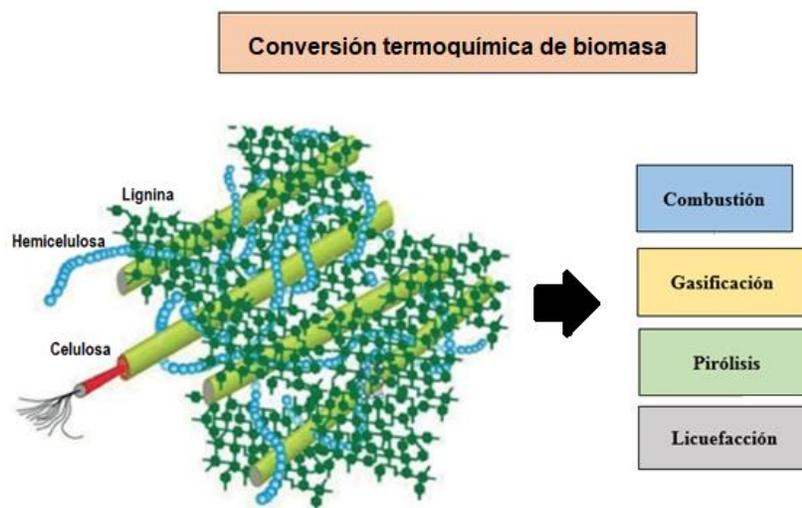


Natalia Afanasjeva^{1*}, Luis C. Castillo¹, Juan C. Sinisterra¹

¹ Departamento de Química, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad del Valle, Calle 13 # 100-00, Cali-Colombia

Corresponding author: natalia.afanasjeva@correounivalle.edu.co

Graphical abstract**Biomasa Lignocelulósica. Parte I: Transformación de biomasa****Resumen**

La biomasa lignocelulósica es una fuente prometedora de energía renovable y productos químicos valiosos. Este tipo de biomasa puede ser convertida en formas útiles de energía como combustibles y productos químicos a través de procesos bioquímicos o termoquímicos. Dentro de los procesos termoquímicos, la pirólisis ha recibido un creciente interés en los últimos años. El líquido condensado obtenido a través de la pirólisis se conoce como bioaceite, a partir del cual se pueden obtener valiosos productos químicos. Químicamente, este líquido es una mezcla compleja de compuestos orgánicos (fenoles, ácidos carboxílicos, alcoholes, cetonas, moléculas heterocíclicas entre otros) formados a través de la descomposición termoquímica de celulosa, hemicelulosa y lignina. En este artículo, se hace una revisión de los tipos de biomasa existentes, haciendo un énfasis en la biomasa de bagazo de caña de azúcar, que es la biomasa que más se produce no solo en la región del Valle del Cauca, en Colombia y en el mundo. También se revisan los procesos de conversión de biomasa.

Palabras claves

Biomasa
Pirólisis
Biogás
Bioaceite
Bagazo de caña de azúcar

Lignocellulosic biomass. Part I: Biomass transformation

Abstract

Lignocellulosic biomass is a promising source of renewable energy and valuable chemical products. This type of biomass can be converted into useful forms of energy such as fuels and chemical products through biochemical or thermochemical processes. Within thermochemical processes, pyrolysis has received increasing interest in the last few years. The condensed liquid obtained through pyrolysis is popularly known as bio-oil, from which valuable chemical products can be obtained. Chemically, this liquid is a complex mixture of simple organic (phenols, carboxylic acids, alcohols, cetones, heterocyclic molecules among other) formed through the thermochemical decomposition of cellulose, hemicellulose and lignin. In this paper, a review of the existing types of biomass is made, with an emphasis on sugarcane bagasse biomass, which is the biomass that is most produced not only in the Valle del Cauca region, in Colombia and in the world. The processes of biomass conversion are also reviewed.

Keywords

Biomass
Pyrolysis
Bio-oil
Biogas
Bio-charcoal
Sugarcane bagasse

Received: 01-09-2017

Accepted: 05-10-2017

Publishing date: 15 - Nov - 2017

Revision Code: 20170201-MFMC [Pag. 27-43]

Corresponding author:

natalia.afanasjeva@correounivalle.edu.co



Biomasa Lignocelulósica. Parte I: Transformación de biomasa

Natalia Afanasjeva^{1*}, Luis C. Castillo¹, Juan C. Sinisterra¹

¹ Departamento de Química, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad del Valle, Calle 13 # 100-00, Cali-Colombia

Corresponding author: natalia.afanasjeva@correounivalle.edu.co

Resumen

La biomasa lignocelulósica es una fuente prometedora de energía renovable y productos químicos valiosos. Este tipo de biomasa puede ser convertida en formas útiles de energía como combustibles y productos químicos a través de procesos bioquímicos o termoquímicos. Dentro de los procesos termoquímicos, la pirólisis ha recibido un creciente interés en los últimos años. El líquido condensado obtenido a través de la pirólisis se conoce como a partir del cual se pueden obtener valiosos. Químicamente, este líquido es una mezcla compleja de compuestos orgánicos (fenoles, ácidos carboxílicos, alcoholes, cetonas, moléculas heterocíclicas entre otros) formados a través de la descomposición termoquímica de celulosa, hemicelulosa y lignina. En este artículo, se hace una revisión de los tipos de biomasa existentes, haciendo un énfasis en la biomasa de bagazo de caña de azúcar, que es la biomasa que más se produce no solo en la región del Valle del Cauca, en Colombia y en el mundo. También se revisan los procesos de conversión de biomasa.

