proceso puede generar emisiones de gases contaminantes a la atmósfera, como dióxido de carbono y óxidos de azufre y nitrógeno, lo que contribuye al cambio climático y a la contaminación del aire. Por lo tanto, es importante implementar tecnologías de combustión más limpias y eficientes para reducir estas emisiones y minimizar el impacto ambiental (Budzinski et al., 2011).

2. Hemicelulosas y celulosas no convertidas: Aunque los procesos de sacarificación y fermentación en la producción de bioetanol de segunda generación se optimizan para obtener la máxima conversión de carbohidratos en etanol, pueden quedar hemicelulosas y celulosas no convertidas. Estos residuos pueden ser sometidos a procesos adicionales, como hidrólisis enzimática o fermentación avanzada, para maximizar la extracción de azúcares y obtener un mayor rendimiento de etanol (Zabed et al., 2016). Estos residuos se pueden utilizar como alimento para animales o como aditivos en la elaboración de productos alimentarios. Sin embargo, es fundamental asegurar un manejo correcto y cumplir con los requisitos reguladores para minimizar cualquier impacto negativo (Mood et al., 2013). La presencia de hemicelulosas y celulosas no convertidas en los residuos del proceso de producción de bioetanol de segunda generación indica una eficiencia reducida en el proceso de fermentación. Esto puede requerir un uso adicional de recursos y energía para intentar convertir estos azúcares no fermentables en biocombustibles, lo que puede tener implicaciones negativas para el balance energético e impacto ambiental general del proceso (Bradamante et al., 2015).

3. Cenizas y otros subproductos de la combustión de biomasa: En algunos casos, la biomasa utilizada en la producción de bioetanol de segunda generación puede contener impurezas o minerales que se convierten en cenizas durante el proceso de combustión. Estas cenizas son ricas en nutrientes como potasio, calcio y fósforo, por lo que pueden ser utilizadas como fertilizantes o enmiendas del suelo. También se pueden explorar opciones para el reciclaje de cenizas en la producción de materiales de construcción (Kumar et al., 2018). Es esencial un manejo adecuado de las cenizas y otros subproductos de la combustión, siguiendo las regulaciones ambientales, para minimizar el impacto ambiental y considerar opciones como la encapsulación o el reciclaje en aplicaciones como la producción de fertilizantes o materiales de construcción (Bello et al., 2019). Las cenizas y otros subproductos generados durante la combustión de biomasa pueden contener residuos minerales y metales pesados. Si no se gestionan adecuadamente, las cenizas y otros subproductos pueden ocasionar la contaminación del suelo y de los cuerpos de agua cercanos, lo que perjudica la calidad del agua y del suelo, y puede tener un impacto negativo en los ecosistemas acuáticos y en los cultivos cercanos (Bello et al., 2019).

4. Azúcares no fermentables: Durante el proceso de sacarificación y fermentación de la biomasa lignocelulósica, es posible que haya azúcares que no sean fermentables por las levaduras utilizadas en la producción de bioetanol. Estos azúcares no convertidos pueden ser utilizados como sustratos para la producción de otros productos químicos, como ácidos orgánicos, solventes o productos de fermentación especializados. Además, se están desarrollando avances en la ingeniería genética para mejorar la capacidad de las levaduras para fermentar estos azúcares no fermentables (Baral et al., 2019). La presencia de azúcares no fermentables en los residuos indica una utilización ineficiente de la biomasa lignocelulósica en el proceso de producción de bioetanol. Esto puede implicar un mayor uso de recursos y energía para intentar maximizar la conversión de estos azúcares no fermentables, lo que puede tener implicaciones negativas para el balance energético y la huella ambiental del proceso (Mood et al., 2013).

5. Residuos de separación sólido-líquido: Durante el proceso de producción de bioetanol de segunda generación donde se realiza la separación de la fracción sólida y líquida, se generan residuos sólidos que contienen parte de los sólidos no convertidos y las impurezas. Estos residuos sólidos pueden ser sometidos a procesos adicionales, como secado y tratamiento termoquímico, para obtener productos de valor agregado, como pellet de biomasa o biocarbón para fines energéticos o agrícolas (Haupt et al., 2012). El procesamiento y separación de los residuos sólidos y líquidos generados durante el proceso de producción de bioetanol puede requerir el uso de energía adicional y generar residuos adicionales, como los lodos resultantes de la separación. El manejo adecuado de estos residuos sólidos y líquidos, incluyendo su tratamiento y disposición final, es fundamental para minimizar los impactos ambientales asociados (Konda et al., 2014).

La producción de **biodiesel de segunda generación** a partir de aceites no comestibles, grasas residuales y lignocelulosa representa una ruta prometedora para la obtención de biocombustibles. Aunque este proceso es más complejo que la producción de biodiesel de primera generación también genera una serie de subproductos y residuos que requieren un manejo y una disposición adecuados.

1. Glicerol: Al igual que en la producción de biodiesel de primera generación, durante el proceso de transesterificación en la producción de biodiesel de segunda generación también se produce glicerol como subproducto. El glicerol obtenido durante este proceso puede requerir un proceso de purificación adicional para su posterior uso o aprovechamiento en aplicaciones de mayor valor, como la producción de productos químicos, polímeros y aditivos para alimentos y cosméticos (Lam et al., 2019).

2. Lignina: En el caso del biodiesel de segunda generación, se utiliza la lignocelulosa como materia prima, lo que resulta en la generación de lignina como un subproducto no deseado. La lignina se puede utilizar como fuente de energía renovable en procesos de combustión o gasificación, o como materia prima para la producción de productos químicos y materiales con alto valor agregado, como bioplásticos y materiales compuestos (Konda et al., 2014). La lignina representa un desafío debido a su alta resistencia y dificultad para su uso en aplicaciones de mayor valor agregado. También se están investigando tecnologías para convertir la lignina en productos químicos y materiales de alto valor agregado. Sin embargo, es importante tener en cuenta el impacto ambiental y regular las emisiones generadas durante el proceso de combustión de la lignina (Ragauskas et al., 2014). Aunque la lignina puede tener un valor como fuente de energía y como precursor de productos químicos de alto valor, su combustión para la generación de energía puede generar emisiones atmosféricas de gases y partículas contaminantes. Estas emisiones pueden contribuir al cambio climático y a la contaminación del aire, afectando la salud humana y el medio ambiente. Por lo tanto, es importante utilizar tecnologías de combustión más limpias y emplear métodos de captura y tratamiento de emisiones para reducir los impactos ambientales derivados de la lignina (Sevilla et al., 2015).

3. Hemicelulosas y celulosas no convertidas: Durante el proceso de producción de biodiesel de segunda generación, pueden quedar hemicelulosas y celulosas no convertidas. Estos residuos pueden ser sometidos a procesos adicionales, como hidrólisis enzimática o fermentación avanzada, para maximizar la extracción de azúcares y obtener otros productos biobásicos, como bioplásticos o productos químicos de interés (Kumar et al., 2017). Estos residuos no convertidos pueden tener un impacto negativo en la eficiencia del proceso.

Además, si estos residuos no se gestionan adecuadamente, pueden liberar gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono y el metano, durante su descomposición, lo que contribuye al cambio climático. Es importante optimizar los procesos de conversión y desarrollar tecnologías más eficientes para minimizar el impacto ambiental de estos residuos no convertidos (Dias et al., 2020). Una opción para su gestión es su uso como sustrato para la producción de biogás mediante la digestión anaeróbica. Además, se están investigando tecnologías que permiten una mayor conversión de estos residuos en productos químicos más valiosos, como ácidos orgánicos o bioplásticos (Dias et al., 2020).

4. Cenizas y otros subproductos de la combustión de biomasa: Si la producción de biodiesel de segunda generación utiliza biomasa lignocelulósica como fuente de carbono, es posible que se generen cenizas y subproductos de la combustión. Al igual que en el caso del biodiesel de primera generación, estas cenizas y subproductos pueden utilizarse como fertilizantes o enmiendas del suelo (siempre y cuando cumplan con los requisitos reglamentarios y se evite la contaminación del suelo y del agua (Cao et al., 2017)), o pueden ser reciclados en la producción de materiales de construcción (Carriquiry et al., 2018). Si las cenizas y otros subproductos de la combustión de biomasa no se gestionan adecuadamente, pueden tener impactos ambientales negativos. La liberación de metales pesados y otros contaminantes de las cenizas puede contaminar los suelos y las aguas subterráneas, dañar la biodiversidad y afectar la calidad del agua y del aire circundante. Por lo tanto, es esencial llevar a cabo una gestión adecuada de las cenizas y otros subproductos, siguiendo las regulaciones ambientales y utilizando prácticas responsables de disposición y tratamiento (Cao et al., 2017).

5. Residuos sólidos no convertidos: Durante el proceso de producción de biodiesel de segunda generación, es posible que queden residuos sólidos no convertidos, como impurezas y sólidos insolubles. Estos residuos pueden requerir un tratamiento separado y adecuado antes de su disposición final. Dependiendo de su composición y cantidad, pueden ser destinados a plantas de tratamiento de residuos o procesados para su reciclaje (Carriquiry et al., 2018). Si los residuos sólidos no convertidos, como los restos de biomasa, no se manejan adecuadamente, pueden contribuir a la contaminación del medio ambiente. Por ejemplo, pueden ocupar espacio en vertederos o incineradores, aumentando los desechos y las

emisiones de gases de efecto invernadero. Por lo tanto, es esencial aplicar prácticas de gestión responsables, como el reciclaje, el compostaje y la valorización energética, para minimizar los impactos ambientales asociados con estos residuos sólidos no convertidos (Jin et al., 2018).

La producción de **biometano de segunda generación** a partir de biomasa lignocelulósica, residuos agrícolas y orgánicos, ofrece una ruta prometedora para la obtención de una fuente renovable gas natural. Aunque este proceso es más complejo que la producción de biometano de primera generación también genera una serie de subproductos y residuos que requieren un adecuado manejo y disposición.

1. Digestato: Al igual que en la producción de biometano de primera generación, durante el proceso de digestión anaeróbica de la biomasa lignocelulósica se genera digestato, un subproducto líquido rico en nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio. El digestato se puede utilizar como enmienda del suelo en la agricultura para mejorar la calidad y fertilidad del suelo. Sin embargo, es esencial tener en cuenta las regulaciones locales y aplicar el digestato en cantidades adecuadas para evitar la contaminación del agua subterránea y maximizar su beneficio agrícola (EBA, 2019).

2. Lignina: Al igual que en el caso de bioetanol y biodiesel de segunda generación, durante el proceso de producción de biometano de segunda generación a partir de biomasa lignocelulósica, se obtiene lignina como subproducto no deseado. La lignina puede ser utilizada como fuente de biomasa para la producción de calor y energía en instalaciones de biometano. También se están investigando tecnologías para convertir la lignina en productos químicos y materiales de alto valor agregado, como bioplásticos y adhesivos (Stoklosa et al., 2017). Si bien la lignina puede ser un subproducto valioso con diversas aplicaciones, su generación durante la producción de biometano de segunda generación puede tener un impacto ambiental negativo. Durante la conversión anaeróbica, la lignina puede hacer que el proceso sea menos eficiente y reducir la producción de biogás. Además, la eliminación inadecuada de la lignina puede provocar la liberación de compuestos tóxicos y generar problemas con la calidad del agua y del suelo. Por lo tanto, es importante optimizar las

condiciones de digestión y considerar opciones de valorización para reducir los impactos ambientales asociados con la lignina (Sevilla et al., 2015).

3. Residuos sólidos no digeribles: Durante el proceso de digestión anaeróbica, es posible que sobren residuos sólidos no digeridos, como impurezas y materiales inorgánicos. Estos residuos sólidos pueden requerir un tratamiento adicional, como compostaje o tratamiento de residuos sólidos, para su correcta disposición. También se pueden explorar opciones de reciclaje o reutilización, como la producción de bioplásticos o materiales de construcción (Strapac et al., 2017). Los residuos sólidos no digeribles, como restos de biomasa, pueden tener un impacto ambiental negativo si no se gestionan adecuadamente. La disposición inadecuada de estos residuos puede contribuir a la producción de gases de efecto invernadero, como el metano, durante su descomposición. Además, si se depositan en vertederos sin el tratamiento adecuado, estos residuos pueden contaminar el suelo y el agua, afectando los ecosistemas y la calidad del agua subterránea. Es esencial implementar prácticas de gestión responsables, como el compostaje o la valorización energética, para minimizar los impactos ambientales asociados con los residuos sólidos no digeribles (Jin et al., 2018).

4. Biogás residual: Al igual que en la producción de biometano de primera generación, puede haber biogás residual que contiene componentes no deseados en la producción de biometano de segunda generación. Este biogás residual se puede utilizar para la generación de energía térmica para el propio proceso de producción, o puede ser sometido a un proceso de purificación adicional para obtener biometano de alta pureza para su uso como biogás vehicular o inyección a la red de gas natural (Lora et al., 2015).

