

## Bioenergía y desarrollo sostenible: Alternativas en la producción de biocombustibles

Carmina Reyes Plascencia<sup>1\*</sup>, Kiby Mora<sup>1</sup>, Nestor Tancredi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Energías Renovables, Instituto Polo Tecnológico de Pando, Facultad de Química, Universidad de la República, Pando, Uruguay, 91000

<sup>2</sup>Área de Físicoquímica, DETEMA, Facultad de Química, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, 11800

\*carmina@fq.edu.uy

### Resumen

La energía es fundamental para el desarrollo. Sin embargo, aún no se ha logrado un acceso completo y universal a una energía segura, no contaminante y asequible. Una alternativa para enfrentar esta problemática es el uso de la biomasa con fines energéticos, conocida como bioenergía. La bioenergía ofrece diversos beneficios, como la reducción de emisiones netas de gases de efecto invernadero, la diversificación de la matriz energética, el aumento del empleo en zonas rurales y de la inversión económica. Además, la utilización de residuos de biomasa para su generación ayuda a mitigar problemáticas ambientales relacionadas con la gestión de residuos. En este trabajo se abordan diversos aspectos del aprovechamiento de la biomasa con fines energéticos, como los tipos de biomasa y su disponibilidad, los procesos para su transformación en biocombustibles, con especial énfasis en los procesos termoquímicos y las implicaciones ambientales, sociales y económicas de la implementación de la bioenergía.

Palabras clave: Bioenergía, Biomasa, Biocombustibles

### Abstract

Energy is fundamental for development. However, complete and universal access to safe, non-polluting, and affordable energy has yet to be achieved. An alternative to address this issue is using biomass for energy purposes, known as bioenergy. Bioenergy offers various benefits, such as reducing net greenhouse gas emissions, diversifying the energy matrix, increasing employment in rural areas, and promoting economic investment. Additionally, using biomass residues for energy generation helps mitigate environmental issues related to waste management. This work addresses various aspects of biomass utilization for energy purposes, such as the types of biomasses and their availability, the processes for transforming biomass into biofuels, with a particular emphasis on thermochemical processes, and the environmental, social, and economic implications of bioenergy implementation.

Key words: Bioenergy, Biomass, Biofuels.

### Introducción

El desarrollo de la humanidad está íntimamente ligado a la energía. Desde su sentido más básico, la energía metabólica es esencial para cumplir las funciones biológicas. Una vez cubierta esta necesidad, el uso de fuentes de energía externa para generar trabajo o calor se vuelve indispensable. El control del fuego permitió a los homínidos cocinar alimentos, protegerse contra

depredadores y realizar actividades nocturnas. El uso de la energía hidráulica permitió al humano moler grano en civilizaciones como Mesopotamia y el Antiguo Egipto. La energía eólica posibilitó el desarrollo de la navegación a vela, facilitando el intercambio cultural y comercial.

El desarrollo de la máquina de vapor marcó el inicio de la Revolución Industrial, transformando la producción y la economía. Este hito propició

la incorporación de combustibles fósiles como fuente de energía. Posteriormente, el petróleo, con el primer pozo comercial perforado en 1859, se convirtió en una fuente de energía crucial para el transporte, la industria y la electricidad.

El uso masivo de recursos fósiles con fines energéticos ha causado un desbalance en la composición atmosférica, incrementando la concentración de CO<sub>2</sub> de 260 ppm antes de la Revolución Industrial, a 427 ppm en la actualidad (NASA, 2024). Debido al efecto invernadero de estos gases, la temperatura global ha aumentado por encima de los registros históricos provocando el cambio climático. Esto contribuye a la acidificación de los océanos y tiene impactos negativos en diversas áreas como la biodiversidad, la agricultura y la salud humana. Debido a esta problemática, es necesario adoptar modelos de energía sostenible que logren cubrir los requerimientos energéticos actuales y permitan el desarrollo socioeconómico inclusivo de manera asequible, sin comprometer los recursos futuros.

En este sentido, el uso de energías renovables toma un papel preponderante. Entre ellas, la energía que proviene de la biomasa, conocida como bioenergía. Esta es una alternativa prometedora para su incorporación en la matriz energética debido a diversas características, como su versatilidad, posibilidad de almacenamiento en forma de biocombustibles y amplia disponibilidad en diversas regiones. Además, su producción permite paliar otras problemáticas como son la gestión de residuos y el fomento del empleo local.

Este trabajo tiene como propósito ofrecer una comprensión integral de la adopción de la biomasa como fuente de energía, fomentando el desarrollo sostenible. Para esto se ahonda en los tipos y disponibilidad de la biomasa, los procesos de transformación para la producción de biocombustibles, con foco en los procesos termoquímicos y las implicaciones ambientales,

sociales y económicas que tiene su uso en la producción de bioenergía.

### **Tipos de biomasa y disponibilidad**

La bioenergía puede provenir directamente de la biomasa, comúnmente mediante la combustión de esta, o mediante el uso de biocombustibles. El término biomasa se refiere a cualquier material de origen biológico que no haya sufrido transformaciones geológicas (FAO, 2004). Mientras que los biocombustibles, son los combustibles obtenidos a partir de la biomasa mediante tratamientos físicos o químicos que tienen como finalidad la producción de energía (Guo *et al.*, 2015).

Se estima que la biomasa terrestre es suficiente para cubrir ocho veces el consumo energético anual de los humanos (World Bioenergy Association, 2016). Sin embargo, no es posible utilizar toda la biomasa existente, por lo que se diferencian cuatro potenciales: máximo, técnico, económico y de implementación. El potencial máximo, se refiere a la biomasa total disponible en un sistema determinado. El potencial técnico es el disponible utilizando las tecnologías actuales y considerando las limitantes de uso de suelo y ecológicas. No obstante, no toda la biomasa técnicamente disponible es económicamente viable; a la fracción técnica y económicamente aprovechable se le conoce como potencial económico. Por último, el potencial de implementación es la fracción de la biomasa que se puede utilizar en cierto marco temporal y bajo condiciones sociopolíticas concretas, incluidas las restricciones institucionales y sociales y los incentivos políticos (World Bioenergy Association, 2016). La determinación correcta del potencial de biomasa disponible para su utilización como fuente energética es crucial para el correcto dimensionamiento de las infraestructuras de aprovechamiento, así como para las determinaciones del impacto ambiental de su implementación.

Además del potencial de la biomasa, su impacto ambiental, económico y social está ligado a su origen. En este sentido, la biomasa puede clasificarse como de origen natural, cultivo energético o biomasa residual. La biomasa natural proviene de los ecosistemas sin modificación antropogénica. En los países de bajos ingresos es utilizada ampliamente debido a que permite cubrir las necesidades básicas de energía, como la cocción de alimentos y calefacción. Actualmente, más de 2000 millones de personas siguen utilizando este tipo de biomasa en hogueras abiertas para cocinar sus alimentos (United Nations, 2023). Este tipo de tecnologías, además de ser energéticamente ineficientes causan problemas a la salud debido a la exposición a los humos generados durante la combustión. Además, se desaconseja el uso de la biomasa natural debido a la posible degradación de las biocenosis, a menos que se lleve a cabo un manejo adecuado para su regeneración.

La biomasa proveniente de cultivos energéticos es sembrada específicamente con la finalidad de producir bioenergía, por tanto, la selección de la variedad de cultivo y su manejo busca maximizar la cantidad de energía obtenida en cada cosecha. Entre las especies cultivadas se encuentran biomásas con alto contenido de lípidos, azúcares o almidón y lignocelulósicas, que generalmente son transformadas en biocombustibles. Estos cultivos pueden incluir especies que también se utilizan para otros fines, como el maíz y las especies madereras, o pueden cultivarse exclusivamente para la producción de energía, como el pasto elefante.

Una de las principales controversias en la producción de estas biomásas es el uso de recursos naturales, como la tierra fértil y agua, y la competencia por estos recursos con los cultivos alimentarios. Para garantizar la sostenibilidad en la producción de cultivos energéticos, es esencial evitar la deforestación de ecosistemas naturales para crear nuevas tierras de cultivo y proteger

las tierras agrícolas. Además, es necesario desarrollar variedades de cultivos aptas para suelos marginales, no aptos para la agricultura convencional, y que tengan bajas demandas de agua y nutrientes.

La biomasa residual es la proveniente de otras actividades antropogénicas cuyo destino final es su desecho. Tal es el caso de los residuos orgánicos municipales y los residuos agropecuarios, entre otros. Al convertir estos materiales a bioenergía es posible mitigar el impacto ambiental asociado a su disposición. Además, suelen ser materiales de bajo costo debido a su carácter de desecho y proporcionan ingresos adicionales a los productores al incorporarlos a la cadena de valor. Debido a esto, este tipo de biomasa genera un gran interés para su aprovechamiento energético. No obstante, existen algunos retos técnicos para la implementación de la biomasa como fuente de energía en los sistemas actuales debido a sus características fisicoquímicas: baja densidad energética, alto contenido de humedad, baja estabilidad temporal por degradación microbológica y baja relación H/C y alta relación O/C debido a la presencia de numerosos grupos hidroxilos (Bhaskar y Pandey, 2015). Para hacer frente a esta problemática, la biomasa es transformada en bicomcombustibles, facilitando su almacenamiento, transporte y uso. Además, permite su implementación en la infraestructura actualmente empleada para los combustibles fósiles.