Palabras Claves

Biomasa
Pirólisis
Bioacrudo
Biogás
Biocoque
Bagazo de caña de azúcar

Contenido

1. Introducción
2. Biomasa: Contexto mundial y local
3. Biomasa residual: Descripción y clasificación
 - 3.1. Biomasa residual forestal
 - 3.2. Biomasa residual agrícola
 - 3.3. Biomasa residual industrial
 - 3.4. Biomasa residual urbana
4. Estudio de caso: Biomasa de bagazo de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*)
5. Procesos de conversión de biomasa
 - 5.1. Procesos termoquímicos
 - 5.1.1. Combustión directa de biomasa
 - 5.1.2. Gasificación de biomasa
 - 5.1.3. Licuefacción de biomasa
 - 5.2. Procesos bioquímicos
 - 5.2.1. Fermentación de biomasa
 - 5.2.2. Digestión anaeróbica de biomasa
 - 5.3. Procesos químicos

1. Introducción

Se entiende por biomasa "Biomasa es material biológico que incluye cualquier material distinto de los combustibles fósiles que es o fue un organismo o componente vivo o producto de un organismo vivo" (ASTM D5864; D7463; D7719; D4175-17b). La biomasa representa el material renovable más abundante en el mundo, y es la alternativa más prometedora para la generación de energía térmica, por ejemplo, biocombustibles, y para el remplazo gradual de materiales no renovables generadores de energía (por ejemplo, carbón, gas y petróleo). Por otro lado, la biomasa es considerada una fuente renovable para la generación de energía renovable (Alvarez, 2011), lo que, en términos de gran resonancia actual como el calentamiento global, le otorga una ventaja de gran interés frente al uso de los combustibles fósiles asociado a la producción de gases de efecto invernadero. La biomasa se considera como una fuente natural de energía congruente con el concepto de "carbón neutral" (Fernandez, 2015). El concepto de carbón neutral, o huella de carbono neta cero, hace referencia a la producción indirecta de emisiones netas de carbono igual a cero al lograr equilibrar la cantidad de carbono liberado (generación de CO₂) con una cantidad equivalente inmovilizada o compensada mediante estrategias económicas como los créditos de carbono. Un ejemplo, de cultivos direccionados al secuestro de carbono en Colombia es el de Teca o *Tectona grandis* (Mercado et al., 2016). Así, la biomasa puede ser entendida como un recurso de uso bidireccional, siendo una fuente de almacenamiento de energía transformable y aprovechable, y al mismo tiempo, la resultante de un mecanismo natural de disminución del impacto de emisiones de CO₂ y otros gases invernadero.

El hecho de que los recursos fósiles sean no renovables, finitos, emisores de gases como resultado de su gran demanda, hace que sea necesario dirigir la atención hacia recursos renovables, como la biomasa, capaces de permitir un desarrollo sostenible y que permitan satisfacer la demanda energética y de materias primas (Cai et al., 2017; Wang et al., 2017).

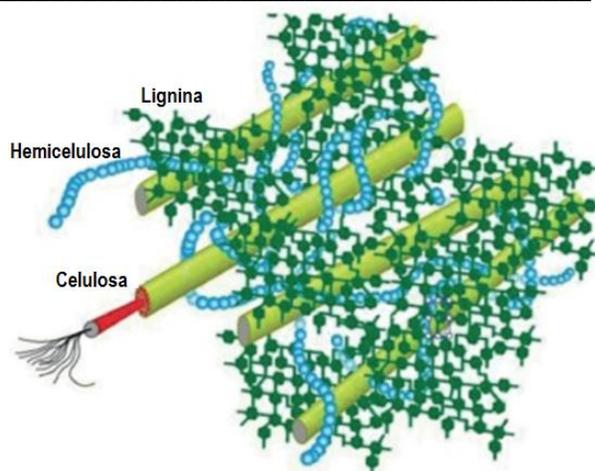


Figura 1. Representación de la celulosa, hemicelulosa y lignina en las células vegetales (Wang et al., 2017)

Desde un punto de vista más composicional, la pared celular de las células constitutivas de la biomasa lignocelulósica se compone de tres componentes principales: celulosa, hemicelulosa y lignina, con una pequeña cantidad de sólidos extractivos y cenizas (ver Figura 1). La celulosa forma microfibras que funcionan como el esqueleto de la pared celular, el espacio interior está lleno de hemicelulosa y lignina las cuales se encuentran conectadas con la celulosa a través de enlaces de hidrógeno, mientras que las conexiones entre hemicelulosa y lignina incluyen enlaces covalentes (Wang et al., 2017).

La composición elemental en base seca de la biomasa corresponde a un 30-40 % de oxígeno, 30-60% de carbono, 5-6% de hidrógeno y un pequeño contenido de ceniza. Entre los elementos inorgánicos se incluyen nitrógeno, cloro, y azufre, que en conjunto conforman menos del 1% de la biomasa (Kumar et al., 2017).

La biomasa lignocelulósica puede clasificarse de diferentes formas, por ejemplo, biomasa a base de madera, no maderera que incluye residuos agrícolas, bagazo de caña de azúcar, gramíneas, fibra de algodón etc. Entre los diferentes tipos de biomasa lignocelulósica los cultivos de rotación corta como hierbas tienen muy altos rendimientos, esto es, de hasta 40 Mg/ha-año, en comparación con las materias primas de maíz que tienen rendimiento de

7 Mg/ha-año. Se ha visionado que, en un futuro, estas plantas de crecimiento rápido pueden ser dirigidos como potenciales cultivos energéticos debido a su alta productividad por hectárea, su abundancia, disponibilidad, utilización completa de las plantas, alto porcentaje de celulosa y hemicelulosa total y comparativamente mas bajo contenido de lignina (Mohapatra et al., 2017).

En general, se puede transformar la biomasa en combustibles y productos químicos a través de procesos bioquímicos o termoquímicos de conversión de biomasa. Entre estas alternativas, existe la propuesta de la digestión (anaeróbica y aeróbica) y la fermentación son procesos bioquímicos típicos utilizados para producir metano y alcoholes (Kwietniewska y Tys, 2014). Por otro lado, los principales procesos termoquímicos incluyen la pirólisis, la gasificación, la combustión y la licuefacción (Goyal et al., 2008). Entre estas propuestas termoquímicas, la pirólisis, que es la descomposición térmica de compuestos orgánicos de la biomasa en ausencia de oxígeno, se ha desarrollado ampliamente como una plataforma prometedora para producir combustibles y productos químicos de diversos tipos de biomasa (Afanasjeva y Gonzalez, 2012). Sin embargo, aunque se ha logrado un progreso rápido en el campo de pirólisis de la biomasa, aún quedan varias barreras y desafíos por superar relacionados con las limitaciones en la eficiencia energética, pre-tratamiento de la materia prima para eliminar la humedad y disminuir el tamaño de partículas, confiabilidad de reactores, procesos y baja calidad del producto.