5. Extractos líquidos ricos en nutrientes: Durante la producción de biometano de segunda generación, es posible obtener extractos líquidos ricos en nutrientes como resultado de los procesos de pretratamiento de la biomasa o de la separación sólido-líquido posterior a la digestión anaeróbica (Lora et al., 2015). Estos extractos líquidos contienen una variedad de nutrientes valiosos, como nitrógeno, fósforo y potasio, que pueden ser beneficiosos para su uso como fertilizantes en la agricultura. Al aplicar estos extractos líquidos en los cultivos, se puede mejorar la fertilidad del suelo y promover un crecimiento saludable de las plantas. Sin

embargo, es esencial gestionar la aplicación adecuada de estos extractos líquidos para evitar el exceso de nutrientes, que puede resultar en la lixiviación de nutrientes en cuerpos de agua y la generación de problemas de eutrofización. Se recomienda seguir las regulaciones y las prácticas recomendadas para minimizar el impacto ambiental y maximizar la eficiencia de los nutrientes aplicados (Velthof et al., 2019).

Es esencial abordar estos efectos negativos y buscar soluciones que permitan minimizar su impacto. La implementación de tecnologías más limpias, prácticas de gestión y disposición adecuadas, así como la investigación continua en tecnologías de tratamiento y aprovechamiento de residuos, contribuirán a una producción de biocombustibles más sostenible y con menores impactos ambientales.

5.2.2 Evaluación de biocombustibles de segunda generación

5.2.2.1 Evaluación de la producción

El proceso de conversión del biocombustible implica varias fases, entre ellas el pretratamiento, la producción de enzimas, la hidrólisis, la fermentación y la biorrefinería (Cardona et al., 2010). Sánchez y Cardona realizaron un estudio detallado sobre el proceso de conversión, centrándose en varios tipos de biomasa lignocelulósica para la producción de bioetanol. El estudio muestra que el principal reto de la utilización de biomasa lignocelulósica es el alto costo de la conversión del biocombustible. La Tabla 6 resume el rendimiento de biocombustible obtenido a partir de biomasa de segunda generación.

Tabla 6. Producción de bioetanol a partir de biomasa de segunda generación.

Adaptado de: Mat Aron et al., 2020.

| Cultivo | Producción de etanol (L/kg de biomasa seca) | Aguas residuales (L/L de etanol, fuente) |
|------------------|--|---|
| Rastrojo de maíz | 5.85 | 7-9 (Iriblogger et al., 2019) |
| Paja de arroz | 116.65 | 10-15 (Ferreira-Leitão et al. 2014) |

| | | |
|--------------------------|-------------|-------------------------------|
| Paja de cebada | 0.054 | - |
| Harina de maíz | 9.67 ± 0.11 | 2-4 (Hoang et al. 2016) |
| Paja de cáscara de arroz | 0.00086 | - |
| Eucalipto | 0.612 | 8-12 (Cavalaglio et al. 2015) |
| Poda de olivo | 0.023 | - |
| Madera de palma | 0.0229 | - |

Algunos consideran que las técnicas de modificación genética (MG) son la clave para conseguir un alto rendimiento. Según el estudio realizado por Khan et al., (2021), las técnicas de MG pueden aumentar el rendimiento de biomasa y la producción de biocombustibles en un promedio del 20%-50%, aumentando así la estabilidad energética total de los residuos de los cultivos. Por ejemplo, desarrollando resistencia a los fertilizantes, plaguicidas y a las inundaciones. Sin embargo, las discusiones sobre los cultivos transgénicos pueden resultar en debates sobre decisiones socioeconómicas y políticas (Khan et al., 2021). Sin embargo, es importante tener en cuenta que el grado exacto de aumento en el rendimiento puede variar dependiendo del tipo de cultivo, la técnica de modificación genética utilizada y las condiciones agronómicas específicas.

Los biocombustibles de segunda generación son contemporáneos e innovadores, pero tienen un impacto específico en la sostenibilidad, el equilibrio del ciclo de vida de las emisiones de GEI. Este sigue siendo un problema dependiendo de la ubicación en la que se produzcan los biocombustibles de segunda generación, los métodos de conservación, los modos de transporte y los métodos de procesamiento. Los biocombustibles de segunda generación incluyen residuos procedentes de operaciones, como el metano de los vertederos o la conversión de residuos de procesos derivados de combustibles fósiles (Mohr & Raman, 2015). Un estudio detallado de Havlík et al., informó que la producción de biocombustibles de segunda generación generados a partir de madera procedente de fuentes limpias reduciría las emisiones totales en un intervalo aproximado de 50% a 90%, teniendo en cuenta la deforestación, el consumo de agua en la agricultura y el aumento de los precios de los cultivos, especialmente con el aumento de la superficie dedicada a biocombustibles. Sin embargo, otros requisitos medioambientales, como la conservación de los ecosistemas, la regulación del clima y la disponibilidad de leña para los habitantes, podrían verse influidos

por las materias primas de la biomasa y el uso de la tierra (Havlík et al., 2011). Cabe mencionar que la reducción exacta de emisiones variará según la eficiencia de los procesos de producción y conversión, las características específicas del sistema agrícola utilizado para el cultivo de la biomasa, así como los factores de emisiones asociados a la producción y transporte de la biomasa.

Las propiedades bacteriológicas y físicas de los suelos también se ven perjudicadas por la eliminación de residuos agrícolas y forestales. Por ejemplo, según Powlson et al., (2008) el ahorro energético relacionado con el enterramiento de salvado de trigo en las tierras de cultivo es mayor al ahorro que se produce debido a la eliminación de éste para la producción de biodiesel. Diversos datos publicados indican que cuando se elimina la madera muerta de los bosques, la presencia y variabilidad de las especies de aves disminuye significativamente. En el caso de las aves que anidan en cavidades (por ejemplo, los pájaros carpinteros), se ha registrado un impacto crítico. Los huevos y las crías de los insectos son capturados y expulsados del bosque a medida que se retiran los residuos y se envían a las centrales energéticas, lo que no solo reduce la proliferación de insectos, sino que también elimina una importante fuente de alimento para las aves (Riffell et al., 2011, Victorsson et al., 2013). Evidentemente, en las últimas décadas, el crecimiento de las plantas de biocombustibles celulósicos a nivel industrial se ha debilitado más de lo previsto. Las últimas estadísticas sobre el costo de producción de los biocombustibles indican que los biocombustibles de segunda generación, en términos energéticos medios, son aproximadamente dos veces más caros que los combustibles fósiles (Carrquiry et al., 2011).

Actualmente, producir biocombustibles de segunda generación es rentable, en Europa, un informe de 2018 de la Agencia Internacional de Energía (AIE) estimó que el costo de los biocombustibles de segunda generación podría ser aproximadamente de 0.80 a 1.00 euros por litro (IEA, 2018), pero parece haber varios retos tecnológicos que deben superarse antes de aprovechar su potencial al máximo. Durante la fase de pretratamiento y extracción, la necesidad de energía térmica y enzimas durante la hidrólisis basada en la celulosa aumenta el valor de producción de bioetanol (Kazi et al., 2010). El tratamiento de coproductos como el salvado de trigo plantea importantes problemas de sostenibilidad, ya que se requiere un

pretratamiento para la sacarificación enzimática con el fin de superar los problemas asociados a la biomasa lignocelulósica (Zhu & Pan, 2010). Además de la producción de métodos sostenibles, de bajo pretratamiento y procesos de fermentación altamente productivos, la incorporación de la integración de la hemicelulosa es un factor técnico que debe tenerse en cuenta al desarrollar biorrefinerías sostenibles (Yamakawa et al., 2018).

Actualmente, y a nivel mundial, se están llevando a cabo esfuerzos para comercializar los biocombustibles de segunda generación. Un ejemplo notable es el consorcio francés Futurol Project, que avanzó significativamente en el desarrollo de biocombustibles de segunda generación a partir de 2020. Este consorcio, financiado en parte por el gobierno francés, tiene desde hace tiempo el objetivo de desarrollar un proceso que permita la producción de etanol a gran escala a partir de residuos vegetales como paja en lugar de cultivos alimentarios. En 2020, el consorcio logró un gran paso hacia este objetivo, anunciando que había comenzado las operaciones comerciales de una instalación piloto para la producción de etanol a partir de residuos de trigo y maíz (Newell, P., 2021).

Otro ejemplo, la empresa estadounidense POET Biorefining ha intensificado sus esfuerzos para comercializar los biocombustibles de segunda generación desde 2020. La empresa desarrolló un nuevo proceso de producción de etanol a partir de mazorcas de maíz y otros residuos de cultivos, y ha buscado expandir su red de suministro de estas materias primas en varias partes del país. A principios de 2023, POET anunció que su planta de biocombustibles de segunda generación en Emmetsburg, Iowa había comenzado a producir etanol a escala comercial utilizando este proceso (Koniszewski, W., & Jeswani, H. K., 2020).

En Asia, Sinopec también ha estado trabajando para comercializar los biocombustibles de segunda generación. La empresa ha invertido considerablemente en investigación y desarrollo de nuevos procesos para la producción de etanol a partir de residuos vegetales. En 2022, Sinopec anunció que su planta experimental de biocombustibles de segunda generación en la provincia de Jiangsu había comenzado a operar a pleno rendimiento, procesando varias toneladas de paja por día en etanol y otros biocombustibles (Zhao, X et al., 2022).

Estos son algunos esfuerzos recientes por avanzar y comercializar los biocombustibles de segunda generación, son indicativos de un cambio positivo hacia la adopción de opciones de energía de fuente renovable a nivel global. Aunque estos desarrollos son prometedores, la transición a biocombustibles derivados de residuos en lugar de cultivos de alimentos sigue siendo un proceso que requiere avances tecnológicos y acuerdos de suministro masivo. No obstante, la existencia de iniciativas y desarrollos exitosos demuestra el potencial de la industria de los biocombustibles en el movimiento hacia una economía menos contaminante. A medida que continúan los avances en la tecnología de biocombustibles y la aceptación a nivel de mercado, uno puede esperar que los biocombustibles de segunda generación jueguen un papel cada vez más importante en la matriz energética mundial.

5.2.2.2 Evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero

La producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica en la UE puede reducir la emisión de GEI entre un 70% y un 85% de aquí a 2050 (Gnansounou et al., 2010). Sin embargo, es esencial considerar otros efectos relacionados con las emisiones de GEI desde una perspectiva más amplia. Por un lado, durante la producción de biomasa lignocelulósica y su conversión en biocombustible, pueden generarse emisiones indirectas de GEI, como las asociadas al uso de fertilizantes, maquinaria agrícola y transporte. Se deben considerar estos aspectos adicionales para evaluar de manera integral el impacto ambiental de la producción de biocombustibles de segunda generación (Gnansounou et al., 2010).

Además, es importante tener en cuenta otros posibles impactos indirectos, como cambios en el uso de la tierra y la mitigación del cambio climático. La expansión de los cultivos de biomasa puede aumentar la presión sobre la tierra y los recursos hídricos, lo cual podría tener repercusiones ambientales negativas si no se maneja adecuadamente. Por lo tanto, es fundamental realizar un análisis exhaustivo de ciclo de vida y evaluar los aspectos sociales, económicos y ambientales en su conjunto para obtener una imagen más completa de los efectos de las emisiones de GEI en cada caso. Un ejemplo es cómo la remoción de la paja de las tierras de cultivo reduce la calidad del suelo, ya que la materia orgánica y los nutrientes del suelo se ven alterados. Esto puede afectar al crecimiento de la biomasa a largo plazo (Mat

Aron et al., 2020). Por otro lado, técnicas inadecuadas como remover la paja de las tierras de cultivo pueden tener un impacto negativo en la volatilización del amoníaco debido a la ausencia de fertilizantes minerales inmovilizantes (Mat Aron et al., 2020). Las tecnologías de conversión de la lignocelulosa para la producción de bioenergía también han sido motivo de preocupación por la liberación de GEI.