Los biocombustibles se clasifican en primarios y secundarios, según el grado de transformación de la biomasa para su utilización. Los biocombustibles primarios son aquellos donde la biomasa es utilizada de forma natural o con una mínima adaptación para su uso, por ejemplo, la leña o la quema de residuos agrícolas. Mientras que los biocombustibles secundarios requieren procesos de transformación más complejos, como transformaciones químicas.

A su vez, los biocombustibles secundarios se clasifican en generaciones en dependencia de la fuente de biomasa. La primera generación (1G) son los biocombustibles provenientes de biomasa comestible. Esto incluye biomásas oleaginosas (semillas de girasol, soya, lino), alcoholígenas (caña de azúcar, sorgo dulce, remolacha) y amiláceas (tubérculos, granos de cereales) (Tajuddin *et al.*, 2016). Estos biocombustibles se producen utilizando tecnologías maduras comercialmente y representan aproximadamente el 90% de los biocombustibles secundarios a nivel mundial (Trninić *et al.*, 2023). La segunda generación (2G) utiliza biomasa lignocelulósica o residual, permitiendo la revalorización de subproductos de otros procesos productivos. Estas biomásas no compiten con fuentes de alimento y suelen tener un bajo costo. Sin embargo, su procesamiento es más complicado debido a su estructura compleja. La tercera generación (3G) utiliza algas, especialmente microalgas, como materia prima. Las microalgas tienen ventajas como una rápida tasa de crecimiento y alta eficiencia fotosintética, y no requieren suelo, pudiendo cultivarse en efluentes residuales o con bajo contenido de nutrientes (Borowitzka y Moheimani, 2013), pero la tecnología para su transformación aún no está completamente desarrollada.

### **Producción de biocombustibles secundarios**

Para la producción de biocombustibles existen diversos procesos que pueden ser englobados en procesos bioquímicos, termoquímicos y otros. Aunque en este trabajo se abordan todas las tecnologías mencionadas en la Figura 1, se enfoca principalmente en procesos termoquímicos.

Los métodos bioquímicos se caracterizan por el uso de microorganismos para la transformación de la biomasa. En el caso de la digestión el producto principal es el biogás, en tanto que en la fermentación el producto principal son los alcoholes. Durante la fermentación, los azúcares de la biomasa son convertidos en bioetanol con la ayuda de levaduras. En el caso de los materiales lignocelulósicos, que no contienen azúcares

simples, es necesario realizar un pretratamiento de hidrólisis, ya sea ácida, enzimática o hidrotérmica, para degradar la celulosa y la hemicelulosa en azúcares simples que puedan ser fermentados por las levaduras (Gonçalves *et al.*, 2016). Mientras que en la digestión diversos microorganismos descomponen la materia orgánica para producir calor, un digestato sólido y gases, que puede ser dióxido de carbono si la digestión se lleva a cabo en presencia de oxígeno, o una mezcla de dióxido de carbono (25%-40%) y metano (50%-70%) si la digestión es anaerobia (Li *et al.*, 2019).

En los procesos termoquímicos, la conversión de la biomasa se realiza mediante el uso de calor y, en algunos casos, presión y/o catalizadores. Estos procesos se dividen según la tolerancia al contenido de humedad de la biomasa en procesos secos que utilizan biomásas con bajo o nulo contenido de agua, y húmedos o hidrotérmicos, los cuales se llevan a cabo en un ambiente rico en agua, por tanto, la humedad de la biomasa no es una restricción (Delgado-Plaza *et al.*, 2023).

Entre los métodos secos se encuentra la combustión, gasificación, torrefacción y pirólisis lenta y rápida. En el caso de la gasificación y la pirólisis lenta la biomasa requiere tener un contenido de humedad inferior a 15-20% para que el proceso sea eficiente (Basu, 2013b). Mientras que en la combustión un contenido alto de humedad dificulta el proceso y decrece la recuperación de energía, ya que parte de la energía que proviene de las reacciones de oxidación de la biomasa es utilizada para evaporar el agua.

Los métodos termoquímicos húmedos no requieren proceso de secado de la biomasa, evitando con ello pérdidas energéticas. Se llevan a cabo a temperatura moderada (200 a 700°C) y alta presión (20 a 300 bar), generalmente correspondientes a la presión de vapor del solvente a la temperatura de trabajo (Sigaar, 2014). Según sea el rango de temperatura y

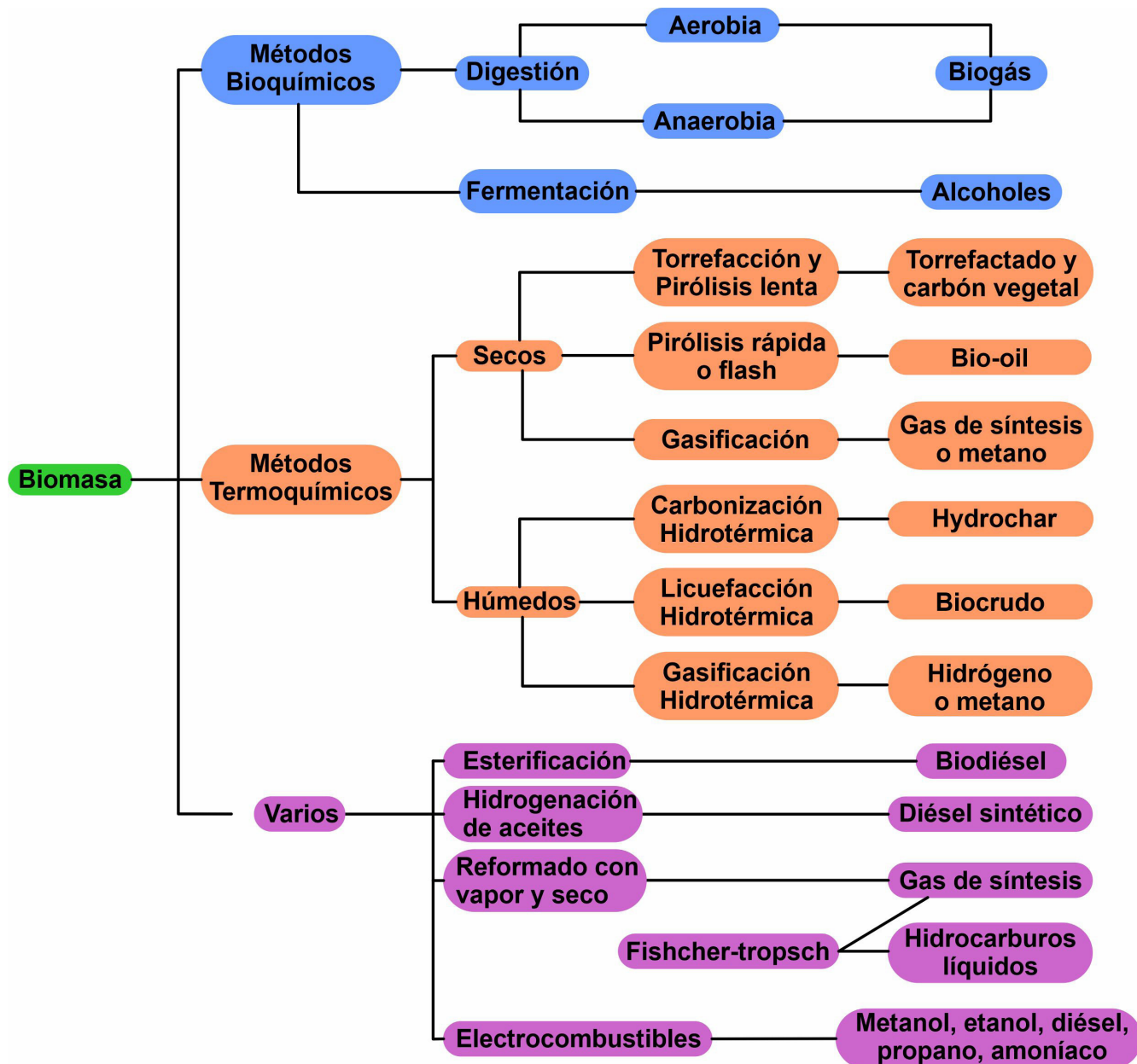


Figura 1. Procesos de producción de biocombustibles.

presión utilizado, se favorecerá el rendimiento de una fase en los productos, llamándose gasificación cuando el producto deseado es gas, licuefacción cuando lo que se pretende es obtener un líquido combustible o carbonización cuando el objetivo es la fase sólida carbonosa.

En este apartado se detallará la producción de biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos mediante procesos termoquímicos.

### Biocombustibles sólidos

La torrefacción, la pirólisis lenta y la carbonización hidrotérmica son procesos termoquímicos utilizados para la producción de combustibles sólidos a partir de biomasa, tal como se observa en la Figura 1. Aunque el objetivo de estos procesos es la producción de un sólido carbonoso, se diferencian en las condiciones de reacción, el rendimiento y características del producto. Las principales características de estos procesos se muestran en la Figura 2.