Los objetivos de la presente revisión es resaltar la importancia de la biomasa como fuente de energía renovable, destacar las principales características que ésta puede tener en términos de su origen, y suministrar una visión general de las propiedades más importantes de la transformación de biomasa para la obtención de energía mediante el proceso de pirólisis.

2. Biomasa: Contexto mundial y local

La gran importancia de la biomasa como recurso radica en que está ampliamente disponibles en la naturaleza. Se estima que la producción mundial de biomasa es de aproximadamente 100 mil millones de toneladas por año. Como el único recurso renovable de carbono, la biomasa tiene el potencial

para producir calor, electricidad, combustibles, productos químicos y otros productos. La Agencia Internacional de Energía (AIE) sugiere que la bioenergía tendrá el potencial de proporcionar un 10% del suministro de energía primaria del mundo en 2035, y para 2050, podría reemplazar los biocombustibles hasta en un 27 % del combustible para el transporte mundial y en un 17 % la electricidad a nivel mundial (Coordinación de ER, 2008; Estrada, 2017).

En la actualidad, la utilización de la biomasa a nivel mundial es en un 75 % para uso doméstico tradicional y en un 25 % para uso industrial. Dicho uso de biomasa para la producción de energía ha tenido un crecimiento continuo. Estados Unidos es el país líder en generación de electricidad a partir de biomasa con una producción de 59,9 TWh (2013), el segundo país en producir mayor energía al año a partir de biomasa en el mundo es Alemania, con 47,9 TWh (2013), cifra que representó un 8,0% de su consumo final de electricidad para tal año. Entre tanto, Brasil está muy a la par con Alemania con un 8,1% de su electricidad producida a partir de biomasa (Estrada y Marín, 2017). En Brasil, el 45% de la energía proviene de fuentes renovables. Con relación a la energía de fuentes fósiles, el mundo se abastece de un 81 %, entre petróleo, carbón y gas natural, y en Brasil es del 53 %; Así mismo, en Brasil, la producción de energía a partir de la biomasa se ha incrementado, especialmente a partir de los derivados de la caña de azúcar (etanol, bagazo y paja de caña) (Martínez, 2014; Estrada y Marín, 2017).

Por otro lado, Finlandia es el país que más emplea la energía procedente de biomasa sólida, la cual supone el 30 % de su consumo total de energía primaria y aproximadamente el 20 % de su producción de electricidad. La abundancia de recursos boscosos y el alto nivel de experiencia en el manejo de la cadena forestal y las fortalezas del sector industrial ubican a Finlandia como pionero en bioeconomía a nivel mundial. Se ha documentado que el objetivo de la “Estrategia de Bioeconomía de Finlandia” es generar un producto a partir de la bioeconomía de 100 billones de euros en 2025 y crear 100.000 nuevos puestos de trabajo. Actualmente, se estima que el sector bioenergético en Finlandia tiene un volumen de facturación de 60 billones y emplea 300.000 personas (Marco et al., 2017; Red mundial de políticas en energía renovable, 2016)

La proporción de uso de la bioenergía en Suecia es uno de los más grandes de Europa. De acuerdo con la Directiva de Energía Renovable, el 49 % de la energía consumida en Suecia deberá basarse en fuentes renovables para el año 2020. Ya se ha alcanzado este objetivo en 2012 y en 2013 se aprobó una participación del 50 % (Ghaffariyan et al., 2017). En Chile, la biomasa representa el 43 % de las fuentes de energía renovables no convencionales y constituye uno de los principales contribuyentes de la energía a la red nacional (Chamy, 2007 y Flandes, 2012). En 2015, se reportó que las tres principales compañías forestales chilenas tuvieron una producción más de 9.000 GWh de energía de alrededor de 6,7 millones de toneladas de residuos forestales, con un excedente promedio de 20 % que se exporta a la red nacional (Ghaffariyan et al., 2017). El Departamento de Energía de Estados Unidos en 2011 estima que 40 millones de los residuos forestales está disponible después de la extracción de madera cada año. Hay dos fuentes principales de biomasa en el sudeste de este país. La primera fuente principal de biomasa forestal son los residuos de fábricas; y la segunda fuente son los residuos de cosecha.

Entre los países asiáticos, China es un gran país agrícola y uno de los más abundantes recursos de paja en el mundo, produciendo más de 620 millones de toneladas en 2002, la cual representa alrededor del 33-45 % del consumo de energía de subsistencia en las zonas rural (Ghaffariyan et al., 2017).

Por otro lado, en Colombia, se ha reportado la generación de aproximadamente 21000 ton/día de biomasa sólida procedente de las actividades residenciales, comerciales e institucionales, con un porcentaje de material orgánico de 56,44 % (Hernández et al., 2010). Colombia es un país que goza de una matriz energética relativamente rica tanto en combustibles fósiles como en recursos renovables, pero dado que su consumo está basado en un 78 % de recursos primarios de origen fósil, debe tenerse en cuenta que dicha demanda está prevista para ser cubierta por la oferta doméstica tan solo por el orden de 7 años más para el caso del petróleo y 15 años más para el caso del gas natural. Actualmente, la explotación y producción energética del país está constituida a grandes rasgos en un 93 % de recursos primarios de origen fósil, aproximadamente un 4 % de hidroenergía y un 3 % de biomasa y residuos (ver Figura 2). Así, la biomasa combinada con tecnologías modernas

permite tanto la producción de electricidad como la producción de calor. La producción de calor y su uso para fines de transporte a partir de biomasa está más desarrollada que la producción de electricidad, especialmente a partir de bagazo de caña azúcar (más exactamente el uso energético de bagazo de caña de azúcar para la generación de la energía corresponde a un 1,3 % del total). A nivel industrial, la bioenergía es producida a partir de bagazo de caña, madera seca, carbón vegetal, residuos de palma de aceite y arroz, representando un 11% del total de energía final utilizada (Estrada y Marín, 2017).