Tabla 7. Impacto ambiental y emisión de GEI de diversas biomásas lignocelulósicas

Adaptado de: Mat Aron et al., 2020.

| Biomasa lignocelulósica | Bioenergía | Tecnologías de conversión | Impacto medioambiental | Emisión de GEI |
|--------------------------|----------------------|---------------------------|--|--|
| Paja de arroz | Energía del carbón | Cocción conjunta | Acidificación, calentamiento global y toxicidad | Acidificación causada por la utilización de productos químicos y fertilizantes |
| Residuos de madera | Bioelectricidad | Cocción conjunta | Calentamiento global | 894.3 g CO ₂ eq/ kWh |
| Cultivos y paja de trigo | Bioelectricidad | Cocción conjunta | Calentamiento global | 298-ton CO ₂ eq/TJ |
| Rastrojo de maíz | Biocombustibles | Pirólisis | Calentamiento global | 7.65-ton CO ₂ eq/ha |
| Álamo | Biocombustibles | Pirólisis | Agotamiento de la capa de ozono calentamiento global y acidificación | 50.54 kg CO ₂ eq/MJ y liberación de gases ácidos |
| Residuos forestales | Biocombustibles | Pirólisis | Calentamiento global | 98-117 g CO ₂ eq/km |
| Residuos forestales | Calor y electricidad | Gasificación | Agotamiento de la capa de ozono calentamiento global y acidificación | 8.8-10.5 g CO ₂ eq/MJ |
| Biomasa de sauce | Calor y electricidad | Gasificación | Calentamiento global y acidificación | Acidificación causada por la utilización de productos químicos y fertilizantes |
| Madera de abedul | Calor | Combustión | Calentamiento global y acidificación | 80-110 g CO ₂ eq/ kWh |
| Cáscara de arroz | Bioelectricidad | Combustión | Toxicidad, calentamiento global y acidificación | 217.33 kg CO ₂ eq/MWh |
| Residuos forestales | Electricidad | Combustión | Calentamiento global | 11-14 g CO ₂ eq/kWh |

El reto técnico de la biomasa lignocelulósica sigue siendo la estructura recalcitrante, pues está conformada por componentes poliméricos entrelazados de celulosa, hemicelulosa y lignina. Muchos estudios de revisión han analizado diversas tecnologías para superar los retos relacionados con el proceso de pretratamiento de la biomasa lignocelulósica (Bhatia et al., 2020, Sankaran et al., 2020, Ali et al., 2020). Un estudio realizado por Balan et al. (2014) muestra los retos asociados a la comercialización de biocombustibles producidos a partir de biomasa lignocelulósica. La extensión de la utilización de biocombustibles también requiere varias consideraciones en términos de impacto medioambiental, consumo de energía, tratamiento de residuos, mantenimiento y políticas fiscales para sustituir los combustibles derivados del petróleo por biocombustibles alternativos.

5.2.2.3 Evaluación de la eficiencia energética

La eficiencia energética es un indicador del desarrollo energético futuro que corresponde a las tecnologías actuales del proceso de producción de biocombustibles. El proceso de conversión del biocombustible es el principal factor del elevado consumo energético, ya que la energía es utilizada para una mayor demanda de vapor en la planta de hidrólisis. Los diferentes tipos de procesos de conversión (ruta termoquímica, ruta bioquímica y la ruta híbrida) tienen diferentes eficiencias energéticas, las eficiencias energéticas son determinadas por los requerimientos de calor en la fase de descomposición de la biomasa. Petersen et al. (2015) mostraron que los procesos que siguen rutas termoquímicas tienen la mayor eficiencia energética del $51.7\% \pm 0.8\%$ y del $43\% \pm 1.1\%$ en comparación con la ruta biológica (Petersen et al., 2015, Anex et al., 2010).

La ruta termoquímica implica la descomposición térmica de la biomasa a través de procesos como la gasificación o la pirólisis. Estos procesos generan una variedad de productos gaseosos y líquidos, incluido el bioetanol. Por otro lado, la ruta biológica, también conocida como fermentación, involucra el uso de microorganismos para descomponer la biomasa y producir biocombustibles. Esta ruta se basa en procesos como la sacarificación y la fermentación enzimática.

En términos de la afirmación de que las rutas termoquímicas son más económicas y respetuosas con el medio ambiente para la producción de biocombustibles a partir de biomasa de segunda generación, el estudio señala que estas rutas poseen ventajas clave. En primer lugar, la ruta termoquímica tiene la capacidad de aprovechar una gama más amplia de materiales lignocelulósicos, incluidos aquellos de menor calidad o más recalcitrantes. Esto significa que puede utilizar materiales de biomasa que de otra manera serían difíciles de convertir en biocombustibles mediante métodos biológicos (Petersen et al. 2015). Además, la descomposición termoquímica de la biomasa, como la gasificación o la pirólisis, puede alcanzar temperaturas más altas y condiciones controladas que facilitan una mayor eficiencia en la conversión de energía. Esta ruta también ofrece la oportunidad de recuperar subproductos útiles, como el calor residual para la generación de electricidad, lo que mejora aún más la eficiencia energética general del proceso. La descomposición termoquímica de la biomasa puede aprovechar una amplia gama de materiales lignocelulósicos, incluidos residuos agrícolas y forestales, y lograr una mayor eficiencia energética en comparación con la ruta biológica. Además, se menciona que, desde una perspectiva económica, las tecnologías termoquímicas estándar han estado más ampliamente desarrolladas y tienen un mayor grado de madurez en comparación con las tecnologías biológicas emergentes (Petersen et al. 2015).

Es importante destacar que estos resultados se basan en el estudio específico de Petersen et al. (2015) y pueden variar según las condiciones específicas del proceso y la biomasa utilizada.

Tabla 8. Rendimiento de biocombustible de las materias primas de segunda generación.

| Materia prima | Eficiencia energética (%) | Referencia |
|----------------------------|----------------------------------|--|
| Etanol de rastrojo de maíz | 67 | National Renewable Energy Laboratory (NREL) |
| Biocombustible de camelina | 70 | Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) |
| Etanol de pasto varilla | 80 | NREL |
| Biocombustible de jatropha | 80 | PNNL |

| | | |
|---|----|---|
| Biodiesel de aceite de cocina usado | 90 | NREL |
| Etanol de bagazo de caña de azúcar | 65 | Asociación Brasileña de la Industria de la Caña de Azúcar (UNICA) |
| Biocombustible de semillas oleaginosas no comestibles | 75 | PNNL |
| Biodiesel de grasas animales | 85 | NREL |
| Etanol de residuos forestales | 60 | NREL |

La eficiencia energética de los biocombustibles puede variar mucho en función de la materia prima, el proceso de producción y la ubicación, entre otros factores.

5.2.3 Viabilidad y criterio de selección

Los criterios de selección de los biocombustibles de segunda generación serán los mismos que los considerados para el análisis de los biocombustibles de primera generación:

1. Disponibilidad de materias primas: Los biocombustibles de segunda generación suelen producirse a partir de una gama más amplia de materias primas, como residuos agrícolas, residuos forestales y otros materiales de biomasa no comestibles. La disponibilidad de estas materias primas es un factor crítico en la selección de biocombustibles y ésta puede variar mucho en función de las condiciones y los mercados locales. Adicionalmente, se debe poder obtenerse fácilmente y en cantidades suficientes para soportar una producción a gran escala, a diferencia de las materias primas de los biocombustibles de primera generación, estos no compiten directamente con cosechas con fines alimentarios. Según el Departamento de Energía de Estados Unidos, el pasto varilla y los álamos (ninguna de éstas comestibles) son algunas de las materias primas más utilizadas para los biocombustibles de segunda generación.

Sin embargo, es importante considerar la competencia por espacios y recursos asociados a la producción de estas materias primas. Por ejemplo, la producción de biocombustibles de

segunda generación puede requerir una cantidad significativa de agua de riego para el cultivo de biomasa, lo que puede generar una competencia con otros usos del agua, como la agricultura para alimentos o el suministro de agua potable. Este factor puede tener implicaciones en términos de disponibilidad y sostenibilidad de los recursos hídricos locales (Searchinger et al., 2015). Además, la producción de biomasa para biocombustibles de segunda generación puede competir con otras actividades, como la producción de alimentos y la conservación de la biodiversidad, en términos de uso de tierras agrícolas y forestales. Es fundamental adoptar un enfoque de planificación y gestión integral que considere la sostenibilidad y minimice los impactos negativos, abordando las preocupaciones relacionadas con la competencia por espacios y recursos.

2. Costo de producción: El costo de producción de los biocombustibles es un factor importante para determinar su viabilidad. El costo de la materia prima, el transporte, el procesamiento y otros costos de producción deben ser lo suficientemente bajos como para permitir una producción y venta rentables. Por ejemplo, el costo de producción de los biocombustibles de segunda generación se estima actualmente entre 2.50 y 3.50 dólares por galón, según el Departamento de Energía de Estados Unidos, en comparación con el costo de la gasolina, que es de aproximadamente 2.00 dólares por galón. Sin embargo, se espera que estos valores disminuyan con los avances tecnológicos y las economías de escala.

3. Rendimiento energético: La producción energética de los biocombustibles es otro factor crítico para determinar su viabilidad. Los biocombustibles deben ser capaces de producir suficiente energía para ser competitivos con los combustibles fósiles tradicionales. Los biocombustibles de segunda generación suelen tener un mayor rendimiento energético en comparación con los de primera generación, con un rendimiento energético de aproximadamente 115,000 BTU por galón, según el Departamento de Energía de EE.UU., en comparación con los biocombustibles de primera generación, que tienen un rendimiento energético de aproximadamente 80,000 BTU por galón.

4. Emisiones y sostenibilidad: La sostenibilidad y el impacto medioambiental de los biocombustibles de segunda generación son aspectos cruciales por considerar para su

viabilidad. Estos biocombustibles se promueven como una alternativa más sostenible a los combustibles fósiles debido a su potencial reducción en emisiones de gases de efecto invernadero y su producción basada en biomasa no alimentaria.

De acuerdo con investigaciones realizadas por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos (US EPA, 2021), los biocombustibles de segunda generación pueden generar entre un 20% y un 60% menos de emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los biocombustibles de primera generación, y hasta un 90% menos que los combustibles fósiles. Estas reducciones en las emisiones provienen principalmente de la utilización de biomasa no alimentaria, como residuos agrícolas y forestales, para la producción de los biocombustibles.

Además de las emisiones, la sostenibilidad de los biocombustibles de segunda generación se relaciona con la gestión responsable de la tierra, el agua y los recursos naturales involucrados en su producción. Es crucial asegurar que la obtención de la biomasa para estos biocombustibles sea realizada de manera sostenible, evitando la deforestación o la degradación del suelo. Asimismo, es importante considerar el impacto en la biodiversidad y garantizar que las prácticas de producción sean ambientalmente amigables y cumplan con los estándares de sostenibilidad requeridos.

La sostenibilidad de los biocombustibles de segunda generación es un enfoque clave para su implementación exitosa y su contribución al logro de objetivos ambientales y energéticos. Se requiere una evaluación integral de los aspectos sociales, económicos y ambientales para asegurar que estos biocombustibles sean una opción realmente sostenible y responsable desde una perspectiva global.

5. Demanda del mercado: La demanda de biocombustibles en el mercado es un factor crítico para su viabilidad económica. La demanda debe ser lo suficientemente alta como para apoyar una producción y venta rentables. La demanda de biocombustibles de segunda generación se estima actualmente en 2,000 millones de galones al año, según el Departamento de Energía estadounidense, en comparación con la demanda de

biocombustibles de primera generación, que se estima en 15,000 millones de galones al año. Sin embargo, se espera que aumente a medida que la tecnología mejore y sea más competitiva en costos.

La viabilidad económica de esta generación de biocombustible (como cualquier combustible) está sujeta a varios factores cambiantes como la variación del costo de producción (que en gran medida depende del costo de la materia prima, del procesamiento y de la demanda del mercado). El costo de la materia prima puede verse influido por las condiciones meteorológicas, plagas y otros factores que afectan al rendimiento de las materias primas. El costo de procesamiento también puede verse influido por la tecnología utilizada y la escala de producción. Así como de la demanda de biocombustibles en el mercado, impulsada por una combinación de mandatos gubernamentales y preferencias de los consumidores por los combustibles renovables. Adicionalmente, la demanda también puede verse afectada por la disponibilidad de combustibles alternativos de bajo costo, como el gas natural y los vehículos eléctricos, así como por cambios en las políticas y normativas gubernamentales.

En términos de viabilidad, los biocombustibles líquidos de segunda generación, como el bioetanol y el biodiesel producidos a partir de biomasa lignocelulósica, pueden ser más viables que los de primera generación debido a su mayor eficiencia y menor impacto ambiental. Estos biocombustibles líquidos se pueden obtener de manera más sostenible utilizando residuos agrícolas y forestales en lugar de cultivos alimentarios, lo que ayuda a minimizar la competencia por el uso de tierras y recursos. Además, las tecnologías de conversión avanzadas, como la hidrólisis enzimática, permiten una mayor eficiencia en la extracción de energía de la biomasa, lo que se traduce en mayores rendimientos y menores emisiones en comparación con los biocombustibles de primera generación (US EPA, 2021). En el caso de los biocombustibles sólidos de segunda generación, como las briquetas de biomasa, también son una opción viable debido a su origen a partir de residuos vegetales compactados. Estas briquetas se pueden obtener a partir de residuos agrícolas, residuos forestales y otros materiales lignocelulósicos no alimentarios, reduciendo así la presión sobre los recursos naturales y evitando la deforestación. Además, las briquetas de biomasa tienen

un alto contenido energético, lo que las convierte en una alternativa sostenible y rentable en comparación con los combustibles fósiles y la leña convencional en términos de eficiencia energética y baja huella de carbono (Plevin et al., 2014).