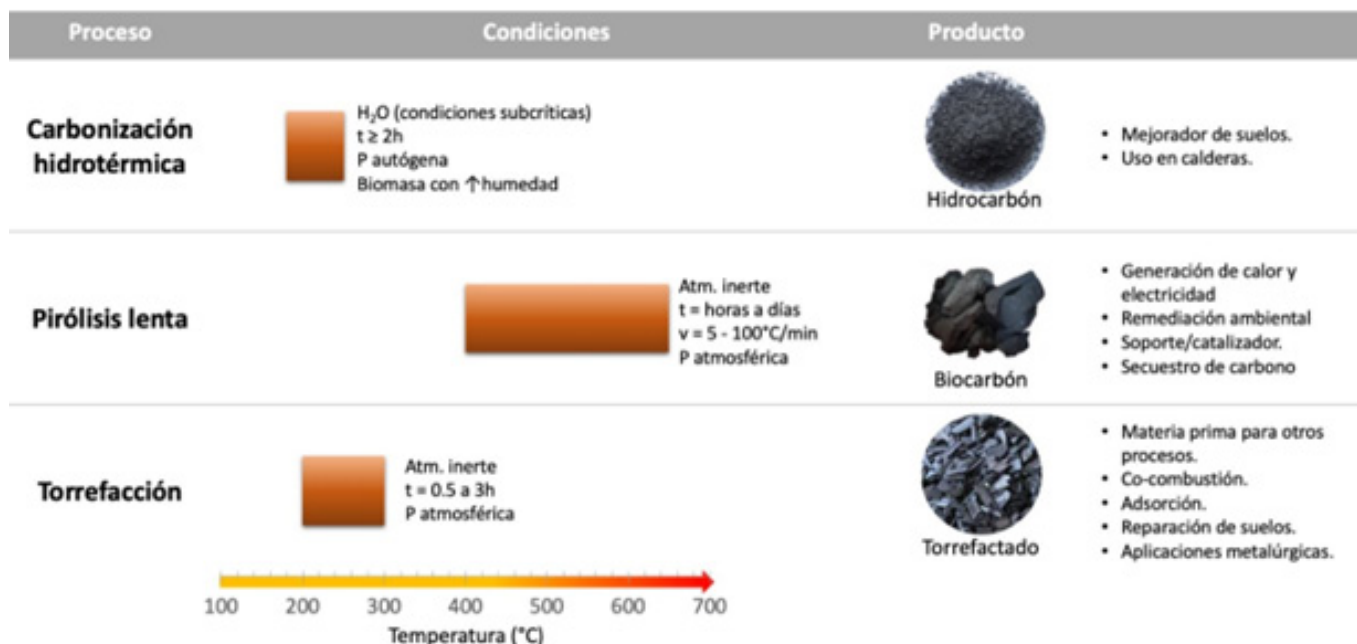


Figura 2. Producci3n de biocombustibles s3lidos. *Atm*: Atm3sfera; *t*: Tiempo; *v*: Velocidad; *P*: Presi3n

### Torrefacci3n

La torrefacci3n es un m3todo termoquímico seco que ha sido estudiado como pretratamiento de biomasa con el objetivo de obtener un s3lido con mejores propiedades combustibles que la biomasa de partida. Durante este proceso, la biomasa se calienta a temperaturas entre 200 y 300 °C, en una atm3sfera inerte, durante 0.5 a 3 h (Eling et al., 2024). Bajo estas condiciones se modifican las propiedades de la biomasa: i) se elimina la humedad y parte de los compuestos volátiles, ii) se llevan a cabo reacciones de deshidroxilaci3n obteniendo un producto m3s hidrof3bo que la biomasa de partida, iii) la hemicelulosa se degrada a trav3s de reacciones de fragmentaci3n, desacetilaci3n y despolimerizaci3n, lo que produce compuestos volátiles y carb3n fijo, iv) la lignina y la celulosa se desvolatilizan y despolimerizan parcialmente y v) se destruye por completo la estructura celular perdiendo la naturaleza fibrosa del material (Butler et al., 2023).

El resultado es un material seco e hidrof3bico, conocido como torrefactado, con mayor

contenido de carbono, mayor poder calorífico y m3s f3cil de moler en comparaci3n con la biomasa de partida (Butler et al., 2023; Eling et al., 2024). El torrefactado presenta características intermedias entre una biomasa convencional y un carb3n vegetal (Yuzhuo Wang y Wu, 2023) y sus rendimientos máxicos dependen de la biomasa de partida y las condiciones de reacci3n, rondando 70-85% (Bustamante García et al., 2016).

La disminuci3n en el contenido de humedad y el carácter hidrof3bico del torrefactado reducen los costos asociados a su manejo, transporte y almacenamiento, ya que disminuye la carga de agua que se transporta y mitiga la degradaci3n microbiológica. Por otro lado, produce materiales m3s friables, lo que facilita el proceso de molienda, reduciendo el consumo de energía y logrando un tamaño de partícula m3s uniforme (Ribeiro Nunes et al., 2018). Este material puede ser alimentado a otros procesos, como la gasificaci3n, y tiene numerosas áreas de aplicaci3n, como co-combustión, adsorci3n, reparaci3n de suelos y aplicaciones metalúrgicas (Eling et al., 2024).

### Pirólisis lenta o convencional

Al aumentar la temperatura de trabajo respecto a la de torrefacción el proceso se conoce como pirólisis. La pirólisis se clasifica en lenta, rápida y *flash* según la velocidad de calentamiento, la temperatura del proceso y el tiempo de residencia. Cada condición favorece la producción de un compuesto específico: en la pirólisis lenta se produce principalmente biocarbón o carbón vegetal, mientras que en las pirólisis rápida y *flash* se favorece la formación de un biocombustible líquido conocido como bio-oil.

En la pirólisis lenta, o pirólisis convencional, la materia orgánica se calienta gradualmente en un ambiente carente de oxígeno a temperaturas entre los 400 y 650 °C, con velocidades de calentamiento entre los 5 a 100 °C/min y tiempos de residencia que pueden ir de horas a varios días (Mukherjee et al., 2022). La combinación de bajas velocidades de calentamiento, temperaturas moderadas y largos tiempos de residencia resulta en un mayor rendimiento de biocarbón de alta calidad, mientras se minimiza la producción de bio-oil y gases (Al-Rumaihi et al., 2022).

La pirólisis es un proceso complejo que sigue dos mecanismos principales: primario y secundario. En el mecanismo primario, que ocurre alrededor de los 250 a 300 °C, se rompen los enlaces químicos de la biomasa liberando compuestos volátiles que luego participan en reacciones adicionales en el mecanismo secundario. El mecanismo secundario ocurre a temperaturas más elevadas, generalmente por encima de los 300 °C. A esta temperatura los compuestos inestables se rompen o se recombinan para formar nuevas estructuras moleculares (Al-Rumaihi et al., 2022).

La biomasa lignocelulósica es el material más utilizado como insumo en la pirólisis. El componente de esta biomasa que tiene menor estabilidad térmica es la hemicelulosa debido a su baja cristalinidad; se descompone ente 150

y 350 °C, produciendo principalmente gases no condensables y alquitranes (Demirbas, 2011). La celulosa se descompone entre los 270 y 350 °C produciendo compuestos orgánicos volátiles condensables, pudiendo también formar fase sólida (Ma et al., 2019). La lignina es el componente más estable y se descompone entre los 250 y 500 °C (Basu, 2013b); produce fenoles mediante reacciones de escisión de éteres y C-C, y contribuye en gran medida a la formación de la fase sólida (Bridgwater y Peacocke, 2000; Ribeiro Nunes et al., 2018). Tanto la descomposición de la hemicelulosa como la de la lignina son procesos exotérmicos y se asocian con la formación de biocarbón. En contraste, la descomposición de la celulosa es un proceso endotérmico debido a las rápidas reacciones de desvolatilización (Bridgwater y Peacocke, 2000).

Los compuestos inorgánicos presentes en la biomasa pueden actuar como catalizadores de la pirólisis. Se ha reportado que los metales alcalinos y alcalinotérreos, como K, Ca, Na y Mg mejoran la deshidratación de los azúcares, ya que catalizan la ruptura de los enlaces C-H y C-O. El K disminuye la temperatura a la que inicia la descomposición de la biomasa y aumenta el rendimiento del sólido, el agua y el gas debido a que favorece la despolimerización y fragmentación de la biomasa hacia compuestos más pequeños. Por su parte la presencia de KCl y NaCl aceleran la descomposición térmica de los carbohidratos a moléculas pequeñas por lo que se favorece la fase gaseosa a expensas del bio-oil (Demirbas, 2011).

El biocarbón obtenido por pirólisis muestra una alta estabilidad térmica y un mayor poder calorífico superior (PCS), en comparación con la biomasa original, debido al incremento en su contenido de carbón. El PCS puede variar según la materia prima y las condiciones de pirólisis, pero generalmente se encuentra entre 15 y 25 MJ/kg (Mukherjee et al., 2022). Estas características hacen que el biocarbón sea adecuado como combustible en sistemas de generación de calor y

como co-combustible para producir electricidad. Además de su uso como biocombustible, el biocarbón tiene múltiples aplicaciones que van desde la remediación del suelo y el agua, mejora del rendimiento agrícola, supercondensadores, celdas de combustible, soporte/catalizadores y el secuestro de carbono (Al-Rumaihi et al., 2022).