En las Tablas 1 y 2 se muestran los productos principales generadores de biomasa en Colombia con sus potenciales energéticos.

3. Biomasa residual: Descripción y clasificación

La biomasa residual hace referencia a los subproductos que se derivan de las transformaciones naturales o industriales que se llevan a cabo en la materia orgánica. Algunos ejemplos de biomasa residual son los residuos de las cosechas, las podas de zonas verdes, los efluentes ganaderos, los lodos de los sistemas de tratamiento de aguas residuales y los residuos orgánicos de plazas de mercado (Shuit et al., 2009; Li et al., 2017; Hernández et al., 2010 Corporación Ruta, 2016). Este tipo de biomasa puede clasificarse respecto a su origen en: biomasa forestal, biomasa agrícola, biomasa industrial y biomasa urbana (Shuit et al., 2009; Li et al., 2017; Hernández et al., 2010 Corporación Ruta, 2016; Ghaffariyan et al., 2017). En la siguiente Tabla 3 se muestran algunos tipos de biomasa residual clasificados según su origen y sus principales características físicas.

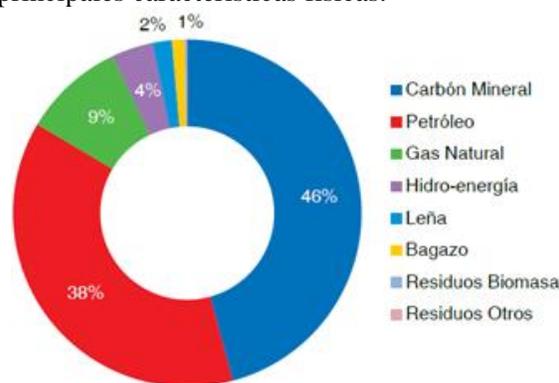


Figura 2. Explotación y producción en Colombia de recursos energéticos primarios en el año 2012 (Estrada y Marín, 2017).

Tabla 1. Residuos agrícolas con sus potenciales energéticos (Estrada y Marín, 2017).

Cultivo	Cantidad de producto en ton. (2012)	Residuo agrícola	Cantidad de residuos en ton (2012)	Potencial energético (TJ/año)
Palma	1137984	Cuesco	246714	3428
		Fibra	712946	8845
		Raquis	1206490	8622
Caña de azúcar	2681348	RAC	8741194	42761
		Bagazo	7186013	78814
Caña panelera	1284771	Bagazo	4817888	52841
		RAC	3250469	15901
Café	1092361	Pulpa	2327929	8354
		Cisco	224262	3870
		Tallos	3303299	44701
Maíz	1206467	Rastrojo	1126840	11080
		Tusa	325746	3389
		Capacho	254564	3863
Arroz	2318025	Tamo	5447359	19476
		Cascarilla	463605	6715
Banano	1834822	Raquis	1834822	788
		Vástago	9174108	5172
		Rechazo	275223	484
Plátano	3201476	Raquis	3201476	1374
		Vástago	16007378	9024
		Rechazo	480221	844

Tabla 2. Residuos pecuarios con sus potenciales energéticos (Estrada y Marín, 2015).

Residuos pecuarios	Cantidad de residuos en ton (2012)	Potencial energético
Bovino	99168608	84256
Avícola	3446348	29183
Porcino	2803111	4308

Tabla 3. Tipos de biomasa residual (Hernández et al., 2010).

Tipo de Biomasa Residual	Tipo de residuo	Características físicas
Residuos forestales	Restos de aserrío: corteza, aserrín, astillas	Polvo, sólido, HR >50%
	Restos de ebanistería: aserrín, trozos, astillas	Polvo, sólido, HR >30%
	Restos de plantaciones: ramas, corteza, raíces	Sólido, HR ¹ >50%
Residuos agropecuarios	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales	Sólido muy húmedo
	Cáscara y polvo de granos secos	Polvo, sólido, HR >25%
	Estiércol	Sólido muy húmedo
Residuos industriales	Tallos, hojas, cáscaras, maleza, pastura	Sólido, HR ¹ >55%
	Pulpa y cascara de frutas y vegetales	Sólido algo húmedo
	Residuos de procesamiento de carnes	Sólido muy húmedo
	Aguas de lavado de carne y vegetales	Líquido
Residuos urbanos	Grasas y aceites vegetales	Líquido grasoso
	Aguas negras	Líquido
	Desechos domésticos orgánicos	Sólido muy húmedo
	Basura orgánica	Sólido muy húmedo

HR: Humedad relativa

3.1 Biomasa residual forestal

Los residuos de biomasa forestal constituyen una importante fuente de biomasa residual. Este tipo de biomasa proviene esencialmente de leña y madera empleada en procesos industriales. Dentro de estos tipos de residuos, tenemos restos de tala como resultado de las operaciones de explotación de la madera y residuos del procesamiento de la madera, como por ejemplo, madera aserrada, madera contrachapada, papel, entre otros (Cutz et al., 2016). La biomasa forestal como recurso natural ha mostrado mayor atención desde el punto de vista de la planificación para generar desarrollo en el área energética, lo cual representa una fuente de energía renovable ampliamente disponible. De ahí que generar mapas de biomasa para estos fines es necesario para apoyar la gestión sostenible de los bosques y de este modo avanzar en la identificación y zonificación de áreas que produzcan una oferta constante de biomasa residual forestal generada en forma de post manejo (corteza, hojas, trozos de madera, etc.) (Álvarez y Cortés, 2011; Chamy y Vivanco, 2007). Un punto de inflexión en contra de la biomasa residual forestal es que, en función de su rentabilidad, puede promover la tala de bosques nativos, selvas tropicales y reconfiguración del uso del suelo a favor de uso predominantemente industrial. Lo que sugiere que políticas de control y eco-dirigidas son deseables para hacer frente a escenarios negativos como los anteriormente expuestos.