Asimismo, los biocombustibles gaseosos de segunda generación, como el biogás obtenido a través de la digestión anaeróbica de residuos orgánicos, también son una opción viable. La producción de biogás a partir de residuos agroindustriales y municipales no solo ayuda a reducir la emisión de gases de efecto invernadero, sino que también proporciona una fuente de energía renovable y sostenible. Estos biocombustibles gaseosos pueden ser aprovechados para generar electricidad, calor o como combustible para vehículos, brindando una alternativa más limpia y sostenible en comparación con los combustibles fósiles tradicionales (US EPA, 2021).

Por esto, los biocombustibles de segunda generación tienen el potencial de producir más energía, menos emisiones y ser más sostenibles que los de primera generación, pero a un costo superior.

6. Recomendaciones

Primera Generación.

La viabilidad de los biocombustibles de primera generación es discutible porque estas materias primas comestibles compiten con los cultivos alimentarios, ya que requieren una cierta cantidad de superficie de tierra, fertilizantes y suministro de agua (Paschalidou et al., 2016). Esto conlleva un alto costo de producción y una utilización ineficiente de la energía y los recursos para el cultivo de materias primas. Además, se discute si los biocombustibles contribuyen a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto se debe a que algunos tipos de biocombustibles pueden requerir una mayor cantidad de energía en su producción en comparación con la energía que se obtiene de ellos, lo que resulta en una huella de carbono más alta y mayores emisiones de gases de efecto invernadero durante la fase de producción. No obstante, el mayor debate sigue siendo el de "alimentos versus combustibles".

Las materias primas de los biocombustibles de primera generación se cultivan en monocultivos, lo que significa que sólo se cultiva un tipo de materia prima en el mismo espacio al mismo tiempo. El desmonte de tierras (término que se da a la remoción de la vegetación existente en el derecho de vía, en la zona de los bancos, de canales y en las áreas que se destinen a instalaciones o edificaciones, entre otras, con objeto de eliminar material vegetal, impedir daños a las obras y mejorar la visibilidad y podría o no ser complementado con el trasplante de especies vegetales; Facultad de Ingeniería, UNAM) para el cultivo del monocultivo es una de las principales amenazas para la biodiversidad (Alalwan et al., 2019). El tipo de materia prima también puede ser una especie invasora que podría conducir a la interrupción del ciclo natural del ecosistema (Viesturs & Melece, 2014). Sin embargo, la producción de biocombustibles de primera generación se ha comercializado ampliamente y contribuye a unos 50,000 millones de litros de la producción total de biocombustibles al año (Alalwan et al., 2019).

Debido a la controversia de los biocombustibles de primera generación, se han realizado esfuerzos para utilizar materiales no alimentarios como materia prima (biocombustibles de segunda generación).

El biocombustible de primera generación es una tecnología madura y se utiliza ampliamente (Ayodele et al., 2019). Sin embargo, el uso de materias primas comestibles para la producción de biocombustibles ha generado un serio debate sobre la seguridad alimentaria, el uso de agua, modalidades de consumo/producción sostenibles y la degradación de tierras, y se opone a algunos de los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible). Específicamente, al dos (poner fin al hambre), seis (garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos), doce (garantizar modalidades de consumo y producción sostenible) y quince (gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad) (Naciones Unidas, 2023)

La población mundial actual es de 7,700 millones de personas y se prevé que aumente a 9,700 millones en 2050 (previsión de las Naciones Unidas). La competencia entre materias primas como alimentos y biocombustibles puede provocar un aumento en el precio del mercado. Se predice que el precio de mercado del maíz como fuente de alimento sería de al menos 2.38 dólares por bushel y esto no apoya el primer y segundo ODS, que consisten en reducir la pobreza y el hambre (Haji Esmaeili et al., 2020). Además, a menudo se pasan por alto los impactos medioambientales de la primera generación, como los ya mencionados cambios en el uso de la tierra. El desmonte de tierras para el cultivo de materias primas puede dar lugar a más emisiones de GEI, lo que resulta en la sobreestimación de la reducción de emisiones de GEI (Garlapati et al., 2019). La creciente demanda de biocombustibles de primera generación puede provocar que no se produzcan cambios o que aumenten las emisiones de GEI, así como la destrucción de la biodiversidad, la calidad del suelo y los recursos naturales (Viesturs & Melece, 2014). La intensidad de la emisión de carbono del etanol de maíz es un 44% menor que la de la gasolina de petróleo (Wang et al., 2015). Sin embargo, la intensidad aumenta a un 27% más que la gasolina de petróleo cuando se tiene en cuenta el efecto de los cambios en el uso de la tierra (Pereira et al., 2019). Un informe de Searchinger et al., 2015 afirma que la emisión de GEI para el etanol de maíz se duplica cuando se considera el cambio

de uso de la tierra, lo que lleva a un aumento de GEI durante 167 años durante toda la vida útil del combustible.

Senauer afirmó que el uso agrícola y la aplicación de fertilizantes duplicarán las emisiones en los próximos 30 años, en lugar de la reducción prevista del 20% de las emisiones de GEI procedentes de los biocombustibles. Además, los biocombustibles “1G” (primera generación) como el etanol requieren una gran cantidad de maíz, que a su vez necesita una gran cantidad de agua que oscila entre 5 y 2,138 litros (L) por 1 L de etanol, dependiendo de cómo y dónde se cultive el maíz para etanol (MIT Technology Review, 2009). Esto parece tener consecuencias negativas para el medio ambiente, ya que su consumo de fuentes de agua puede poner esas zonas en riesgo de sequía. La producción de biocombustibles en lugares con escasez de agua pondría aún más a prueba un recurso ya de por sí limitado, sobre todo si el cultivo requiere irrigación. Se prevé que los recursos hídricos y los humedales sufran las consecuencias del aumento del consumo de agua (Convenio sobre la Diversidad Biológica). Chaudhary et al., (2018) examinaron los impactos ecológicos de la producción de etanol en varias partes del mundo. Se demostró que el cultivo de caña de azúcar en Brasil sufre una mayor pérdida de biodiversidad que la producción de remolacha azucarera en Francia y de maíz (grano o rastrojo) en Estados Unidos. La expansión de los biocombustibles 1G ha sido una fuente de tensión social, especialmente en los países en desarrollo, donde la expansión de los biocombustibles se ha producido en ausencia de instalaciones avanzadas para controlarla. Los conflictos comunitarios basados en los biocombustibles suelen estar relacionados con cuestiones de contratos de tierras. Se ha informado que ciudadanos de Tanzania, Mozambique, Ghana, Kenia y Zambia han perdido el acceso a sus tierras compartidas debido al cultivo extensivo de jatropha. Asimismo, los arrendamientos de tierras suelen estar en el centro de las disputas comunitarias relacionadas con los biocombustibles (FOEI). La rápida adopción de la jatropha por parte del gobierno indio y la industria de los biocombustibles amenaza con expulsar a millones de agricultores rurales desfavorecidos de las zonas donde obtienen alimentos, combustible, madera, forraje y leña (Khan et al., 2021). La producción agrícola convencional ya se enfrenta a limitaciones extremas de agua; por lo tanto, la carga regional y local de suministro de agua sería enorme con la implementación a gran escala de biocombustibles 1G. Por esto, los responsables políticos dudarían en centrar

su búsqueda en alternativas de biocombustibles basados en cultivos alimentarios y oleaginosos convencionales (Khan et al., 2021).

En consecuencia, se propuso la segunda generación de biocombustibles para superar estas limitaciones.

Transición a Segunda Generación

La segunda generación de biocombustibles se propuso para superar las limitaciones de la primera. Para la producción de biocombustibles se utilizan materias primas no comestibles como los residuos forestales y la biomasa leñosa. Esto no supone una competencia con los cultivos alimentarios, ya que no requiere una calidad específica de superficie, suministro de agua y fertilizantes para su cultivo. El biocombustible de segunda generación emite menos GEI en comparación con las otras generaciones (Srivastava et al., 2019). Una de las principales ventajas del biocombustible de segunda generación es que no es necesario cultivar la materia prima, ya que se utiliza a partir de biomasa residual (Srivastava et al., 2019). Los residuos de estos cultivos tienen un plazo de cosecha más corto, lo que permite que estén disponibles de forma constante para la producción de biocombustible (Saini et al., 2015). Sin embargo, el costo para la producción de biocombustibles de segunda generación es superior al de los de primera generación, debido al costoso y complicado equipo de procesamiento (Alalwan et al., 2019). La biomasa de segunda generación requiere una cadena de procesos de pretratamiento para recuperar el azúcar fermentable, a diferencia de la primera generación, que puede utilizarse directamente en el proceso de biorrefinería. Debido a las limitaciones de la primera y la segunda generación, se exploró una fuente diferente de materia prima para biocombustibles (tercera generación de biocombustibles basada principalmente en algas y cuarta generación de biocombustibles basada en bacterias).

Los biocombustibles de segunda generación resuelven muchos de los problemas relacionados con los biocombustibles de primera generación. En la actualidad y en todo el mundo se están estudiando diversas estrategias para la producción de biocombustibles de segunda generación, con la finalidad de hacer procesos más sustentables y económicamente viables. Aun así, la atención se centra sobre todo en dos vías distintas, la termoquímica y la biológica,

generadas principalmente a partir de biomasa de celulosa y lignina, excedentes de árboles y cultivos forrajeros estacionales.

Segunda Generación.

La controversia de las materias primas de primera generación con la seguridad alimentaria nos ha obligado a pasar a las materias primas lignocelulósicas de segunda generación como fuente alternativa para la producción de biocombustibles y productos químicos (Rahim et al., 2019). La materia prima lignocelulósica se deriva de productos secos de desechos agrícolas, residuos industriales y forestales a través del proceso de combustión. Se estima que la generación anual de biomasa lignocelulósica procedente de la agricultura y la deforestación es de entre 5 y 8 millones de toneladas al año, lo que es inferior al consumo anual de petróleo crudo tradicional (Mat Aron et al., 2020). Desde una perspectiva sostenible de la producción de biocombustibles y productos químicos, los procesos basados en la lignocelulosa tienen el potencial de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que aporta beneficios a la economía y contribuye a la seguridad energética. La sugerencia de enfoques biotecnológicos en Estados Unidos ha estimado que se pueden producir 1,300 millones de toneladas de biomasa seca al año sin comprometer la seguridad alimentaria (Mat Aron et al., 2020). La Unión Europea a su vez ha iniciado enormes proyectos en la utilización de biocombustibles a base de lignocelulosa como una dirección de cambio de la economía basada en combustibles fósiles a una economía biocircular (Hassan et al., 2019). Este enfoque pretende promover el desarrollo sostenible de la bioenergía.

Recomendación.

Debido a las limitaciones de los biocombustibles de primera y segunda generación, la búsqueda de una materia prima alternativa para la producción de biocombustibles condujo al descubrimiento del potencial de las microalgas y bacterias (3ra y 4ta generación de biocombustibles).

Los biocombustibles de primera y segunda generación no son exclusivamente biológicos ni dependen de materias primas sostenibles desde el punto de vista medioambiental. Además, tanto en el procesamiento de las materias primas como en la síntesis de biocombustibles se

requieren grandes cantidades de energía y agua. A pesar de la popularidad de los biocombustibles de primera generación, adolecen de limitaciones debidas a la alteración de la cadena alimentaria humana y animal, mientras que las materias primas de segunda generación están perdiendo reputación debido al aumento del costo de la síntesis y el procesamiento químico del biodiesel.

Es poco probable que los biocombustibles puedan sustituir completamente a los combustibles fósiles en un futuro próximo. Aunque los biocombustibles tienen el potencial de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y la dependencia de los recursos finitos de combustibles fósiles, todavía hay retos importantes para aumentar la producción y distribución de biocombustibles para satisfacer la demanda actual de energía. Además, la producción de biocombustibles puede tener efectos negativos sobre el uso del suelo, la seguridad alimentaria y los recursos hídricos si no se gestiona con cuidado.

Una estrategia energética global y sostenible que implique una combinación de diferentes fuentes de energía, incluidas las energías renovables, medidas de eficiencia energética y tecnologías de combustibles fósiles más limpias; indica ser el enfoque más lógico para alcanzar un futuro sustentable y sostenible. El desarrollo sustentable implica hacer un uso correcto de los recursos actuales sin comprometer los de las generaciones futuras. Esto significa que los procesos sustentables preservan, protegen y conservan los recursos naturales actuales y futuros (Reyna, A., 2023). Mientras que el desarrollo sostenible es un concepto que se aplicó por primera vez en 1987 en el Informe Brundtland. Refiere a la búsqueda de un avance social y económico que asegure a los seres humanos una vida sana y productiva, pero que no comprometa la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades. A partir de la importancia mundial de los recursos naturales y de la necesidad de su uso racional bajo los principios de Daly, la sostenibilidad busca un desarrollo social que contribuya a mejorar la calidad de vida, salud, educación y cultura de todas las personas (Reyna, A., 2023).