### **Carbonización hidrotérmica**

Para la obtención de biocombustibles sólidos a partir de biomasa con alto contenido de humedad, como la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales, es aconsejable utilizar la carbonización hidrotérmica (CHT). Este proceso evita las pérdidas energéticas asociadas con el secado de la biomasa.

La CHT es un proceso hidrotérmico que se lleva a cabo en un ambiente acuoso a temperaturas que oscilan entre 180 y 250 °C, a presiones comúnmente autógenas por el vapor de agua, y durante tiempos de reacción que van de 2 a varias horas (Wang et al., 2018). El proceso se realiza a condiciones de presión y temperatura correspondientes al agua subcrítica, facilitando la deshidratación, desoxigenación y policondensación de los componentes de la biomasa, lo que conduce a la formación de un sólido carbonoso, conocido como hidrocarbón o hydrochar (Wang et al., 2018).

La CHT de biomasa lignocelulósicas sigue dos mecanismos. Por un lado, los componentes de la biomasa termodinámicamente inestables se disuelven en el medio y posteriormente reaccionan en fase líquida para formar el hidrocarbón mediante reacciones de condensación y repolimerización (Al-Rumaihi et al., 2022; Demirbas, 2011). Por otro lado, si las condiciones del proceso no son lo suficientemente severas para hidrolizar la biomasa, los componentes no se disolverán y sufrirán un proceso similar a la pirólisis, produciendo especies carbonosas que se deshidratarán y reordenarán en una estructura

carbonosa rica en aromáticos y furanos (Wang et al., 2018). El tiempo de residencia y la temperatura determinan la severidad de la reacción y el grado de carbonización de la biomasa de partida.

El hidrocarbón obtenido por CHT presenta características interesantes: i) Posee un PCS similar al lignito, pero se diferencia de este por un mayor contenido de compuestos volátiles y mejor biodegradabilidad en el suelo, lo que le confiere propiedades atractivas como mejorador de suelos (Kruse y Dahmen, 2015). ii) Sus propiedades hidrofóbicas facilitan la eliminación de agua por prensado (Wang et al., 2018) iii) En algunos casos presenta un bajo contenido de sales, las cuales quedan disueltas en la fase líquida, esto permite utilizarlo en calderas con temperaturas cercanas a los 1200 °C (Kruse y Dahmen, 2015).

### **Biocombustibles líquidos**

Los procesos termoquímicos utilizados para la producción de combustibles líquidos a partir de biomasa son la pirólisis, tanto rápida como *flash*, y la licuefacción hidrotérmica. Las condiciones en las que se lleva a cabo estos procesos y las características de los productos se encuentran en la Figura 3.

#### **Pirólisis rápida y pirólisis *flash***

Pirólisis rápida y pirólisis *flash* son términos que a menudo se utilizan indistintamente, pero tienen algunas diferencias en las condiciones del proceso y la distribución de los productos obtenidos. Aunque ambas tienen como producto objetivo un líquido viscoso de color marrón oscuro y olor acre conocido como bio-oil o aceite piroleñoso.

La pirólisis rápida se lleva a cabo a temperaturas en torno a los 500 °C, en ausencia de oxígeno con tiempos de residencia de algunos segundos, aproximadamente 10 a 30 s (Bridgwater y Peacocke, 2000). Durante este proceso la materia orgánica se degrada obteniendo una distribución

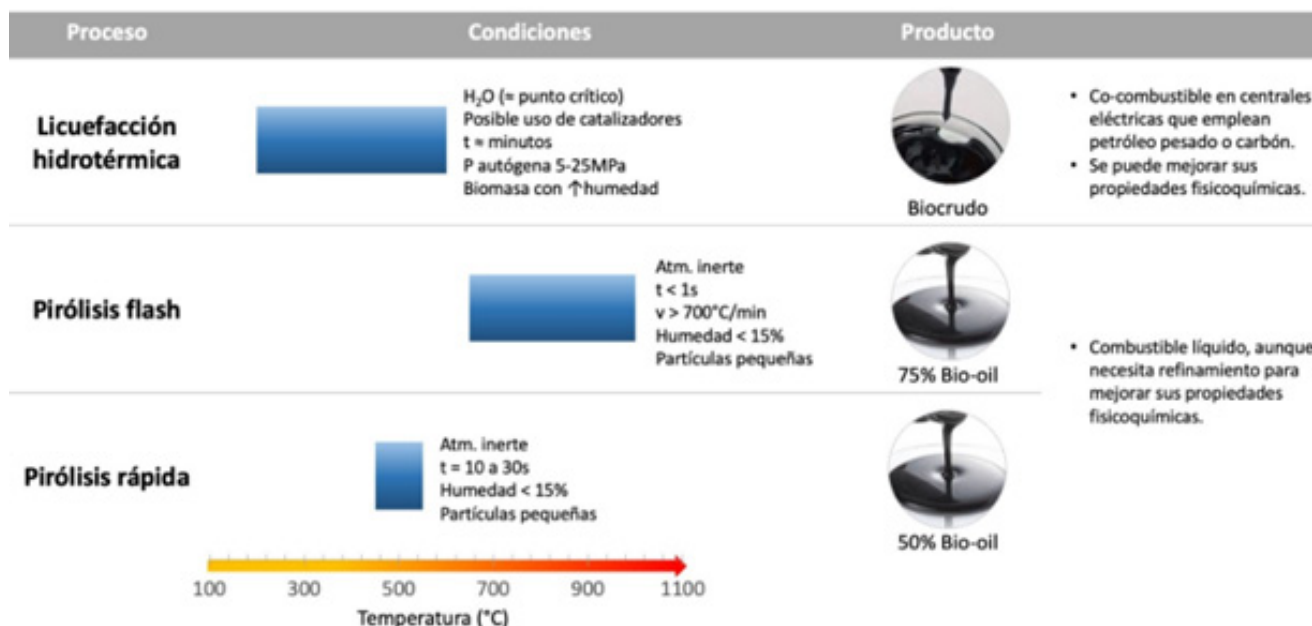


Figura 3. Producción de biocombustibles líquidos. *Atm*: Atmósfera; *t*: Tiempo; *v*: Velocidad; *P*: Presión

de productos de aproximadamente 25% de sólidos, 50% de líquidos condensables (bio-oil) y 25% de gases (Bridgwater, 2012).

La pirólisis *flash* debe su nombre a la extrema rapidez del proceso. Se lleva a cabo a temperaturas entre 650-1000 °C, con velocidades de calentamiento superiores a 700 °C/segundo y tiempos de residencia extremadamente cortos (menos de 1 segundo). Durante este proceso, la elevada tasa de calentamiento de la biomasa y el rápido enfriamiento de los productos favorecen la producción del bio-oil, obteniendo una distribución de productos aproximada de 12% de sólidos, 75% de líquidos condensables (bio-oil) y 13% de gases (Banks y Bridgwater, 2016). Se ha observado que el aumento de la temperatura tiene un efecto positivo en el rendimiento de bio-oil. Sin embargo, a temperaturas mayores a la óptima se favorecen reacciones secundarias, como el craqueo de los compuestos volátiles, lo que puede aumentar el rendimiento de gas (Guedes et al., 2017).

Un parámetro clave es el tamaño de las partículas de biomasa. Se suelen utilizar partículas pequeñas para minimizar el gradiente de temperatura entre la superficie y el centro de la partícula. La alta velocidad de transferencia de calor es esencial para que la partícula alcance la temperatura deseada en fracciones de segundo, favoreciendo así un alto rendimiento de líquido y reduciendo la formación de coque (Al-Rumaihi et al., 2022). Además, es necesario que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 15% (Bridgwater, 2012).

A pesar de la posibilidad de obtener altos rendimientos de bio-oil, este es inadecuado para aplicaciones directas. Su alto contenido de oxígeno y agua resulta en un poder calorífico bajo (17 MJ/kg), aproximadamente la mitad del de los combustibles derivados del petróleo (42-44 MJ/kg) (Bridgwater y Peacocke, 2000). Además, contiene ácidos que causan corrosión en los equipos. Por lo tanto, el bio-oil requiere refinamiento para mejorar sus propiedades fisicoquímicas y ser una alternativa viable a los combustibles derivados del petróleo.

## Licuefacción hidrotérmica

Para la producción de biocombustibles líquidos a partir de biomasa con alto contenido de humedad, una alternativa prometedora es la licuefacción hidrotérmica (LHT). Este proceso hidrotérmico se realiza en un medio acuoso, eliminando la necesidad de secar la biomasa previamente.

Durante este proceso, la mezcla de biomasa y agua y/o solvente orgánico se calienta a temperaturas en torno a 200-600 °C y presiones comúnmente autogeneradas por la presión de vapor del agua/solvente a la temperatura de trabajo que rondan 5-25 MPa y con tiempos de residencia en el orden de minutos (Smith y Keener, 2011). Su objetivo principal es la producción de un líquido oleoso conocido como biocrudo, aunque también se obtienen una fase sólida llamada hydrochar o hidrocarbón y gases. La distribución de los productos y sus características dependen de los parámetros del proceso, como el tipo de biomasa, la temperatura de reacción, el tiempo de residencia, el solvente y el catalizador utilizado.