Actualmente la mayor parte de los residuos forestales procede de cortes finales. En estos casos el material está compuesto por ramas, despuntes, hojas y acículas. Los tratamientos más comunes de biomasa residual son la quema controlada o el amontonamiento del material en el campo (Flandes, 2012). Los grandes volúmenes de biomasa forestal constituyen un real potencial de combustible mediante el uso de tecnología actualmente disponible. La generación de energía eléctrica a partir de estos residuos abre la oportunidad de su aprovechamiento energético masivo, dado el desarrollo de las tecnologías forestales y de combustión. Estos residuos forestales aún no han sido utilizados de forma eficaz básicamente por dificultades técnicas en su extracción, manipulación y transporte, como también, por la insuficiente información sobre la cantidad y calidad de estos residuos, y un conocimiento limitado de su

potencial uso energético por parte del ente generador de los residuos.

Por otra parte, es importante indicar que la biomasa residual forestal ha sido la más explotada en el mundo con fines energéticos y posiblemente lo siga siendo durante varias décadas. La explotación forestal para la generación de energía por combustión de biomasa se ha tecnificado ostensiblemente, y ha evolucionado para el aprovechamiento de cualquier otro residuo resultante, en consecuencia, los impactos negativos desde el punto de vista ambiental son muy altos ya que promueve el consumo de material forestal a gran escala, y se debe tener presente que la biomasa de los bosques realiza una tasa alta de fijación de N_2 y CO_2 ; y ante su reducción se promueve un incremento de CO_2 atmosférico y se fortalece el calentamiento global (Martínez, 2014).

3.2 Biomasa residual agrícola

Este tipo de biomasa incluye todo material vegetal producido en las explotaciones agrícolas, y está conformado por los subproductos que se generan durante los procesos de recolección y transformación de las cosechas, definidos como residuos agrícolas de cosecha y residuos agroindustriales. Dentro de los cultivos más comunes que generan este tipo de biomasa se encuentran los cultivos de arroz, algodón, maíz, banano, café, caña de azúcar, caña panelera, palma de aceite y plátano (Hernández et al., 2010). En la misma categoría se incluyen los residuos de cultivos leñosos como los restos generados al podar olivos, viñedos y frutales y los residuos de los cultivos herbáceos como la paja de cereal, los restos del cultivo del algodón, etc. (López et al., 2008). Según la composición química de carbohidratos presentes, y de los compuestos más abundantes en la biomasa residual agrícola, se puede clasificar en: (a) Biomasa lignocelulósica (en esta predominan la celulosa, hemicelulosa y lignina), (b) biomasa amilácea (en esta predominan los hidratos de carbono como el almidón y la inulina así como también los polisacáridos de reserva en los vegetales), (c) biomasa azucarada (donde predominan los monosacáridos como glucosa y fructuosa y el disacárido sacarosa) y (d) biomasa energética (incluye los materiales de origen biológico que no pueden usarse con fines alimenticios, la biomasa cubre actualmente el 14% de las necesidades energéticas mundiales) (Martínez, 2014).

La disponibilidad de este último tipo de biomasa depende de la época de recolección y de la variación de la producción agrícola, por lo que es recomendable la existencia de centros de acopio de biomasa donde centralizar su distribución. Se caracteriza por su producción dispersa a nivel de territorio y su baja densidad, lo que provoca elevados costos logísticos para su aprovisionamiento. El pretratamiento necesario para su densificación (empacado, astillado, etc.) supone un coste adicional, pero consigue un costo por transporte más económico. Es importante indicar que estas dos características son los obstáculos más importantes para lograr la viabilidad técnica y económica de su aprovechamiento energético (López et al., 2008)

3.3 Biomasa residual industrial

En este tipo de biomasa se incluyen los subproductos derivados de los procesos de producción industrial de productos agroalimentarios, como el bagazo de caña de azúcar, cáscara de arroz, orujo y orujillo de aceituna, etc. Al igual que en el caso anterior, esta biomasa se encuentra concentrada allí donde se genera, suele ser contaminante y en muchas ocasiones tiene un elevado contenido de humedad, por lo que su secado supone un coste adicional (López et al., 2008). También dentro de este grupo se encuentran las aguas residuales de industrias agroalimentarias que se generan en conserveras, producción de harinas cárnicas y de pescado, azucareras, conserveras de vegetales, vinícolas y lácteas. Por tratarse de vertidos biodegradables, son susceptibles de ser valorizados mediante métodos biológicos debido al alto contenido de materia orgánica que poseen (Chamy y Vivanco, 2007).

La utilización de biomasa residual industrial es, en principio atractiva, pero limitada; en general, es más importante la descontaminación que se produce al eliminar estos residuos que la energía que se puede generar con su aprovechamiento. Sin embargo, las industrias generadoras de este tipo de biomasa pueden ser autosuficientes desde el punto de vista energético ya que aprovechan sus propios residuos, industrias tales como granjas, ingenios azucareros, industrias papeleras, serrerías o depuradoras urbanas son algunos ejemplos. Su disponibilidad depende de las variaciones de la actividad industrial que la genera (Martínez, 2014; López et al., 2008).

3.4 Biomasa residual urbana

La biomasa residual urbana, conocida comúnmente como basura o desperdicios, son los residuos desechados de la vida cotidiana de las personas, generados en los hogares, establecimientos comerciales, instituciones y empresas en las zonas urbanas. El papel usado, cartón, madera prensada, restos de comida, restos de poda, residuos de procesos industriales, residuos agrícolas, residuos mineros, entre otros son constituyentes comunes de este tipo de biomasa. La parte orgánica de estos residuos incluye papel, madera, textiles, cuero, aceite, entre otros, y son la principal materia prima para el proceso de conversión de residuos en energía mediante el uso de diferentes tecnologías, como la incineración, la digestión, la pirólisis y la biotecnología. La parte inorgánica consiste en metales, vidrio, hormigón, mampostería, etc., aunque claramente estos no constituyen biomasa. También, este tipo de biomasa incluye los residuos generados por los alcantarillados, como aguas grises y negras descargadas por las casas y edificios comerciales, residuos líquidos generados por las industrias en la zona urbana, tales como el licor negro generado en la fabricación de papel. En general, la totalidad de la biomasa previamente indicada se puede utilizar y convertirla en energía adecuada para la vida cotidiana de los habitantes de las ciudades y municipios (Li et al., 2017).