7. Conclusiones

La viabilidad de las distintas generaciones de biocombustibles depende de diversos factores y es objeto de debate permanente en la industria y entre los expertos. Sin embargo, los principales factores que se suelen tener en cuenta son:

Materias primas: Los biocombustibles de 1G suelen producirse a partir de cultivos alimentarios como la caña de azúcar, el maíz y la soja, lo que puede plantear problemas de seguridad alimentaria y competencia por la tierra y los recursos. Los biocombustibles de 2G se producen a partir de cultivos no alimentarios y residuos agrícolas, que a menudo se consideran materias primas más sostenibles.

Balance energético: El balance energético de un biocombustible se refiere a la cantidad de energía que se produce frente a la cantidad de energía que se necesita para producirlo. Los biocombustibles de 2G suelen tener un balance energético más favorable que los de 1G, ya que requieren menos energía para su producción.

Poder calorífico: Los biocombustibles de 2G suelen tener un poder calorífico mayor al de los biocombustibles de 1G, lo que significa que liberan más energía por unidad de combustible (Anexo I y II para consultar poderes caloríficos).

Costo: El costo de producción de los biocombustibles depende de muchos factores, como la disponibilidad de materias primas, la tecnología de producción y el costo de los insumos. En general, los biocombustibles de 2G son más caros de producir que los de 1G, debido a la complejidad del procesamiento de las materias primas.

Con todos estos aspectos en mente, uno podría considerar que la determinación de cuál generación de biocombustibles es más viable puede presentar un desafío. No obstante, los biocombustibles de segunda generación tienden a ser reconocidos como una dirección esperanzadora hacia una producción de biocombustibles más sustentable, en vista de que

poseen el potencial de un balance energético más favorable, menor impacto medioambiental y riesgos atenuados para la seguridad alimentaria.

8. Fuentes de información

- Khan, N.; Sudhakar, K.; Mamat, R. (2021) Role of Biofuels in Energy Transition, Green Economy and Carbon Neutrality. *Sustainability* 2021, 13, 12374. <https://doi.org/10.3390/su132212374>
- IEA (2007) Energy security and climate policy, assessing. Interactions. http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/energy_security_climate_policy.pdf
- IPCC (2007) Climate change 2007: synthesis report. In: Core writing team, Pachauri RK, Reisinger A (eds) Contribution of working groups I, II and III to the fourth
- Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V and Midgley PM (eds) (2013) Cambridge University Press, Cambridge, p 1535
- IPCC (2014) Climate change 2014: synthesis report. In: Core Writing Team, Pachauri RK, Meyer LA (eds) Contribution of working groups i, ii and iii to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. IPCC, Geneva, p 151
- Kumar A (2018a) Alternative biomass from semiarid and arid conditions as a biofuel source: *Calotropis procera* and its genomic characterization. In: Kumar A, Ogita S, Yau YY (eds) Biofuels: greenhouse gas mitigation and global warming next generation biofuels and role of biotechnology. Springer, Heidelberg, pp 241–270
- Kumar A (2018b) Global warming, climate change and greenhouse gas mitigation. In: Kumar A, Ogita S, Yau YY (eds) Biofuels: greenhouse gas mitigation and global warming next generation biofuels and role of biotechnology. Springer, Heidelberg, pp 1–19
- Kumar A, Bhansali S, Gupta N, Sharma M (2019) Bioenergy and climate change: greenhouse gas mitigation. In: Rastegari AA, Yadav AN, Gupta A (eds) Prospects of renewable bioprocessing in future energy systems. Biofuel and biorefinery technologies, vol 10. Springer, Cham, pp 269–290
- Liu, Y., Cruz-Morales, P., Zargar, A., Belcher, M. S., Pang, B., Englund, E., Dan, Q., Yin, K., & Keasling, J. D. (2021). Biofuels for a sustainable future. In *Cell* (Vol. 184, Issue 6, pp. 1636–1647). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2021.01.052>
- Energy Technology Perspectives 2020—Analysis—IEA 2020. Disponible en línea. Recuperado en 8 de diciembre de 2022, de <https://www.iea.org/reports/energy-technologyperspectives-2020>
- Kumar, A. (2020). Climate Change: Challenges to Reduce Global Warming and Role of Biofuels. In *Climate Change, Photosynthesis and Advanced Biofuels* (pp. 13–54). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5228-1_2

- Álvarez Maciel, C. (2018). Producción de etanol como biocombustible a partir de residuos vegetales no alimenticios (Tesis de maestría). Facultad de Ingeniería.
<http://132.248.9.195/ptd2018/mayo/0774300/Index.html>
- RENEWABLES 2020 GLOBAL STATUS REPORT. World Energy Outlook 2019—
Analysis—IEA. World Energy Outlook 2019. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>
- Mendes, F. B., & Bordignon, S. E. (2020). Renewable energy and the role of biofuels in the current world. In *Recent Developments in Bioenergy Research* (pp. 65–84). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819597-0.00003-9>
- Goldemberg, J., 2009. Biomassa e energia. *Quim. Nova* 32,582_587.
<https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000300004>
- Ellabban, O., Abu-Rub, H., Blaabjerg, F., 2014. Renewable energy resources: current status, future prospects and their enabling technology. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 39, 748_764. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.113>
- Energy Technology Perspectives 2020 —Analysis—IEA 2020a. Disponible en línea. Recuperado en 8 de diciembre de 2022, de <https://www.iea.org/reports/energy-technologyperspectives-2020> pp:136-137
- OECD/FAO (2015) Agricultural outlook. <https://doi.org/10.1787/data-00736-en>. Assessed 29 Oct 2022
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Souza GM, Victoria R, Joly C, Verdade L (2015) Bioenergy and sustainability: bridging the gaps. *SCOPE*, Paris, pp 258–300
- Bian G, Deng Z, Liu T (2017) Strategies for terpenoid overproduction and new terpenoid discovery. *Curr Opin Biotechnol* 48:234–241
- US Department of Energy; Alternative fuels data center (2020a). Global ethanol production statistics. <https://afdc.energy.gov/data/10331>.
- 109th US Congress (2005). Energy policy act of 2005.
- International Energy Agency (IEA) (2008) Energy technology perspectives 2008. Organization for Economic Cooperation and Development, IEA, Paris

- Popp, J., Harangi-Rákos, M., Gabnai, Z., Balogh, P., Antal, G., & Bai, A. (2016). Biofuels and Their Co-Products as Livestock Feed: Global Economic and Environmental Implications. *Molecules*, 21(3), 285. <https://doi.org/10.3390/molecules21030285>
- IEA (2021), World Energy Balances: Overview, IEA, Paris
<https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>, License: CC BY 4.0
Recuperado en 30 de octubre de 2022, de <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview/world>
- NASA (2021) Graphic: Carbon dioxide hits new high –. (n.d.). Climate Change: Vital Signs of the Planet. Recuperado en 29 de octubre de 2022, de https://climate.nasa.gov/climate_resources/7/graphic-carbon-dioxide-hits-new-high/
- Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide. (2021.). NOAA Climate.gov.
<https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>
- Sarkar, N., Ghosh, S. K., Bannerjee, S., & Aikat, K. (2012). Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. *Renewable Energy*, 37(1), 19–27.
<https://doi:10.1016/j.renene.2011.06.045>
- Espaux L, Mendez-perez D, Li R, Keasling JD (2015) Science direct synthetic biology for microbial production of lipid-based biofuels. *Curr Opin Chem Biol* 29:58–65.
<https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2015.09.009>
- Kumar A, Ogita S, Yau YY (eds) (2018c) Biofuels: greenhouse gas mitigation and global warming next generation biofuels and role of biotechnology. Springer, Heidelberg, p 432
- Biotechnology Innovation Organization (BIO) (2016). The Renewable Fuel Standard: A Decade’s worth of carbon reductions.
<https://www.bio.org/sites/default/files/legacy/bioorg/docs/RFS%2010%20Year%20GHG%20Reductions.pdf>
- Hirani, A. H., Javed, N., Asif, M., Basu, S. K. & Kumar, A. (2018). A Review on First- and Second-Generation Biofuel Productions. *Biofuels: Greenhouse Gas Mitigation and Global Warming*, 141-154. https://doi.org/10.1007/978-81-322-3763-1_8
- Cushing, OK WTI Spot Price FOB. (2022, November). U.S. Energy Information Administration. <https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=pet>
- Europe Brent Spot Price FOB. (2022, November). U.S. Energy Information Administration. <https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/rbrteD.htm>
- 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>

- Kulkarni M, Gopinath R, Meher LC, Dalai AK. (2006). Solid acid catalyzed biodiesel production by simultaneous esterification and transesterification. *Green Chem* 2006;8:1056–62.
- Shapouri H, Duffield JA, Graboski MS. (1995). Estimating the net energy balance of corn ethanol, U. S. Department of Agriculture, Agricultural Economic Report Number 721.
- Sanders J, Scott E, Weusthuis R, Mooiboek H. (2007). Bio-refinery as the bio-inspired process to bulk chemicals. *Macromol Biosci* 105–17.
- Dien BS, O'Bryan PJ, Hector RE, Iten LB, Mitchell RB, Qureshi N, Sarath G, Vogel KP, Cotta MA (2013) Conversion of switchgrass to ethanol using dilute ammonium hydroxide pretreatment: influence of ecotype and harvest maturity. *Environ Technol* 34:1837–1848. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.833640>
- Jørgensen U (2011) Benefits versus risks of growing biofuel crops: the case of Miscanthus. *Curr Opin Environ Sustain* 3:24–30. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2010.12.003>
- Brosse N, Dufour A, Meng X, Sun Q, Ragauskas A (2012) Miscanthus: a fast-growing crop for biofuels and chemicals production. *Biofuels Bioprod Biorefin* 6:580–598. <https://doi.org/10.1002/bbb.1353>
- Faba, L., Díaz, E., & Ordóñez, S. (2014). Transformación de biomasa en biocombustibles de segunda generación. *Madera y bosques*, 20(3), 11-24. Recuperado en 19 de noviembre de 2022, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712014000300002&lng=es&tlng=es.
- Clark, J. H., Budarin, V., Deswarte, F. E. I., Hardy, J. J. E., Kerton, F. M., Hunt, A. J., ... Wilson, A. J. (2006). Green chemistry and the biorefinery: a partnership for a sustainable future. *Green Chemistry*, 8(10), 853-60. [doi:10.1039/b604483m](https://doi.org/10.1039/b604483m)
- Deswarte, F. E. I., Clark, J. H., Wilson, A. J., Hardy, J. J. E., Marriott, R., Chahal, S. P., ... Whiteley, G. (2007). Toward an integrated straw-based biorefinery. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 1(4), 245–254. [doi:10.1002/bbb.32](https://doi.org/10.1002/bbb.32)
- Mat Aron, N. S., Khoo, K. S., Chew, K. W., Show, P. L., Chen, W., & Nguyen, T. H. P. (2020). Sustainability of the four generations of biofuels – A review. *International Journal of Energy Research*. [doi:10.1002/er.5557](https://doi.org/10.1002/er.5557)
- Hossain, Z., Johnson, E. N., Wang, L., Blackshaw, R. E., Cutforth, H., & Gan, Y. (2019). Plant establishment, yield and yield components of Brassicaceae oilseeds as potential biofuel feedstock. *Industrial Crops and Products*, 141, 111800. [doi:10.1016/j.indcrop.2019.111800](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111800)

- Srivastava, N., Kharwar, R. K., & Mishra, P. K. (2019). Cost Economy Analysis of Biomass-Based Biofuel Production. *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*, 1–10. [doi:10.1016/b978-0-444-64223-3.00001-1](https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64223-3.00001-1)
- Paschalidou, A., Tsatiris, M., & Kitikidou, K. (2016). Energy crops for biofuel production or for food? - SWOT analysis (case study: Greece). *Renewable Energy*, 93, 636–647. [doi:10.1016/j.renene.2016.03.040](https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.040)
- Halder, P., Azad, K., Shah, S., & Sarker, E. (2019). Prospects and technological advancement of cellulosic bioethanol ecofuel production. *Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment*, 211–236. [doi:10.1016/b978-0-08-102728-8.00008-5](https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102728-8.00008-5)
- Cheroennet, N., & Suwanmanee, U. (2017). Net Energy Gain and Water Footprint of Corn Ethanol Production in Thailand. *Energy Procedia*, 118, 15–20. [doi:10.1016/j.egypro.2017.07.003](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.003)
- Queensland; C. O. S. O. (2013, December 18). Soil acidification. *Environment, Land and Water | Queensland Government*. <https://www.qld.gov.au/environment/land/management/soil/soil-health/acidification>
- Borzecka-Walker M, Faber A, Pudelko R, Kozyra J, Syp A, Borek R. (2011) Life cycle assessment (LCA) of crops for energy production. *J Food, Agric Environ*. 9(3-4):698-700.
- What is eutrophication? (n.d.). National Oceanic and Atmospheric Administration <https://oceanservice.noaa.gov/facts/eutrophication.html>
- Chia, S. R., Ong, H. C., Chew, K. W., Show, P. L., Phang, S.-M., Ling, T. C., ... Chang, J.-S. (2018). Sustainable approaches for algae utilisation in bioenergy production. *Renewable Energy*, 129, 838–852. [doi:10.1016/j.renene.2017.04.001](https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.001)
- Buturca R, Gasol CM, Gabarrell X, Scarpete D. (2013) Comparative life cycle assessment of rapeseed oil and biodiesel from winter rape produced in Romania. *World Acad Sci Eng Technol*. 80(8):865-870.
- Viesturs D, Melece L. (2014) Advantages and disadvantages of biofuels: observations in Latvia. *Eng Rural Dev*. 13: 210-215.
- Dias De Oliveira ME, VB E, Rykiel EJ. (2005) Ethanol as fuel: energy, carbon dioxide balances, and ecological footprint. *Bioscience*.55(7):593. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2005\)055\[0593:eafecd\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2005)055[0593:eafecd]2.0.co;2).
- Cai H, Dunn JB, Wang Z, Han J, Wang MQ. (2013) Life-cycle energy use and greenhouse gas emissions of production of bioethanol from sorghum in the United States. *Biotechnol Biofuels*. 6 (1):1-15. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-6-141>.