Las reacciones que sufre la biomasa en la LHT son diferentes a las que sufre en los métodos termoquímicos secos debido al cambio de las propiedades fisicoquímicas del agua cerca del punto crítico. La ruta de reacción de la biomasa durante la LHT se puede dividir en tres etapas: despolimerización, descomposición de monómeros y recombinación de subproductos (Gollakota *et al.*, 2018).

El proceso de despolimerización de la biomasa comienza con la dispersión de los fragmentos de biomasa solubles en agua a aproximadamente 100°C, seguida por la hidrólisis de los biopolímeros en oligómeros solubles en agua alrededor de 150°C. Posteriormente, la ruptura de los puentes de hidrógeno intra e intermoleculares (Ruiz *et al.*, 2013) provoca la desintegración de la celulosa y la hemicelulosa en monómeros simples como

glucosa, furfural o ácido acético (Zhang, 2010), formándose un lodo a temperaturas cercanas a 200°C y 1 MPa de presión (Kumar *et al.*, 2018).

Durante la descomposición, las moléculas pierden agua por deshidratación y CO<sub>2</sub> por descarboxilación, promoviendo la eliminación de átomos de oxígeno de los productos del proceso. En una primera fase, se forman compuestos orgánicos solubles en agua como ácidos orgánicos, furanos, aldehídos y fenoles. Estos compuestos intermediarios repolimerizan para formar biocrudo, que está compuesto por ácidos, alcoholes, aldehídos, ésteres, cetonas, fenoles y otros compuestos aromáticos (Gollakota *et al.*, 2018). Otros compuestos orgánicos solubles forman clústeres aromáticos mediante condensación o polimerización, seguidos de aromatización, deshidratación intramolecular o tautomerismo ceto-enol. Si estos clústeres alcanzan la supersaturación, comienza la nucleación de compuestos aromáticos y luego el crecimiento de cristales a partir de los grupos oxigenados presentes, formando microesferas de hydrochar.

El uso de catalizadores mejora el rendimiento del biocrudo al evitar la repolimerización de compuestos fenólicos de bajo peso molecular, lo que reduce la formación de una fase sólida (Kang *et al.*, 2013). Las sales de potasio, especialmente el K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, son los catalizadores que producen mayor rendimiento de biocrudo (Yun Wang *et al.*, 2013; Zhu *et al.*, 2014), con el siguiente orden de reactividad: K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> > KOH > Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> > NaOH (Demirbas, 2011).

El biocrudo obtenido es un líquido de alta viscosidad, con un PCS de 30-36 MJ/kg, un contenido de agua aproximado del 5% y un contenido de oxígeno que oscila entre el 10% y el 20% (Pavlovic *et al.*, 2013). Puede utilizarse directamente como co-combustible en centrales eléctricas que emplean petróleo pesado o carbón. Sin embargo, también puede mejorarse mediante varios procesos diseñados para

reducir su viscosidad, disminuir su contenido de oxígeno y garantizar su estabilidad a largo plazo. Estas técnicas incluyen hidrotratamiento, hidrocrackeo, reacciones con fluidos sub/super críticos, adición de solventes o emulsión con combustibles derivados del petróleo (Xiu & Shahbazi, 2012).

La LHT ofrece varias ventajas para el tratamiento de biomasa residuales y la producción de biocombustibles: elimina la necesidad de secado al utilizar agua en el medio de reacción, permite la producción de una amplia variedad de productos químicos, mejora la velocidad de reacción al operar en condiciones cercanas al punto crítico del agua y asegura la eliminación de patógenos, garantizando materiales libres de compuestos biológicamente activos.

### Biocombustibles gaseosos

Para la producción de biocombustibles gaseosos mediante métodos termoquímicos, se puede emplear la gasificación, que puede ser seca o hidrotérmica. Las condiciones del proceso, así como el uso de catalizadores específicos, dependen del tipo de gas combustible que se

desea obtener. En la Figura 4 se presentan las principales características de estos procesos.

### Gasificación seca

La gasificación es un proceso termoquímico endotérmico que convierte la biomasa en un gas combustible compuesto principalmente de CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. Se lleva a cabo a altas temperaturas, entre 800 y 1200 °C, en un ambiente deficiente de oxígeno. Los agentes oxidantes comúnmente utilizados son oxígeno, aire y/o vapor de agua. Sin embargo, al emplear aire como agente oxidante, surge el problema de la dilución de los gases de reacción debido a que el 79% del aire es nitrógeno, lo que disminuye el poder calorífico de la mezcla o aumenta los costos debido a su posterior separación.

La temperatura de reacción es un factor crucial que influye significativamente en la distribución de productos y en la eficiencia del proceso. A medida que aumenta la temperatura, se favorecen las reacciones de craqueo debido a su naturaleza endotérmica, lo que reduce la formación de alquitranes y promueve la producción de H<sub>2</sub>, CO y CO<sub>2</sub>. Por encima de

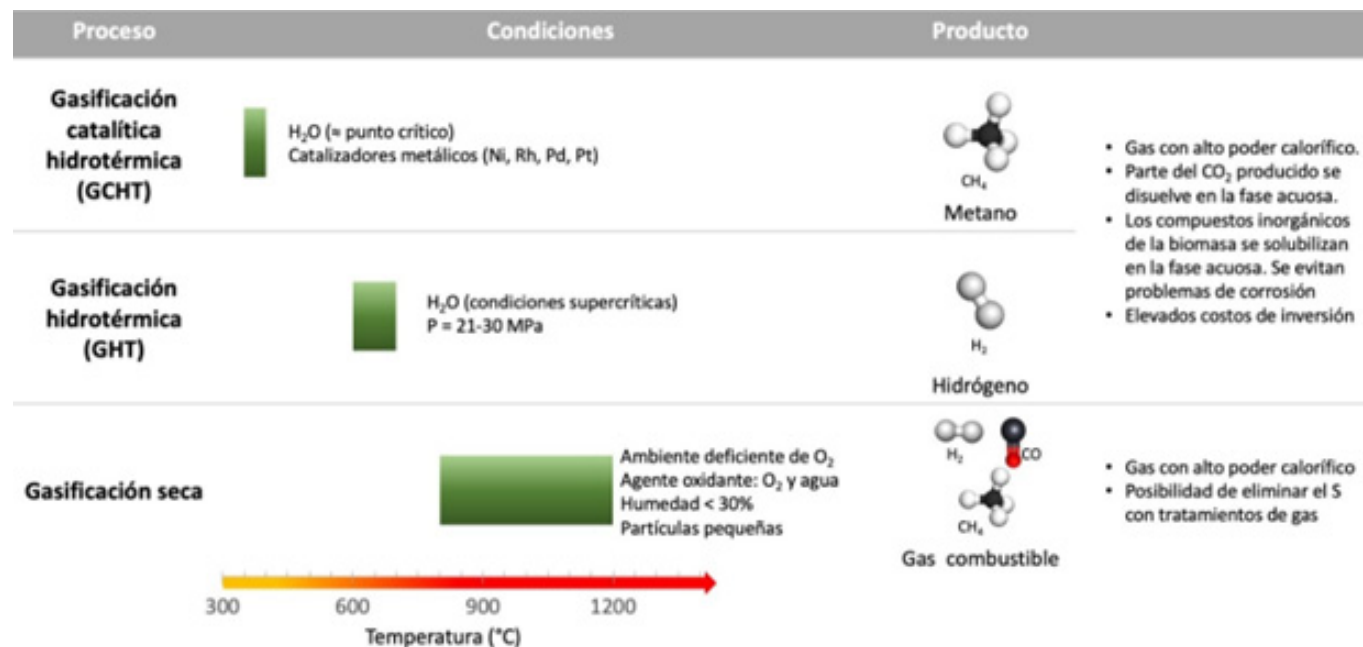


Figura 4. Producción de biocombustibles gaseosos. P: Presión

los 600°C, ocurre la descomposición del CH<sub>4</sub>, también una reacción endotérmica lo que, en conjunto con el reformado, incrementa la producción de H<sub>2</sub> (Sansaniwal *et al.*, 2017).

El grado de gasificación suele ser influenciado por el tamaño de las partículas debido a problemas difusivos. Con el incremento del tamaño de las partículas, se amplía el gradiente térmico entre la superficie y el interior, lo que hace que el control de la transferencia de calor y masa prevalezca sobre la cinética de la reacción. Partículas grandes propician la formación de alquitranes pesados y carbón (Basu, 2013a).

El contenido de humedad de la biomasa es crucial en el proceso de gasificación, ya que un alto contenido de humedad disminuye la eficiencia de conversión. Por lo tanto, se prefiere realizar este proceso con biomasa que tenga un contenido de humedad inferior al 30%. Cuando la biomasa contiene demasiada agua, parte de la energía suministrada se utiliza para evaporar el exceso de humedad (Basu, 2013a). Este consumo energético reduce la temperatura alcanzada en la zona de oxidación, lo que resulta en un craqueo incompleto de los hidrocarburos producidos en la zona pirolítica.