La biomasa residual urbana forma parte de un tipo de biomasa que ya existe, no hay que producirla, y cuya eliminación es un problema grave y de solución costosa. Además, se estima que el crecimiento anual en su producción es del 2 al 6%. Por otro lado, también hay que tener en cuenta que este tipo de biomasa está concentrada en lugares determinados, las ciudades, por lo que los costos por concepto de transporte son relativamente muy reducidos.

El poder calorífico de la biomasa de madera urbana es relativamente alto en comparación con otros tipos de biomasa municipal. Productos desechados de la madera, tienen un alto valor calorífico y pueden convertirse en una materia prima importante para la generación de energía. Los residuos verdes municipales también tienen un alto valor calorífico. El contenido de elementos carbono y oxígeno en estos residuos es bastante alto, como resultado del alto contenido de materia orgánica. Además, cuanto mayor sea el contenido de carbono en una la planta,

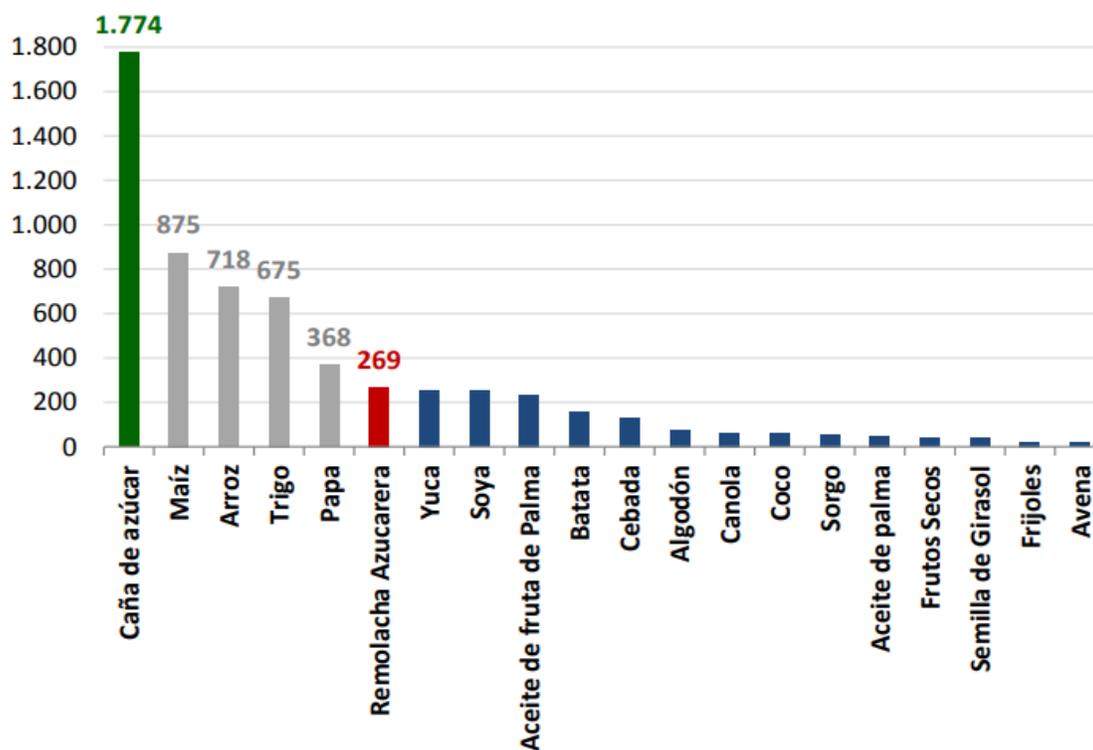


Figura 3. Producción mundial de bienes agropecuarios (millones de toneladas), (Sector Azucarero de Colombia, 2015).

mayor será su valor calorífico (Li et al., 2017).

4. Estudio de caso: Biomasa de bagazo de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*)

La caña de azúcar, *Saccharum Officinarum*, se cultiva en todo el mundo y ha sido considerada como una de las plantas económicas más significativas (Del Rio et al., 2015). Además es una planta con abundantes compuestos fitoquímicos tales como compuestos fenólicos, terpenoides, fitosteroles (Feng et al., 2014) y ligninas (Pinheiro et al., 2017).

La caña de azúcar es el cultivo más grande con respecto a la producción total, ver Figura 3, se cultiva en unos 100 países de todo el mundo para satisfacer las necesidades de azúcar. La producción mundial de caña de azúcar es de aproximadamente 1.800 millones de toneladas generando 68 millones de toneladas de azúcar cada año. Como se observa en la Tabla 4, el mayor productor mundial de caña de azúcar es Brasil que en el 2015 produjo de 739267 miles de toneladas métricas (MTM), las cuales representan el 33 % de la producción mundial total, seguido por India y China (Sherpa et al.,

2017). La lista de otros países productores se extiende a Tailandia, Pakistán, México y Colombia que ocupa el séptimo lugar. Además de producir azúcar, la caña de azúcar es también una de las fuentes más adecuadas de biocombustibles ya que posee el mayor número de las características principales de un cultivo bioenergético (Khan et al., 2017).

Tabla 4. Diez primeros países productores de Caña de azúcar (Patil y Deshannavar, 2017; Nawaz et al., 2017).

Puesto	País	Producción (MTM)
1	Brasil	739267
2	India	341200
3	China	125536
4	Tailandia	100096
5	Pakistán	63750
6	México	61182
7	Colombia	34876
8	Indonesia	33700
9	Filipinas	31874
10	Estados Unidos	27906



Figura 4. Región geográfica azucarera de Colombia (Sector Azucarero de Colombia, 2015).