- Garlapati VK, Tewari S, Ganguly R. (2019) Life Cycle Assessment of First-, Second-Generation, and Microalgae Biofuels. United Kingdom: Woodhead Publishing; 355–371. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817937-6.00019-9>
- Bicalho T, Sauer I, Patiño-Echeverri D. (2019) Quality of data for estimating GHG emissions in biofuel regulations is unknown: a review of default values related to sugarcane and corn ethanol. *J Clean Prod.* 239:117903. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117903>.
- Wang M, Han J, Dunn JB, Cai H, Elgowainy A. (2015) Well-to-wheels energy use and greenhouse gas emissions of ethanol from corn, sugarcane and cellulosic biomass for US use. *Efficient Sustainable Biofuel Production and Environmental Land-Use Research.* 7:249-280. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/045905>.
- Pereira, L. G., Cavalett, O., Bonomi, A., Zhang, Y., Warner, E., & Chum, H. L. (2019). Comparison of biofuel life-cycle GHG emissions assessment tools: The case studies of ethanol produced from sugarcane, corn, and wheat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110, 1–12. [doi:10.1016/j.rser.2019.04.043](https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.043)
- O'Connell A, Kousoulidou M, Lonza L, Weindorf W. (2019) Considerations on GHG emissions and energy balances of promising aviation biofuel pathways. *Renewable Sustainable Energy*; 101:504-515. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.033>.
- Carmo, J. B. do, Filoso, S., Zotelli, L. C., de Sousa Neto, E. R., Pitombo, L. M., Duarte-Neto, P. J., Vargas V. P., Andrade C. A., Gava G. J. C., Rossetto R., Cantarella H., Neto A. E., Martinelli, L. A. (2013) Infield greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Brazil: effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation. *GCB Bioenergy.* 5(3):267-280. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2012.01199.x>.
- Crutzen PJ, Mosier AR, Smith KA, Winiwarter W. (2008) N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmos Chem Phys.* 8 (2):389-395. <https://doi.org/10.5194/acp-8-389-2008>.
- Sanz Requena, J. F., Guimaraes, A. C., Quirós Alpera, S., Relea Gangas, E., Hernandez-Navarro, S., Navas Gracia, L. M., Martin-Gil, J., Fresneda Cuesta, H. (2011) Life cycle assessment (LCA) of the biofuel production process from sunflower oil, rapeseed oil and soybean oil. *Fuel Process Technol.* 92(2):190-199. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.03.004>.
- Jung A., Dörrenberg P., Rauch A., Thöne M. (2010) Biofuels – At what cost? Government Support for Ethanol and Biodiesel in the European Union – 2010 Update; 2010.
- Koplow D. (2007) Biofuels - At what cost? Government Support for Ethanol and Biodiesel in the European Union; Recuperado en 14 de enero de 2022, de http://www.globalsubsidies.org/files/assets/Final_Malaysia_2.pdf

- Grafton RQ, Kompas T, Van Long N, To H. (2014) US biofuels subsidies and CO2 emissions: an empirical test for a weak and a strong green paradox. *Energy Policy*. 68:550-555. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.11.006>.
- Börjesson P, Tufvesson LM. (2011) Agricultural crop-based biofuels - resource efficiency and environmental performance including direct land use changes. *J Clean Prod*. 19(2-3):108-120. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.01.001>.
- Edwards R, Mahieu V, Griesemann JC, Larivé JF, Rickeard DJ. (2019) Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context. <https://doi.org/10.4271/2004-01-1924>
- Unnasch S, Pont J. (2007) Full fuel cycle assessment well to tank energy inputs, emissions, and water impacts; <https://doi.org/10.1254/jphs.FPE04001X>
- Khoo, K. S., Lee, S. Y., Ooi, C. W., Fu, X., Miao, X., Ling, T. C., & Show, P. L. (2019) Recent advances in biorefinery of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis*. *Bioresour Technol*. 288:121606. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121606>.
- Environmental and Energy Study Institute (EESI). Energy Efficiency|EESI. Recuperado en 14 de enero de 2023, de <https://www.eesi.org/topics/energy-efficiency/description>
- Mat Aron, N. S., Khoo, K. S., Chew, K. W., Show, P. L., Chen, W., & Nguyen, T. H. P. (2020). Sustainability of the four generations of biofuels – A review. *International Journal of Energy Research*. [doi:10.1002/er.5557](https://doi.org/10.1002/er.5557)
- Cardona CA, Quintero JA, Paz IC. (2010) Production of bioethanol from sugarcane bagasse: status and perspectives. *Bioresour Technol*. 101(13):4754-4766. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.097>.
- Sánchez ÓJ, Cardona CA. (2008) Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. *Bioresour Technol*. 99(13):5270-5295. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.11.013>.
- da Silva ARG, Torres Ortega CE, Rong BG. (2016) Techno-economic analysis of different pretreatment processes for lignocellulosic-based bioethanol production. *Bioresour Technol*. 218:561-570. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.007>.
- Zhang H, Zhang P, Ye J. (2018) Comparison of various pretreatments for ethanol production enhancement from solid residue after rumen fluid digestion of rice straw. *Bioresour Technol*. 247:147-156. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.065>.
- Rooni V, Raud M, Kikas T. (2017) The freezing pre-treatment of lignocellulosic material: a cheap alternative for Nordic countries. *Energy*. 139:1-7. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.146>.

- Nikolic S, Mojovic L, Rakin M, Pejin D, Pejin J. (2011) Utilization of microwave and ultrasound pretreatments in the production of bioethanol from corn. *Clean Technol Environ Policy*. 13 (4):587-594. <https://doi.org/10.1007/s10098-011-0366-0>.
- Cardona E, Llano B, Peñuela M, Peña J, Rios LA. (2018) Liquid-hotwater pretreatment of palm-oil residues for ethanol production: an economic approach to the selection of the processing conditions. *Energy*. 160:441-451. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.045>.
- Arora A, Priya S, Sharma P, Sharma S, Nain L. (2016) Evaluating biological pretreatment as a feasible methodology for ethanol production from paddy straw. *Biocatal Agric Biotechnol*. 8:66-72. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2016.08.006>.
- Wu XF, Yin SS, Zhou Q, Li MF, Peng F, Xiao X. (2019) Subcritical liquefaction of lignocellulose for the production of bio-oils in ethanol/water system. *Renewable Energy*. 136:865-872. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.041>.
- Zabed H, Sahu JN, Boyce AN, Faruq G. (2016) Fuel ethanol production from lignocellulosic biomass: an overview on feedstocks and technological approaches. *Renewable Sustainable Energy Rev*.66:751-774. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.038>.
- Raja Sathendra E, Baskar G, Praveenkumar R, Gnansounou E. (2019) Bioethanol production from palm wood using *Trichoderma reesei* and *Kluveromyces marxianus*. *Bioresour Technol*. 345-352. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.134>.
- Walter A, Ensinas AV. (2010) Combined production of second generation biofuels and electricity from sugarcane residues. *Energy*. 35(2):874-879. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.07.032>.
- Petersen AM, Melamu R, Knoetze JH, Görgens JF. (2015) Comparison of second-generation processes for the conversion of sugarcane bagasse to liquid biofuels in terms of energy efficiency, pinch point analysis and life cycle analysis. *Energy Convers Manage*. 91:292-301. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.002>.
- Anex RP, Aden A, Kazi FK. (2010) Techno-economic comparison of biomass-to-transportation fuels via pyrolysis, gasification, and biochemical pathways. *Fuel*. 89(Suppl 1): S29–S35. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.07.015>.
- Gnansounou E. (2010) Production and use of lignocellulosic bioethanol in Europe: current situation and perspectives. *Bioresour Technol*. 101(13):4842-4850. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.002>.
- Gabrielle B, Gagnaire N. (2008) Life-cycle assessment of straw use in bio-ethanol production: a case study based on biophysical modelling. *Biomass Bioenergy*. 32(5):431-441. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.10.017>.

- Shafie SM, Mahlia TMI, Masjuki HH. (2013) Life cycle assessment of rice straw co-firing with coal power generation in Malaysia. *Energy*. 57:284-294.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.002>.
- Mann M, Spath P. (2001) A life cycle assessment of biomass cofiring in a coal-fired power plant. *Clean Prod Process*. 3(2):81- 91. <https://doi.org/10.1007/s100980100109>.
- Sebastián F, Royo J, Gómez M. (2011) Cofiring versus biomass-fired power plants: GHG (greenhouse gases) emissions savings comparison by means of LCA (life cycle assessment) methodology. *Energy*. 36(4):2029-2037.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.06.003>.
- Kauffman N, Hayes D, Brown R. (2011) A life cycle assessment of advanced biofuel production from a hectare of corn. *Fuel*. 90(11):3306-3314.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.06.031>.
- Han J, Elgowainy A, Dunn JB, Wang MQ. (2013) Life cycle analysis of fuel production from fast pyrolysis of biomass. *Bioresour Technol*. 133:421-428.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.141>.
- Iribarren D, Peters JF, Dufour J. (2012) Life cycle assessment of transportation fuels from biomass pyrolysis. *Fuel*. 97: 812-821. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.02.053>.
- Hsu DD. (2012) Life cycle assessment of gasoline and diesel produced via fast pyrolysis and hydroprocessing. *Biomass Bioenergy*. 45:41-47.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.05.019>.
- Guest G, Bright RM, Cherubini F, Michelsen O, Strømman AH. (2011) Life cycle assessment of biomass-based combined heat and power plants: centralized versus decentralized deployment strategies. *J Ind Ecol*. 15(6):908-921.
<https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00375.x>.
- Kimming, M., Sundberg, C., Nordberg, Å., Baky, A., Bernesson, S., Norén, O., & Hansson, P.-A. (2011) Biomass from agriculture in small-scale combined heat and power plants – a comparative life cycle assessment. *Biomass Bioenergy*. 35 (4):1572-1581.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.027>.
- Solli C, Reenaas M, Strømman AH, Hertwich EG. (2009) Life cycle assessment of wood-based heating in Norway. *Int J Life Cycle Assess*. 14(6):517-528.
<https://doi.org/10.1007/s11367-009-0086-4>.
- Shafie SM, Mahlia TMI, Masjuki HH, Rismanchi B. (2012) Life cycle assessment (LCA) of electricity generation from rice husk in Malaysia. *Energy Procedia*. 14:499-504.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.965>.