La gasificación de biomasa tiene varios objetivos, por un lado, aumentar el poder calorífico del gas combustible producido al reducir compuestos no combustibles como agua o cenizas. Al gasificar biomasa con alto contenido de azufre es posible eliminarlo en fase gaseosa mediante tratamientos posteriores. También es de interés la producción del gas de síntesis para aplicaciones en celdas de combustible, la producción de combustibles líquidos por Fischer-Tropsch u otros productos químicos y la generación de H<sub>2</sub> como producto específico.

### **Gasificación húmeda**

Una alternativa a la gasificación seca es la gasificación hidrotérmica (GHT) o la gasificación

catalítica hidrotérmica (GCHT). La primera tiene como objetivo la producción de H<sub>2</sub> mientras que la segunda la producción de CH<sub>4</sub>.

La GHT se lleva a cabo en condiciones supercríticas del agua, en un rango de temperaturas de 600-700 oC y presiones elevadas (21-30 MPa) (Kruse & Dahmen, 2015). Mientras que la GCHT se lleva a cabo en condiciones cercanas al punto crítico del agua, empleando catalizadores metálicos, entre los cuales se destacan aquellos con fase activa de Ni, Rh, Pd o Pt (Kruse, 2009; Kruse & Dahmen, 2018).

Bajo estas condiciones operativas, la biomasa se descompone en sus componentes básicos. Durante el proceso, se llevan a cabo varias reacciones incluyendo hidrólisis, despolimerización, reformado con vapor, deshidratación y gasificación. El resultado es la producción de un gas combustible compuesto principalmente de H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, con pequeñas cantidades de otros gases, compuestos solubles en agua y bajos rendimientos de hydrochar.

La producción de CO<sub>2</sub> en la GHT y GCHT se debe al alto contenido de oxígeno de la biomasa. Sin embargo, a diferencia de la gasificación seca, parte del CO<sub>2</sub> se disuelve en el agua debido a su alta solubilidad. Esto hace que la fase gaseosa, que es recuperada aún presurizada, contenga relativamente poco CO<sub>2</sub>, resultando en un gas con alto poder calorífico (Kruse, 2009). La obtención de una fase gaseosa con esta característica ya presurizada elimina la necesidad de etapas adicionales de acondicionamiento del gas para su almacenamiento, distribución y uso, reduciendo así los costos asociados.

Por otro lado, los compuestos inorgánicos provenientes de la biomasa, como los cloruros, se recuperan solubilizados en la fase acuosa, evitando así los problemas de corrosión que ocurren cuando estos compuestos están presentes en la fase gaseosa. Esto también

reduce los costos de limpieza y mantenimiento durante el procesamiento.

El principal inconveniente de la GHT y la GCHT son los elevados costes de inversión en equipamiento debido a la alta presión requerida. Esto es especialmente relevante en la GHT, que necesita el uso de materiales especiales capaces de soportar la combinación de alta presión y temperaturas de 600 °C o superiores.

### **Tecnologías varias**

Además de los procesos bioquímicos y termoquímicos, existen otros procesos para la producción de biocombustibles. Algunas de estas tecnologías han alcanzado un alto grado de madurez, como la esterificación de ácidos grasos para la producción de biodiesel, mientras que otras se encuentran en fase emergente, como la producción de biocombustibles líquidos por Fischer-Tropsch o los electrocombustibles.

El reformado seco o con vapor de compuestos orgánicos y el proceso Fischer-Tropsch son métodos que permiten producir combustibles a partir de diversas fuentes de carbono. Por un lado, el reformado permite obtener gas de síntesis a partir de derivados de biomasa (Musso et al., 2024), que es una mezcla principalmente de  $H_2 + CO$ . Este gas puede ser utilizado directamente en celdas de combustible para la producción de electricidad o transformarlo mediante el proceso de Fischer-Tropsch en combustible líquido con características adecuadas para su uso en los motores de combustión interna.

Los electrocombustibles o e-combustibles son producidos utilizando  $H_2$  y  $CO_2$  o  $N_2$  como materia prima. El  $CO_2$  puede obtenerse de la producción de biocombustibles o capturarse del aire o de fuentes puntuales, mientras que el nitrógeno se captura del aire. La particularidad de estos combustibles es que el hidrógeno utilizado para su síntesis proviene de la electrolisis del agua utilizando electricidad renovable, por lo que son

una alternativa prometedora para aprovechar los picos de producción eléctrica.

Dependiendo de la tecnología de producción, se puede sintetizar químicamente una variedad de electrocombustibles líquidos y gaseosos, incluidos electrometano, electrometanol, electrogasolina, electrodiésel, electrocombustible para aviones y electroamoníaco (Brynnolf et al., 2022). Esta tecnología no es madura y presenta algunos desafíos como la baja eficiencia energética y los altos costos.

### **Aspectos ambientales, sociales y económicos de la bioenergía**

La energía sostenible es un factor crucial para el bienestar socioambiental. La ONU considera la energía como un motor esencial para la reducción de la pobreza, el progreso social, la equidad, la resiliencia y el crecimiento económico (United Nations, 2023), destacando su papel fundamental en la solución de las problemáticas globales actuales. No obstante, el acceso a la energía a nivel mundial no es universal, pues 733 millones de personas no tienen acceso a la electricidad, 675 millones no están conectadas a redes eléctricas y 2300 millones dependen de combustibles peligrosos y contaminantes para cocinar (United Nations, 2023). Esta situación acentúa las brechas sociales.

Por otro lado, el consumo de energía es la principal causa del cambio climático, ya que representa alrededor del 60% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (United Nations, 2023). Para mitigar este problema, es imperativa la transición hacia fuentes de energía renovable, ya que actualmente, las energías renovables solamente representan el 19% del consumo total de energía, casi el 30% del consumo de energía en el sector eléctrico (United Nations, 2023) y 9% en el transporte (International Energy Agency, 2023).

Las energías renovables, como la solar y la eólica, son intermitentes, lo que significa que su producción no es temporalmente estable y depende de las condiciones meteorológicas. Además, sus picos de máxima producción no siempre coinciden con los picos de máxima demanda energética, lo que hace necesarias soluciones de almacenamiento para garantizar la estabilidad del suministro.

En este sentido, se han propuesto diversos sistemas de almacenamiento. Por ejemplo, el bombeo hidráulico permite almacenar grandes cantidades de energía, pero requiere la construcción de represas en zonas elevadas, lo cual conlleva impactos sociales y ambientales significativos. Por otro lado, el uso de baterías, como las de ion-litio, sigue siendo costoso y presenta limitaciones en términos de capacidad y vida útil.

En este marco, la bioenergía proporciona un suministro estable y continuo de energía que puede integrarse con los sistemas de energías renovables intermitentes. Esto permite abastecer energía al sistema durante períodos de alta demanda o de baja producción de energía intermitente, y almacenar energía en forma de biocombustibles durante los picos de producción. Esta integración crea un sistema más robusto y resiliente.

Las plantas de cogeneración de biomasa producen simultáneamente electricidad y calor, lo que permite una utilización más eficiente del recurso energético. Esta capacidad es especialmente relevante en el sector industrial, donde calderas, hornos, secaderos y otros procesos pueden cubrir sus necesidades energéticas con un rendimiento energético que alcanza entre el 80% y el 90% (Ballesteros, 2018). Asimismo, facilita la descarbonización de la producción de calor de alta temperatura.

Además de la biomasa, es factible emplear en estas infraestructuras biocombustibles como

pellets de biocarbón o torrefactados, bio-oil o biocrudo, así como gases combustibles. El uso de estos materiales no solo permite descentralizar la producción de energía respecto a la fuente de biomasa, sino también su implementación en otros sectores como el transporte pesado y marítimo.

La producción de biocombustibles líquidos, sólidos y gaseosos mediante procesos termoquímicos es clave para diversificar las fuentes de energía renovable y aprovechar una amplia gama de biomasa. La distribución de estos biocombustibles depende del proceso empleado, tal como se muestra en la Figura 5, lo que permite adaptarlos a diversas aplicaciones en la infraestructura energética existente, incluyendo el transporte, la generación de calor y electricidad, y la cogeneración. Estos biocombustibles pueden integrarse en la infraestructura energética existente, permitiendo su uso en sectores como el transporte, la generación de calor y electricidad, y la cogeneración. Los biocombustibles líquidos pueden ser utilizados en motores convencionales y así reducir las emisiones del sector transporte. Los biocombustibles sólidos pueden reemplazar el carbón en sistemas de calefacción y plantas termoeléctricas. Mientras que los gaseosos son adecuados para inyectarse en redes de gas o generar electricidad y calor de forma eficiente.

Desde un punto de vista ambiental, la bioenergía puede contribuir a la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero si el modelo de producción de biomasa y biocombustibles es sostenible. Esto se debe a que el CO<sub>2</sub> absorbido por la biomasa durante su crecimiento se libera nuevamente durante la combustión, cerrando así el ciclo del carbono en periodos cortos de tiempo y manteniendo estable su concentración en la atmósfera. Incluso puede generar emisiones netas negativas si es implementado un sistema de bioenergía con captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>.