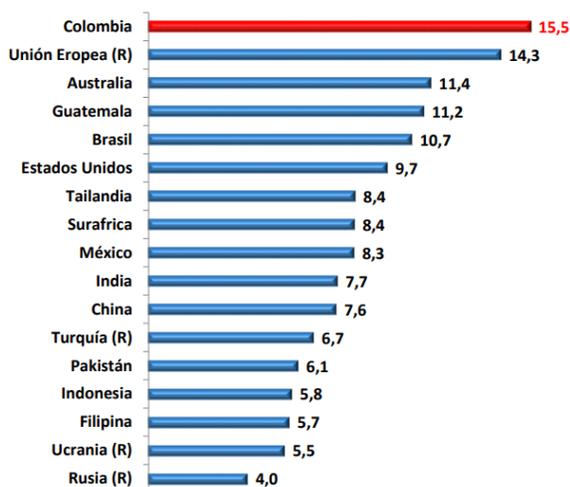


Figura 5. Principales países productores (toneladas de azúcar por hectárea) (Sector Azucarero de Colombia, 2015).

Tabla 5. Composición química del bagazo de caña (Monroy, 2016).

Componentes	Bagazo de caña
Materia seca (%)	48.16
Materia orgánica (%)	92.64
Proteína cruda (%)	1.82
Cenizas (%)	4.10
Carbohidratos solubles (%)	0.79
Fibra detergente neutra (%)	89.07
Fibra detergente ácida (%)	61.18
Celulosa (%)	44.06
Hemicelulosa (%)	32.72
Lignina (%)	13.42

El Sector Azucarero de Colombia está ubicado a lo largo del valle geográfico del río Cauca que abarca los departamentos del Cauca, Valle del Cauca, Risaralda, Quindío y Caldas, ver Figura 4. Esta región azucarera cuenta con las siguientes características: Posee una precipitación media de 1600 mm por año, la oscilación media diaria de temperatura es de 11 °C (entre el día y la noche) y no registra períodos de zafra, es decir, se puede producir durante todo el año. Estas características particulares favorecen el desarrollo de la agroindustria de la caña de azúcar, toda vez que dan las condiciones iniciales para obtener buenos registros en productividad. Esto hace que los 13 ingenios colombianos, sitúen a Colombia como el principal productor de azúcar por hectárea sembrada, ver Figura 5. Pero, además, a partir de los cultivos de caña de azúcar se puede producir una gran cantidad de biomasa debido a que se trata de una planta que tiene un sistema fisiológico del tipo C₄, lo cual no es muy importante en la industria encargada de cristalizar sacarosa a partir del tallo de la caña. Este tipo fisiológico la hace superior a otras plantas económicas en rendimiento agrícola, como el maíz y otros cereales (Triana et al., 2014).

El principal subproducto de la industria de la caña de azúcar es el bagazo, material fibroso que queda después de que la caña de azúcar es molida para extraer su jugo, su producción estimada es de 9 millones de toneladas en los ingenios colombianos y 164 millones de toneladas a nivel mundial por año, y representa el 30 % de la caña molida (Asocaña, 2016; Becerra, 2016). Una parte del bagazo se utiliza como combustible en las calderas para la generación de electricidad dentro de las industrias de etanol y azúcar para su auto sostenimiento energético (Zandersons et al., 1999). Con el fin de crear un valor superior para este exceso de subproducto, se han realizado varios estudios, como la exploración de la conversión de bagazo en productos útiles, tales como petróleo y carbón activado por medio del proceso de pirólisis (Gonzalez 2000; Thomas 2008; Zandersons et al., 1999; Afanasjeva et al, 2012).

El bagazo de caña de azúcar está constituido por tres fracciones principales: celulosa, hemicelulosa y lignina. Químicamente posee un contenido de cenizas muy bajo, cerca del 4.0 %, lo cual hace que el bagazo de caña de azúcar tenga numerosas ventajas para su bioconversión en comparación a otros residuos de cosecha como cascarilla de arroz

y paja de trigo los cuales tienen un contenido de cenizas de 17.5 y 11.0 %, respectivamente. La composición típica del bagazo de caña se muestra en la Tabla 4 (Monroy, 2016).

Dada la relevancia de este tipo de estudios para la industria azucarera, el análisis de la sostenibilidad del aprovechamiento del bagazo de la caña de azúcar, es un motivo para que las entidades aprovechadoras de este subproducto, tanto en cogeneración como en la producción de papel, puedan establecer adecuadamente los usos más eficientes y proponer medidas de mejoramiento en cada proceso en particular (Becerra et al., 2016).

5. Procesos de conversión de biomasa

La biomasa puede ser convertida en combustibles y productos químicos a través de procesos bioquímicos o termoquímicos en formas útiles de energía. La elección del proceso de conversión dependerá del tipo, cantidad y calidad de la biomasa, del tipo de combustible deseado (sólido, líquido o gas), de las especificaciones de uso final, de los requerimientos ambientales, condiciones económicas y de los factores específicos del proyecto. Se pueden establecer tres categorías principales de procesos que pueden convertir la biomasa en gases, mezclas de compuestos orgánicos y combustibles que pueden posteriormente ser

empleados para conseguir los productos energéticos deseados o como materia prima para obtener derivados con potencial valor agregado (Coordinación de Energías Renovables, 2008; Miguez, 2009).

En general, es posible afirmar que existen tres procesos de transformación de biomasa: (a) Procesos termoquímicos, como la combustión (producción de energía, gases de combustión y agua), la pirólisis (bio-oil y biocoque) y gasificación (producción de H₂, CO, CH₄), (b) Procesos de conversión biológica, incluyen la fermentación (bioetanol), y la digestión (biogás: una mezcla principalmente de metano y dióxido de carbono) y (c) Procesos químicos, incluyen la esterificación (biodiesel), y las modificaciones estructurales químicas (reacción de esterificación) (Martínez, 2014).

5.1 Procesos termoquímicos

Los procesos termoquímicos se basan en el uso de altas temperaturas para convertir la biomasa en energía. Son procesos en los cuales se encuentran implicadas reacciones químicas irreversibles que se llevan a altas temperaturas y en un amplio espectro de condiciones de oxidación, ver figura 6 (Miguez, 2009).