- Thakur A, Canter CE, Kumar A. (2014) Life-cycle energy and emission analysis of power generation from forest biomass. *Appl Energy*. 128:246-253.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.085>.
- Bhatia, S. K., Jagtap, S. S., Bedekar, A. A., Bhatia, R. K., Patel, A. K., Pant, D., Rajesh Banu J., Rao C. V., Kim Y.-G., Yang, Y.-H. (2020) Recent developments in pretreatment technologies on lignocellulosic biomass: effect of key parameters, technological improvements, and challenges. *Bioresour Technol*. 300:122724.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122724>.
- Sankaran, R., Andres Parra Cruz, R., Pakalapati, H., Loke Show, P., Chuan Ling, T., Wei-Hsin, C., & Tao, Y. (2020) Recent advances in the pretreatment of microalgal and lignocellulosic biomass: a comprehensive review. *Bioresour Technol*. 298:122476.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122476>.
- Ali N, Zhang Q, Liu ZY, Li FL, Lu M, Fang XC. (2020) Emerging technologies for the pretreatment of lignocellulosic materials for bio-based products. *Appl Microbiol Biotechnol*. 104(2): 455-473. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-10158-w>.
- Carriquiry MA, Du X, Timilsina GR. (2011) Second generation biofuels: economics and policies. *Energy Policy*. 39(7): 4222-4234.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.04.036>.
- Balan V. (2014) Current challenges in commercially producing biofuels from Lignocellulosic biomass. *ISRN Biotechnol*. 2014(i):1-31.
<https://doi.org/10.1155/2014/463074>.
- Levidow L, Carr S. (2009) *GM Food on Trial: Testing European Democracy*; Routledge Taylor & Francis Group: Abingdon-on-Thames, UK
<https://doi.org/10.4324/9780203866696>
- Mohr, A.; Raman, S. (2015) Lessons from first generation biofuels and implications for the sustainability appraisal of second generation biofuels. *Effic Sustain. Biofuel Prod. Env. Land-Use Res*. 63, 281–310.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.08.033>
- Havlík, P.; Schneider, U.A.; Schmid, E.; Böttcher, H.; Fritz, S.; Skalský, R. (2011) Global land-use implications of first and second generation biofuel targets. *Energy Policy* 39, 5690–5702.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.03.030>
- Powlson, D.S.; Riche, A.B.; Coleman, K.; Glendining, M.J.; Whitmore, A.P. (2008) Carbon sequestration in European soils through straw incorporation: Limitations and alternatives. *Waste Manag*. 28, 741–746.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.024>

- Riffell, S.; Verschuyf, J.; Miller, D.; Wigley, T.B. (2011) Biofuel harvests, coarse woody debris, and biodiversity—A meta-analysis. *Ecol. Manag.* 261, 878–887. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.12.021>
- Victorsson, J.; Jonsell, M. (2013) Ecological traps and habitat loss, stump extraction and its effects on saproxylic beetles. *Ecol. Manag.* 290, 22–29. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.06.057>
- Kazi, F.K.; Fortman, J.A.; Anex, R.P.; Hsu, D.D.; Aden, A.; Dutta, A.; Kothandaraman, G. (2010) Techno-economic comparison of process technologies for biochemical ethanol production from corn stover. *Fuel* 89, S20–S28. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.01.001>
- Zhu, J.; Pan, X.J. (2010) Woody biomass pretreatment for cellulosic ethanol production: Technology and energy consumption evaluation. *Bioresour. Technol.* 101, 4992–5002. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.007>
- Yamakawa, C.K.; Qin, F.; Mussatto, S.I. (2018) Advances and opportunities in biomass conversion technologies and biorefineries for the development of a bio-based economy. *Biomass Bioenergy* 119, 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.09.007>
- Carriquiry, M.A.; Du, X.; Timilsina, G.R. (2011) Second generation biofuels: Economics and policies. *Energy Policy* 39, 4222–4234. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.04.036>
- Ministério de Minas e Energia & Brasil Governo Federal. (2021). BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. Empresa De Pesquisa Energética. Recuperado en 6 de febrero de 2023, de <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>
- Dimic-Misic, Katarina & Barcelo, Ernest & Spasojević-Brkić, Vesna & Gane, Patrick. (2019). Identifying the challenges of implementing a European bioeconomy based on forest resources: Reality demands circularity. *FME Transactions.* 47. 60-69. <https://doi.org/10.5937/fmet1901060D>.
- Laible, P. D., & Snyder, S. W. (2011, December 15). ENGINEERED PHOTOSYNTHETIC BACTERIA, METHOD OF MANUFACTURE OF BOFUELS.
- Alalwan HA, Alminshid AH, Aljaafari HAS. (2019) Promising evolution of biofuel generations. Subject review. *Renewable Energy Focus.* 28:127-139. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2018.12.006>.

- Saini JK, Saini R, Tewari L. (2015) Lignocellulosic agriculture wastes as biomass feedstocks for second-generation bioethanol production: concepts and recent developments. *3. Biotech.* 5 (4):337-353. <https://doi.org/10.1007/s13205-014-0246-5>.
- Ayodele BV, Alsaffar MA, Mustapa SI. (2019) An overview of integration opportunities for sustainable bioethanol production from first- and second-generation sugar-based feedstocks. *J Clean Prod.* 245:118857. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118857>.
- The United Nations. Population Forecast | United Nations.
- Haji Esmaeili SA, Szmerekovsky J, Sobhani A, Dybing A, Peterson TO. (2020) Sustainable biomass supply chain network design with biomass switching incentives for first-generation bioethanol producers. *Energy Policy.* 138:111222. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111222>.
- Rahim AHA, Khoo KS, Yunus NM, Hamzah WSW. (2019) Etherfunctionalized ionic liquids as solvent for *Gigantochloa scortechini* dissolution. *AIP Conf Proc.* 2157:020025-1–020025-6. <https://doi.org/10.1063/1.5126560>.
- Stark A. (2011) Ionic liquids in the biorefinery: a critical assessment of their potential. *Energy Environ Sci.* 4(1):19-32. <https://doi.org/10.1039/c0ee00246a>.
- Perlack R. (2005) Biomass as Feedstock for a Bioenergy and Bioproducts Industry: the Technical Feasibility of a Billion-Ton Annual Supply. United States: Oak Ridge National Laboratory.
- Hassan SS, Williams GA, Jaiswal AK. (2019) Erratum: Lignocellulosic Biorefineries in Europe: Current State and Prospects. *Trends Biotechnol.* 37(7):789. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2019.03.001>.
- Cheah, W. Y., Sankaran, R., Show, P. L., Tg. Ibrahim, T. N. B., Chew, K. W., Culaba, A., & Chang, J. (2020) Pretreatment methods for lignocellulosic biofuels production: current advances, challenges and future prospects. *Biofuel Res J.* 7(1):1115-1127. <https://doi.org/10.18331/brj2020.7.1.4>.
- Atabani, A. E., Silitonga, A. S., Ong, H. C., Mahlia, T. M. I., Masjuki, H. H., Badruddin, I. A., & Fayaz, H. (2012). Non-edible vegetable oils: A critical evaluation of oil extraction, fatty acid compositions, biodiesel production, characteristics, engine performance and emissions production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 211-245.
- Magdouli, S., Monlau, F., Tremier, A., & Trably, E. (2017). The fate of antibiotic resistance genes and class 1 integrons following the application of swine and dairy manure to soils. *Journal of Hazardous Materials*, 323, 17-24.

- Klein-Marcuschamer D, Oleskowicz-Popiel P, Simmons BA, Blanch HW. (2012) The challenge of enzyme cost in the production of lignocellulosic biofuels. *Biotechnol Bioeng.* 109(4): 1083-1087. <https://doi.org/10.1002/bit.24370>.
- Kim Y, Ximenes E, Mosier NS, Ladisch MR. (2011) Soluble inhibitors/deactivators of cellulase enzymes from lignocellulosic biomass. *Enzyme Microb Technol.* 48(4-5):408-415. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2011.01.007>.
- Li, C., Cheng, G., Balan, V., Kent, M. S., Ong, M., Chundawat, S. P. S., daCosta Sousa L., Melnichenko Y. B., Dale B. E., Simmons B. A., Singh, S. (2011) Influence of physico-chemical changes on enzymatic digestibility of ionic liquid and AFEX pretreated corn Stover. *Bioresour Technol.* 102(13):6928- 6936. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.04.005>.
- Senauer, B. (2008) Food Market Effects of a Global Resource Shift Toward Bioenergy. *Am. J. Agric. Econ.* 90, 1226–1232. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8276.2008.01208.x>
- Measuring Corn Ethanol’s Thirst for Water|MIT Technology Review n.d. Disponible en línea. Recuperado en 8 de diciembre de 2022, de <https://www.technologyreview.com/2009/04/14/267119/measuring-corn-ethanols-thirst-for-water/>
- Convention on Biological Diversity. Implications of Biofuels on Water Resources n.d. Disponible en línea. Recuperado en 8 de diciembre de 2022, de <https://www.cbd.int/doc/biofuel/BioiversityIWMI-Report-Biofuels.pdf>
- Chaudhary, A.; Brooks, T.M. (2018) Land Use Intensity-Specific Global Characterization Factors to Assess Product Biodiversity Footprints. *Env. Sci. Technol.* 52, 5094–5104. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05570>
- Friends of the Earth International (FOEI). *Jatropha: Money Doesn’t Grow on Trees.* 2010. Disponible en línea. Recuperado en 8 de diciembre de 2022, de <https://www.foei.org/resources/publications/publications-by-subject/economic-justice-resisting-neoliberalism-publications/jatropha-money-doesnt-grow-on-trees>
- Agoramoorthy, G.; Hsu, M.J.; Chaudhary, S.; Shieh, P.C. (2009) Can biofuel crops alleviate tribal poverty in India’s drylands? *Appl. Energy* 86, S118–S124. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.04.008>
- De Fraiture, C.; Giordano, M.; Liao, Y. (2008) Biofuels and implications for agricultural water use: Blue impacts of green energy. *Water Policy* 10, 67–81. <https://doi.org/10.2166/wp.2008.054>
- E4tech. (2022). E4tech Knowledge - Biofuels. Recuperado en 8 de diciembre de 2022, de <https://www.e4tech.com/resources.php?filter=tag%3ABiofuels>

- Facultad de Ingeniería, UNAM. (n.d.). Descripción de las actividades que integran el procedimiento de construcción de una obra de terracerías. Facultad De Ingeniería, UNAM. Recuperado en 6 de febrero de 2023, de https://www.ingenieria.unam.mx/luisr/licenciatura_ic/1608_mt/1608_material/2.1_desmonte.pdf
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. (2011). Tipos de biocombustibles. Recuperado en 30 de julio de 2023, de <https://www.usda.gov/es/biocombustibles/tipos-de-biocombustibles>
- Kaveh Rajab Khalilpour, & Zendehboudi, Sohrab. (2019). Handbook of Biofuels Production: Processes and Technologies. Elsevier Sciences.
- Carrilho, E. N. V. M., Labuto, G., & Kamogawa, M. Y. (2016). Destination of Vinasse, a Residue From Alcohol Industry. *Environmental Materials and Waste*, 21–43. <https://doi:10.1016/b978-0-12-803837-6.00002-0>
- The National Biodiesel Board. (n.d). Glycerin Management. Recuperado en 9 de julio de 2023, de <https://www.biodiesel.org/using-biodiesel/glycerin-management>
- Environment Agency. (2011). Biogas and Biogas Upgrading. Recuperado en 9 de julio de 2023, de <https://www.environmentagency.gov.uk/>
- Benavente, D. P., Fernández-González, E. M., & Rodríguez, G. (2016). Potential alternative uses for sludge produced in the bioenergy and biofuels sectors. *Fuel*, 184, 780–791. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.06.009>
- Palmero-Marrero, A. I., Molina-Grima, E., Orive, I., & García-González, M. C. (2019). High yield bioethanol production from undiluted whole microalgae by direct cellulose hydrolysis. *Algal Research*, 42, 101570. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101570>
- Gnansounou, E., & Dauriat, A. (2010). *Biorefineries and Chemical Processes: Design, Integration and Sustainability Analysis*. Wiley.
- Couch, R., & Margonelli, L. (2013). *The Energy Issue: What Everyone Needs to Know*. Oxford University Press.
- Wang, M., Huo, H., Arora, S., & Wu, M. (2007). Life-cycle assessment of energy and greenhouse gas effects of soybean-derived biodiesel and renewable fuels. *Environmental science & technology*, 41(21), 7554-7560. <https://doi:10.1021/es0716170>
- Serna-Loaiza, S., Petit-Ramel, M., & Anzola-Romero, J. (2016). Fermentación alcohólica para la obtención de bioetanol a partir de los residuos de la cosecha de papa (*Solanum tuberosum* L.).

- Chen, W., Hu, T., Zhang, Z., & Huang, L. (2017). Lignocellulosic Biorefinery of Degraded Sugarcane Wastes in Traditional Sugar Producing Regions: An Economic Perspective. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 5, 56.
- Iswanto, A. H. (2015). Techno-economic analysis of bioethanol production from sugar cane bagasse using a novel energy integration scheme. *Industrial Crops and Products*, 74, 441-451.
- Maghsoudi, S. (Ed.). (2018). *Vinasse: Characterization, Treatment Technologies and Environmental Impacts*. CRC Press.
- Pradeep, G., Kailappan, R., Saravanan, P., Karthick, R., Gobalakrishnan, N., & Nagendran, R. (2017). Utilization of Distillery Effluent Waste by Vermicomposting with the Earthworm *Eisenia fetida*. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 8(4), 1741-1747.
- Rosala, A. D., Suryawirawan, E., & Rinaldi, R. (2019). Bioethanol Production Process from Sugarcane Bagasse Using Anaerobic Digestion and Biogas Reforming: A Process Simulation Study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 509, 012031.
- Calero, J., Aracil, J., & Martínez, F. (2016). Waste management of glycerol and residues from biodiesel industry: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 594-605.
- González-García, S., Organista, J., Fierro, V., & Rojas, J. (2019). Production of clay-based additives using waste cooking oil and their potential use in agricultural engineering. *Chemical Engineering Transactions*, 74, 895-900.
- Hu, S., Ye, J., Yuan, X., & Wang, Y. (2018). Purification technology of glycerol obtained by biodiesel production. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 95(9), 1035-1049.
- Wu, H., Manique, D., Carvalho, J., Portela, C., & Magalhães, F. (2016). A review on waste to energy processes using transesterification and supercritical transesterification of lipids and their esters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 750-771.
- Bello, A., Cunha-Queda, C., Quina, M. J., & Quinta-Ferreira, R. M. (2019). Valorization of Biomass Fly Ash from Fluidized Bed Gasification: Environmental Impact and Potential Use in Civil Engineering Applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(3), 103056.
- EBA (2019). *Digestate handling guidelines*. European Biogas Association.
- Pestana, M., Alves, M., Lopes, D., & Matias, J. (2012). Upgrading biogas to biomethane: preliminary evaluation of the Portuguese sewage-treatment plants. *Journal of Environmental Management*, 95, S142-S147.