Por otro lado, la producción de bioenergía puede complementar la gestión sostenible de residuos biomásicos procedentes de otros sistemas productivos. Utilizar estos residuos evita la emisión de gases de efecto invernadero que resultaría de su descomposición microbiológica tras su descarte, contribuye a mitigar la contaminación del agua y el suelo al gestionar estas biomásas residuales de manera sostenible. También genera nuevas líneas de negocio a los productores de la biomasa al reincorporarla en la cadena de valor.

Además de su impacto ambiental, la producción de bioenergía genera derrames económicos y sociales favoreciendo una economía descentralizada. En el 2021, se generaron alrededor de 2.5 millones de empleos relacionados con la bioenergía (Renewable Energy Agency, 2023), principalmente en las zonas rurales de los países en desarrollo, ya que

es el lugar donde la biomasa está disponible en mayor medida. Desde una perspectiva social, esta creación de puestos de trabajo contribuye a reducir la migración de habitantes de áreas agrícolas hacia las grandes ciudades y promueve el desarrollo económico en las zonas rurales.

La implementación de la bioenergía es un factor clave para avanzar hacia lo que el Programa de la ONU para el Medio Ambiente (PNUMA) define como Economía Verde. Esta economía busca mejorar el bienestar humano y la equidad social, reduciendo significativamente los riesgos ambientales y las escaseces ecológicas. En su expresión más simple, una Economía Verde puede ser considerada como una que es baja en carbono, eficiente en recursos y socialmente inclusiva (United Nations Environment Programme, 2019). La bioenergía, cuando se produce y utiliza de manera sostenible, cumple plenamente con estos parámetros.

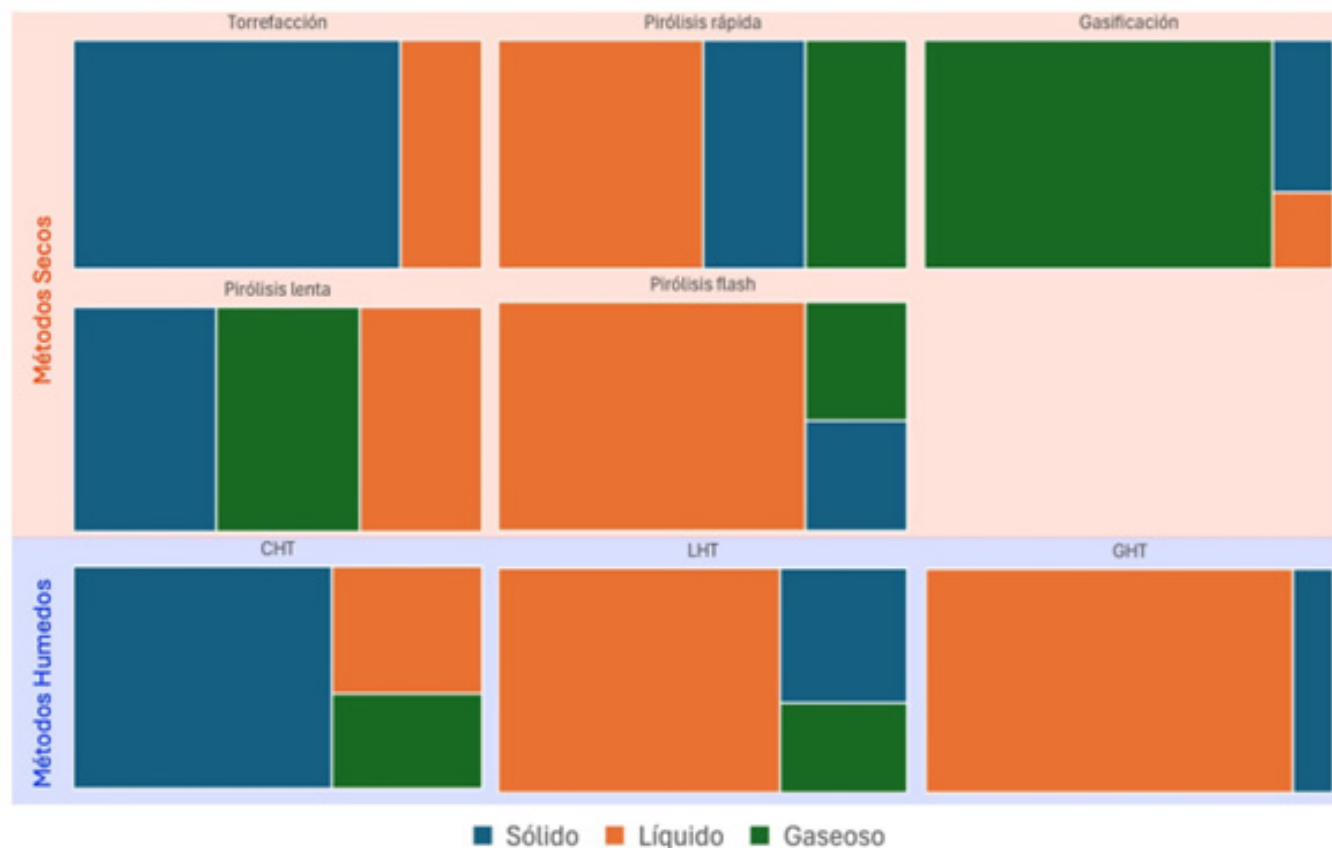


Figura 5. Distribución de los productos obtenidos en los procesos termoquímicos

## Conclusiones

La energía desempeña un papel fundamental en el bienestar socioambiental actual, siendo crucial para el desarrollo económico y la calidad de vida de las comunidades. No obstante, el acceso a una energía asequible, segura y no contaminante sigue representando un desafío. La implementación de energías renovables es crucial para mitigar esta problemática. Entre ellas, la bioenergía, se distingue por no depender de fenómenos meteorológicos y tiene la capacidad de integrarse con otras fuentes de energías renovables intermitentes, generando sistemas energéticos robustos y resilientes.

Debido a las características de la biomasa, la producción de biocombustibles secundarios es necesaria para asegurar su estabilidad fisicoquímica en el tiempo y adecuar sus características a los sistemas actuales de uso de combustibles convencionales. La elección de la tecnología óptima dependerá de las características específicas de la biomasa y del tipo de biocombustible requerido.

En un contexto de sostenibilidad, los distintos tipos de bioenergía, como biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos, desempeñan un rol esencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y disminuir el impacto ambiental.

Por otro lado, el uso de la biomasa para la producción de energía acarrea diversos impactos benéficos tanto ambientales como sociales: la reducción de emisiones netas de gases de efecto invernadero, diversificación de la matriz energética, aumento de empleo en zonas rurales e inversión económica para la implementación de las tecnologías para su transformación, entre otros.

En entornos rurales, la producción y uso de bioenergía puede tener un alto impacto en el entorno. La producción de bioenergía beneficia

directamente a las zonas rurales, donde se concentra la mayor parte de la biomasa disponible para estos procesos. Esto impulsa la generación de empleo en actividades relacionadas con la recolección, procesamiento y transformación de biomasa, y promueve la inversión en infraestructura e inyección de capital en dichas comunidades. Además, este desarrollo no solo mejora las oportunidades económicas, sino que también facilita la diversificación de la matriz energética en territorios urbanos y rurales.

De esta manera, la biomasa se destaca como la única fuente renovable capaz de generar combustibles sólidos, líquidos y gaseosos utilizables en diversos sectores como la producción de calor y electricidad, así como biocombustibles líquidos para el transporte, contribuyendo además a un sistema energético sostenible.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero recibido del Programa de Desarrollo de las Ciencias Básicas (PEDECIBA) y de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) a través del proyecto FCE\_3\_2022\_1\_172592. Valoramos profundamente el tiempo y los comentarios del revisor, los cuales han sido de gran ayuda para fortalecer nuestro trabajo.

## Referencias

- Al-Rumaihi, A., Shahbaz, M., McKay, G., Mackey, H. & Al-Ansari, T. (2022). A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112715. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112715>
- Ballesteros, M. (2018). El papel de la bioenergía en la nueva bioeconomía. *Mediterráneo económico*, 31.

- Banks, S. W. & Bridgwater, A. V. (2016). Catalytic fast pyrolysis for improved liquid quality. En *Handbook of Biofuels Production: Processes and Technologies: Second Edition* (pp. 391–429). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100455-5.00014-X>
- Basu, P. (2013a). Gasification Theory. En Elsevier (Ed.), *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction* (Second Edi, pp. 199–248). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396488-5.00007-1>
- Basu, P. (2013b). Introduction. En *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction* (Second, pp. 1–27). Elsevier.
- Bhaskar, T. & Pandey, A. (2015). Introduction. En *Recent Advances in Thermochemical Conversion of Biomass* (pp. 3–30).
- Borowitzka, M. A. & Moheimani, N. R. (2013). Sustainable biofuels from algae. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18(1), 13–25. <https://doi.org/10.1007/s11027-010-9271-9>
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- Bridgwater, A. V. & Peacocke, G. V. C. (2000). Fast pyrolysis processes for biomass. *Renewable and sustainable energy reviews*, 4(1), 1–73. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(99\)00007-6](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(99)00007-6)
- Brynolf, S., Hansson, J., Anderson, J. E., Skov, I. R., Wallington, T. J., Grahn, M., Korberg, A. D., Malmgren, E. & Taljegård, M. (2022). Review of electrofuel feasibility - Prospects for road, ocean, and air transport. En *Progress in Energy* (Vol. 4, Número 4). Institute of Physics. <https://doi.org/10.1088/2516-1083/ac8097>
- Bustamante García, V., Carrillo Parra, A., Prieto Ruíz, J. Á., Corral-Rivas, J. J., Hernández Díaz, J. C., Bustamante García, V., Carrillo Parra, A., Prieto Ruíz, J. Á., Corral-Rivas, J. J. & Hernández Díaz, J. C. (2016). Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 7(38), 5–23. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-11322016000600005&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322016000600005&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Butler, J. W., Skrivan, W. & Lotfi, S. (2023). Identification of Optimal Binders for Torrefied Biomass Pellets. *Energies* 2023, Vol. 16, Page 3390, 16(8), 3390. <https://doi.org/10.3390/EN16083390>
- Delgado-Plaza, E., Carrillo, A., Valdés, H., Odobez, N., Peralta-Jaramillo, J., Jaramillo, D., Reinoso-Tigre, J., Nuñez, V., Garcia, J., Reyes-Plascencia, C., Tancredi, N., Gallardo, F., Merino, I., León, G., Torres, J., Garcia, C. & Sosa-Tinoco, I. (2023). Key Processes for the Energy Use of Biomass in Rural Sectors of Latin America. En *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Número 1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su15010169>
- Demirbas, A. (2011). Competitive liquid biofuels from biomass. *Applied Energy*, 88(1), 17–28. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.07.016>
- Eling, J., Okot, D. K., Menya, E. & Atim, M. R. (2024). Densification of raw and torrefied biomass: A review. *Biomass and Bioenergy*, 184, 107210. <https://doi.org/10.1016/j.BIOMBIOE.2024.107210>
- FAO. (2004). Energy Definitions. FAO Departments and Offices. <http://www.fao.org/energy/home/definitions/en/>

- Gollakota, A. R. K., Kishore, N. & Gu, S. (2018). A review on hydrothermal liquefaction of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1378–1392. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.178>
- Gonçalves, F. A., Ruiz, H. A., Silvino dos Santos, E., Teixeira, J. A. & de Macedo, G. R. (2016). Bioethanol production by *Saccharomyces cerevisiae*, *Pichia stipitis* and *Zymomonas mobilis* from delignified coconut fibre mature and lignin extraction according to biorefinery concept. *Renewable Energy*, 94, 353–365. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.045>
- Guedes, R. E., Luna, A. S. & Torres, A. R. (2017). Operating parameters for bio-oil production in biomass pyrolysis: A Review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 129(July 2017), 134–149. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.11.019>
- Guo, M., Song, W. & Buhain, J. (2015). Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 712–725. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.013>
- International Energy Agency. (2023). *World Energy Outlook 2023*. [www.iea.org/terms](http://www.iea.org/terms)
- Kang, S., Li, X., Fan, J. & Chang, J. (2013). Hydrothermal conversion of lignin: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 546–558. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.013>
- Kruse, A. (2009). Hydrothermal biomass gasification. *En Journal of Supercritical Fluids* (Vol. 47, Número 3, pp. 391–399). <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2008.10.009>
- Kruse, A. & Dahmen, N. (2015). Water - A magic solvent for biomass conversion. *Journal of Supercritical Fluids*, 96, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2014.09.038>
- Kruse, A. & Dahmen, N. (2018). Hydrothermal biomass conversion: Quo vadis? *The Journal of Supercritical Fluids*, 134, 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.12.03>
- Kumar, M., Olajire Oyedun, A. & Kumar, A. (2018). A review on the current status of various hydrothermal technologies on biomass feedstock. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1742–1770. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.270>
- Li, Y., Chen, Y. & Wu, J. (2019). Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: A review. *En Applied Energy* (Vol. 240, pp. 120–137). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.243>
- Ma, Z., Yang, Y., Wu, Y., Xu, J., Peng, H., Liu, X., Zhang, W. & Wang, S. (2019). In-depth comparison of the physicochemical characteristics of bio-char derived from biomass pseudo components: Hemicellulose, cellulose, and lignin. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 140, 195–204. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.03.015>
- Mukherjee, A., Patra, B. R., Podder, J. & Dalai, A. K. (2022). Synthesis of Biochar From Lignocellulosic Biomass for Diverse Industrial Applications and Energy Harvesting: Effects of Pyrolysis Conditions on the Physicochemical Properties of Biochar. *Frontiers in Materials*, 9, 870184. <https://doi.org/10.3389/FMATS.2022.870184/BIBTEX>

- Musso, M., Veiga, S., Perdomo, F., Rodríguez, T., Mazzei, N., Decarlini, B., Portugau, P. & Bussi, J. (2024). Hydrogen production via steam reforming of small organic compounds present in the aqueous fraction of bio-oil over Ni-La-Me catalysts (Me = Ce, Ti, Zr). *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(2), 2421–2437. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02296-x>
- NASA. (2024). Dióxido de Carbono. <https://climate.nasa.gov/en-espanol/signos-vitales/dioxido-de-carbono/?intent=111>
- Pavlovic, I., Knez, Z. & Skerget, M. (2013). Hydrothermal Reactions of Agricultural and Food Processing Wastes in Sub- and Supercritical Water: A Review of Fundamentals, Mechanisms, and State of Research. *Jurnal of Agricultural and Food Chemistry*, 61, 8003–8025.
- Renewable Energy Agency, I. (2023). Renewable energy and jobs: Annual review 2023. [www.irena.org](http://www.irena.org)
- Ribeiro Nunes, L. J., de Oliveira Matias, J. C. & da Silva Catalao, J. P. (2018). Introduction. En *Torrefaction of Biomass for Energy Applications* (pp. 1–43). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-04530-0>
- Ruiz, H. A., Rodríguez-Jasso, R. M., Fernandes, B. D., Vicente, A. A. & Teixeira, J. A. (2013). Hydrothermal processing, as an alternative for upgrading agriculture residues and marine biomass according to the biorefinery concept: A review. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 21, pp. 35–51). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.069>
- Sansaniwal, S. K., Rosen, M. A. & Tyagi, S. K. (2017). Global challenges in the sustainable development of biomass gasification: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 23–43. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.215>
- Sigaar, C. (2014). Hydrothermal liquefaction of waste biomass. Optimizing reaction parameters. [Tesis de doctorado]. Aarhus University.
- Smith, M. & Keener, H. (2011). Hydrothermal Liquefaction. *Manure Processing Technologies*, 1–10.
- Tajuddin, N. A., Lee, A. F. & Wilson, K. (2016). Production of biodiesel via catalytic upgrading and refining of sustainable oleagineous feedstocks. En *Handbook of Biofuels Production: Processes and Technologies: Second Edition* (pp. 121–164). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100455-5.00006-0>
- Trninić, M., Dalkılıç, K., Yangın-Gömeç, Ç., Sinisgalli, E., Attard, G., Gargiulo, V., Vučurović, V., Bajić, B. & Striugas, N. (2023). Waste biorefinery technologies for accelerating sustainable energy processes (WIRE).
- United Nations. (2023). Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. [https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023\\_Spanish.pdf](https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf)
- United Nations Environment Programme. (2019). La Alianza del Pacífico y el Medio Ambiente: Hacia un modelo de Desarrollo Sostenible basado en el Crecimiento Verde. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/29026>

Wang, T., Zhai, Y., Zhu, Y., Li, C. & Zeng, G. (2018). A review of the hydrothermal carbonization of biomass waste for hydrochar formation: Process conditions, fundamentals, and physicochemical properties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 223–247. <https://doi.org/10.1016/j.RSER.2018.03.071>

Manuscrito recibido: 9 de agosto de 2024

Recepción del manuscrito corregido: 11 de noviembre de 2024

Manuscrito aceptado: 19 de noviembre de 2024

Wang, Yun, Wang, H., Lin, H., Zheng, Y., Zhao, J., Pelletier, A. & Li, K. (2013). Effects of solvents and catalysts in liquefaction of pinewood sawdust for the production of bio-oils. *Biomass and Bioenergy*, 59, 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.10.022>

Wang, Yuzhuo & Wu, J. J. (2023). Thermochemical conversion of biomass: Potential future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 187, 113754. <https://doi.org/10.1016/j.RSER.2023.113754>

World Bioenergy Association. (2016). *Global Biomass Potential Towards 2035*.

Xiu, S. & Shahbazi, A. (2012). Bio-oil production and upgrading research: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 4406–4414. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.028>

Zhang, Y. (2010). Hydrothermal Liquefaction to Convert Biomass into Crude Oil. En H. Blaschek, T. Ezeji & S. Jürge (Eds.), *Biofuels from Agricultural Wastes and Byproducts* (pp. 201–232). Blackwell.

Zhu, Z., Toor, S. S., Rosendahl, L. & Chen, G. (2014). Analysis of Product Distribution and Characteristics in Hydrothermal Liquefaction of Barley Straw in Subcritical and Supercritical Water. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33(3), 737–743. <https://doi.org/10.1002/ep.11977>