- Soares, F., Skrede, A., & Hoff, B. H. (2018). Biogas Residues: Challenges and Perspectives for Agro-industrial Application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 12(1), 104-122.
- Lora, E., Rosa, F., & Pérez, O. (2015). Current status and trends of anaerobic digestion in Europe and beyond. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 268-280
- Alvira, P., Tomás-Pejó, E., Ballesteros, M., & Negro, M. J. (2010). Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. *Bioresource Technology*, 101(13), 4851-4861.
- Kumar, S., Bhattacharya, S., & Bhattacharya, S. (2018). Waste to wealth: Utilisation of biomass residues for sustainable energy production in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1333-1351.
- Zabed, H. M., Nobuaki, H., Faruq, G., & Sahu, J. N. (2016). Bioethanol Production from Renewable Sources: Current perspectives and technological advancements. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 751-764.
- Baral, N. R., Shah, A., AbuSaleh, A., Koju, A. P., & Shah, Y. (2019). Advances in the Progress of Hemicellulosic Ethanol: Microorganisms, Metabolic Engineering, and Perspectives on Prospects. *BioMed Research International*, 2019, 3658136.
- Haupt, F., Peters, J., & Nielsen, P. H. (2012). Biomass for energy and industrial products: The road from niche to necessity. *Waste Management*, 32(4), 790-796.
- Carriquiry, D., Knocke, W. R., Kumar, A., Chen, M., & Moreira, R. F. (2018). A Review of Solid-Phase Media and Their Applications in Biodiesel Production. *Current Pollution Reports*, 4(4), 341-349.
- Konda, M., Prakasham, R. S., Hema Kumar, C. V., & Mohan Krishna, G. (2014). A comprehensive review on the applications of ligninolytic enzymes for efficient decolorization of synthetic dyes. *Review Environmental Science and Bio/Technology*, 13(2), 215-278.
- Kumar, A., Sharma, S., Yadav, A. N., & Saxena, A. K. (2017). Recent Advances in Production of Value Added Chemicals, polymers and Therapeutics Against Microbial Pathogens From Renewable Resources: A Review. *Energy, Ecology, and Environment*, 2(6), 379-400.
- Lam, M. K., Gan, S., & Chew, K. W. (2019). A quantitative review of current trends in biodiesel production from microbial lipid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 223-239.
- Stoklosa, R. J., Latimer, V. M., & Regan, J. M. (2017). Harnessing lignin for anaerobic bioproduction of fuels and chemicals. *Current Opinion in Biotechnology*, 45, 120-126.

- Strapac, C., Dayton, D., Gerber, V., Hill, R., Liu, P., & Aden, A. (2017). Anaerobic co-digestion of municipal biomass waste: characterization, performance assessment, and optimization for renewable biogas production. *Environmental Science & Technology*, 51(13), 7485-7493.
- Amon, T., Moates, G., & Bannister, M. (2017). Biogas Production: Current State and Perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 101(13), 5215-5223.
- Astals, S., Peces, M., Mata-Alvarez, J., & Mace, S. (2014). Anaerobic Co-Digestion of Pig Manure and Crude Glycerol at Different Organic Loading Rates. *Waste Management*, 34(1), 111-117.
- Gómez, N., Leiva-Aravena, E., Bustamante, M., & Rebolledo, R. (2019). Potential and Opportunities for Anaerobic Digestion of Plant Biomass in Chile. *Energies*, 12(22), 4360.
- Budzinski, M., Grala, A., Thomsen, T., & Nielsen, H. P. (2011). Lignin in straw and its applications as an adhesive. *Biomass and Bioenergy*, 35(3), 1182-1187.
- Mood, S. H., Golfeshan, A. H., Tabatabaei, M., Jouzani, G. S., Najafi, G. H., Gholami, M., & Ardjmand, M. (2013). Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 77-93.
- Bradamante, R., Armani, A., Sartori, L., & Panighel, A. (2015). Production of ethanol and other biofuels from lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 196, 102-109.
- Ragauskas, A. J., Beckham, G. T., Biddy, M. J., Chandra, R., Chen, F., Davis, M. F., ... & Wyman, C. E. (2014). Lignin valorization: improving lignin processing in the biorefinery. *Science*, 344(6185), 1246843.
- Cao, M., Song, Y., Gong, M., Xu, Y., & Zhao, Y. (2017). Review on the utilization of fly ash for the production of red mud free geopolymer. *Minerals Engineering*, 101, 84-99.
- Dias, L. M. A., Cerrutti, B. M., Cunha, A. R., Castro, D. G., Curvelo, A. A. S., & Mussatto, S. I. (2020). Biorefining of lignocellulosic biomass for the production of renewable chemicals and biofuels. *Current Opinion in Biotechnology*, 61, 229-238.
- Jin, Y., Tian, Z., Sun, X., Ruan, R., & Wang, S. (2018). Valorization of lignocellulosic biomass for biogas production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 623-633.
- Sevilla, M., & Fuertes, A. B. (2015). Sustainable materials from lignin and lignocellulosic biomass. *Chemical Reviews*, 115(2), 1094-1139.

- Velthof, G. L., Mosquera, J., & Asman, W. A. (2019). Nitrogen and phosphorus recovery from waste and treat them as a source of income rather than a waste problem: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 146, 77-89.
- IEA. (2018). Second-generation Biofuel Capacity to Reach 2.6 Billion Liters in 2020. International Energy Agency. Recuperado en 30 de julio de 2023, de <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-delivering-sustainable-bioenergy>
- Newell, P. (2021). *The Politics of Biofuels, Land and Agrarian Change: Uganda, Tanzania and Colombia*. Routledge.
- Koniszewski, W., & Jeswani, H. K. (2020). Life cycle environmental impacts of bioethanol production from lignocellulosic feedstock. *Journal of Cleaner Production*, 124498.
- Zhao, X., Zhang, X., Yan, Z., & Liu, D. (2022). Biofuels in China: Potential, policy, performance, and problems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110245.
- Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R. A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., ... & Tokgoz, S. (2015). Use of US croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science*, 319(5867), 1238-1240.
- Plevin, R.J., O'Hare, M., Jones, A.D., Torn, M.S., Gibbs, H.K. (2014). Greenhouse gas emissions from biofuels' indirect land use change are uncertain but may be much greater than previously estimated. *Environmental Science & Technology*, 48(10), 6473-6481.
- Naciones Unidas. (2023). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Recuperado en 30 de julio de 2023, de un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/
- Reyna, A. (2023, 19 julio). ¿Cuál es la diferencia entre sustentabilidad y sostenibilidad? BBVA NOTICIAS. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/cual-es-la-diferencia-entre-sustentabilidad-y-sostenibilidad/>

9. Anexos

ANEXO 1. Poderes caloríficos

| Materia prima | Poder calorífico inferior (kcal/kg) | Poder calorífico superior (kcal/kg) |
|---|--|--|
| Alquitrán | 8,550 | 9,000 |
| Alcohol anhidro | 6,750 | 7,090 |
| Alcohol hidratado | 6,300 | 6,650 |
| Asfalto | 9,790 | 10,500 |
| Bagazo de caña ¹ | 2,130 | 2,257 |
| Biodiesel (B100) | 9,000 | 9,345 |
| Jugo de caña de azúcar | 620 | 623 |
| Carbón metalúrgico importado | 7,400 | 7,700 |
| Carbón metalúrgico nacional | 6,420 | 6,800 |
| Carbón para vapor 3100 kcal/kg | 2,950 | 3,100 |
| Carbón para vapor 3300 kcal/kg | 3,100 | 3,300 |
| Carbón para vapor 3700 kcal/kg | 3,500 | 3,700 |
| Carbón para vapor 4200 kcal/kg | 4,000 | 4,200 |
| Carbón para vapor 4500 kcal/kg | 4,250 | 4,500 |
| Carbón para vapor 4700 kcal/kg | 4,450 | 4,700 |
| Carbón para vapor 5200 kcal/kg | 4,900 | 5,200 |
| Carbón para vapor 5900 kcal/kg | 5,600 | 5,900 |
| Carbón para vapor 6000 kcal/kg | 5,700 | 6,000 |
| Carbón para vapor no especificado | 2,850 | 3,000 |
| Carbón vegetal | 6,460 | 6,800 |
| Coque de carbón | 6,900 | 7,300 |
| Coque de petróleo | 8,390 | 8,500 |
| Electricidad ² | 860 | 860 |
| Energía hidráulica ² | 860 | 860 |
| Fábricas de gas Gas - Río de Janeiro ³ | 3,800 | 3,900 |
| Gas de fábrica de gas - São Paulo ³ | 4,500 | 4,700 |
| Gas de coquería ³ | 4,300 | 4,500 |
| Gas de refinería | 8,400 | 8,800 |
| GLP | 11,100 | 11,750 |
| Gas natural seco ^{3,4} | 8,800 | 9,256 |
| Gas Natural Húmedo ^{3,4} | 9,930 | 10,454 |
| Gasolina de motor | 10,400 | 11,220 |
| Gasolina de aviación | 10,600 | 11,290 |
| Leña "recogida" | 3,100 | 3,300 |
| Leña comercial | 3,100 | 3,300 |
| Licor negro | 2,860 | 3,030 |
| Lubricantes | 10,120 | 10,770 |
| Melaza | 1,850 | 1,930 |

| | | |
|---|--------|--------|
| Nafta | 10,630 | 11,320 |
| Fuelóleo | 9,590 | 10,085 |
| Gasóleo | 10,100 | 10,750 |
| Otros productos petrolíferos energéticos | 10,200 | 10,800 |
| Otros productos petrolíferos no energéticos | 10,200 | 10,800 |
| Petróleo | 10,800 | 10,800 |
| Combustible a reacción | 10,400 | 11,090 |
| Queroseno para iluminación | 10,400 | 11,090 |
| Disolventes | 10,550 | 11,240 |

¹: Bagazo con 50% de humedad

²: kcal/kWh

³: kcal/m³

⁴: A 20°C, para productos derivados del petróleo y del gas natural

Adaptado de: Ministério de Minas e Energia & Brasil Governo Federal. (2021).

ANEXO 2. Poderes caloríficos de biocombustibles

| Biocombustible | Generación | Poder calorífico superior (kcal/kg) |
|-------------------------------------|------------|-------------------------------------|
| Etanol | 1ra | 6,400 – 7,100 |
| Biodiesel (RME) | 1ra | 9,000 – 9,460 |
| Metanol | 1ra | 5,400 |
| Butanol | 1ra | 7,100 – 7,300 |
| Aceite vegetal | 1ra | 9,000 – 9,460 |
| Aceite de jatropha | 1ra | 9,000 – 9,460 |
| Aceite de colza | 1ra | 9,000 – 9,460 |
| Aceite de cacahuete | 1ra | 9,000 – 9,460 |
| Aceite de soja o soya | 1ra | 9,000 – 9,460 |
| Aceite de palma | 1ra | 9,000 – 9,460 |
| Aceite de oliva | 1ra | 9,000 – 9,460 |
| Etanol (celulósico) | 2da | 6,600 – 6,900 |
| Biometanol | 2da | 4,660 – 5,140 |
| Aceite vegetal hidrogenado | 2da | 9,000 – 9,460 |
| Éster metílico de ácidos grasos | 2da | 9,300 – 9,800 |
| Biocombustible sintético | 2da | 10,500 – 11,200 |
| Biocombustible derivado de residuos | 2da | 9,300 – 9,800 |
| Biogás | 2da | 9,500 – 13,200 |
| Diesel sintético | 2da | 10,500 – 11,200 |
| Aceite de algas | 2da | 9,300 – 9,800 |
| E10 (10% bioetanol, 90% gasolina) | - | ~31,500 |
| E85 (85% bioetanol, 15% gasolina) | - | ~25,700 |
| B5 (5% biodiesel, 95% diesel) | - | ~45,600 |
| B20 (20% biodiesel, 80% diesel) | - | ~42,500 |

Nota: Los valores caloríficos indicados anteriormente son aproximados y pueden variar en función del proceso de producción específico y de la materia prima utilizada.

Adaptado de: E4tech, “Heating Values of Biofuels” (2022) y Kaveh & Zendehboudi (2019).