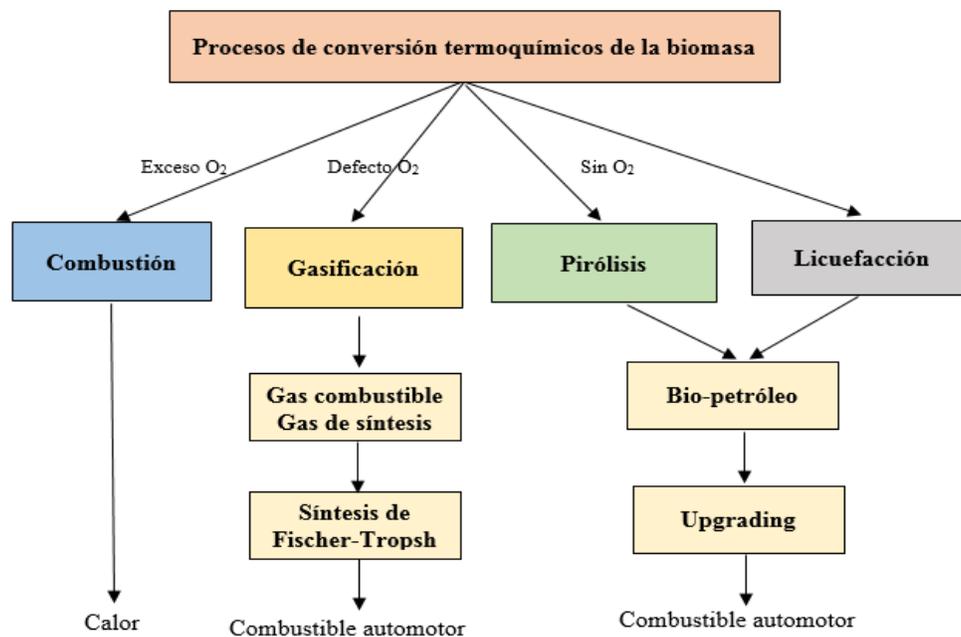


Figura 6. Procesos de conversión térmicos de biomasa (Coordinación de Energías Renovables, 2008).

Estas tecnologías tienen el potencial de producir electricidad, calor, bioproductos y combustibles. Comprenden básicamente combustión, gasificación y pirólisis (Coordinación de Energías Renovables, 2008; Miguez, 2009; Moragues, 2007).

Los procesos termoquímicos de conversión de biomasa en energía se muestran en la Figura 6. Los procesos termoquímicos de biomasa se pueden clasificar según la presencia o ausencia de oxígeno y según los productos obtenidos en: Combustión directa, gasificación, pirólisis y licuefacción.

5.1.1 Combustión directa de biomasa

Desde hace mucho tiempo la biomasa se ha empleado en pequeñas calderas domésticas para generar calor. En general, se trata de sistemas de poca eficiencia energética donde la biomasa requiere de algún tratamiento previo para su aprovechamiento industrial, por lo tanto, es necesario recurrir a grandes instalaciones, basadas en la generación de vapor a alta temperatura y presión donde por medio de turbinas se genera electricidad (Martínez, 2014). La combustión es el quemado de la biomasa en presencia de aire. Este proceso convierte la energía química almacenada de la biomasa en calor, energía mecánica o electricidad dependiendo de los equipos de proceso que se empleen como hornos, calderos, turbinas de vapor, turbogeneradores, etc. La combustión de biomasa produce mezclas de diferentes gases calientes a temperaturas entre 800 y 1000 °C (Coordinación de Energías Renovables, 2008).

5.1.2 Gasificación de biomasa

Es la conversión de la biomasa en una mezcla de gases combustibles por oxidación parcial a alta temperatura, en el rango de 800 a 900 °C. Este proceso se realiza en un recipiente cerrado, conocido como gasógeno, en el cual se introduce el combustible y una cantidad de aire menor a la que se requeriría para su combustión completa. Este proceso de conversión da como resultado una alta proporción de productos gaseosos como CO, CO₂, H₂, CH₄, hidrocarburos de cadena corta y pequeñas cantidades de carbón y ceniza, en proporciones diversas, según la composición de la materia prima y las condiciones del proceso.

En un proceso de gasificación se requieren dos etapas iniciales, una de secado y otra de calenta-

miento de la biomasa, en los cuales se adiciona calor externo al proceso.

Este calor se puede adicionar en forma directa (combustión) o indirecta (transferencia de calor) (Coordinación de Energías Renovables, 2008; Miguez, 2009). En el proceso de gasificación es necesario tener en cuenta el estado de equilibrio termodinámico y químico, y todas las variables relacionadas con: (a) Tipo de biomasa, (b) porcentaje de humedad y (c) poder calorífico. Las reacciones en la gasificación se llevan a cabo a presión atmosférica elevada de hasta 33 bar (480 psi). El oxidante utilizado puede ser aire, oxígeno puro, vapor o una mezcla de estos gases (Martínez, 2014; Fernandez, 2015).

5.1.3 Pirólisis de biomasa

De acuerdo con ASTM, la pirólisis de biomasa consiste en la descomposición fisicoquímica de la materia orgánica bajo la acción del calor y en ausencia de un medio oxidante. La pirólisis es un proceso térmico de conversión en el que se utiliza un material con alto contenido de carbono para producir compuestos más densos y con mayor poder calorífico, que pueden ser empleados como combustibles directamente o luego de un tratamiento posterior. El proceso generalmente empieza a 200 °C y continúa hasta 600 – 700 °C, se obtiene en calidad de producto una combinación variable de combustible sólidos (biochar), líquidos (bio-oil) y gaseosos (biogás), cuyas cantidades relativas dependen de las propiedades de la biomasa a tratar y de los parámetros de operación del equipo) (Coordinación de Energías Renovables, 2008; Miguez, 2009).

5.1.4 Licuefacción de biomasa

El proceso de licuefacción se basa en hidrogenación indirecta. En este proceso las moléculas complejas de celulosa y lignina son fragmentadas por efecto del calentamiento, el oxígeno es removido, y se adicionan al mismo tiempo átomos de hidrógeno. El producto de esa reacción química es una mezcla de hidrocarburos que al enfriarse se condensan en una fracción líquida. En el proceso de licuefacción la biomasa se calienta con vapor y CO, o hidrógeno y CO, a temperaturas que oscilan entre 250 °C y 450 °C, con presiones de 27 MPa y en presencia de un catalizador.

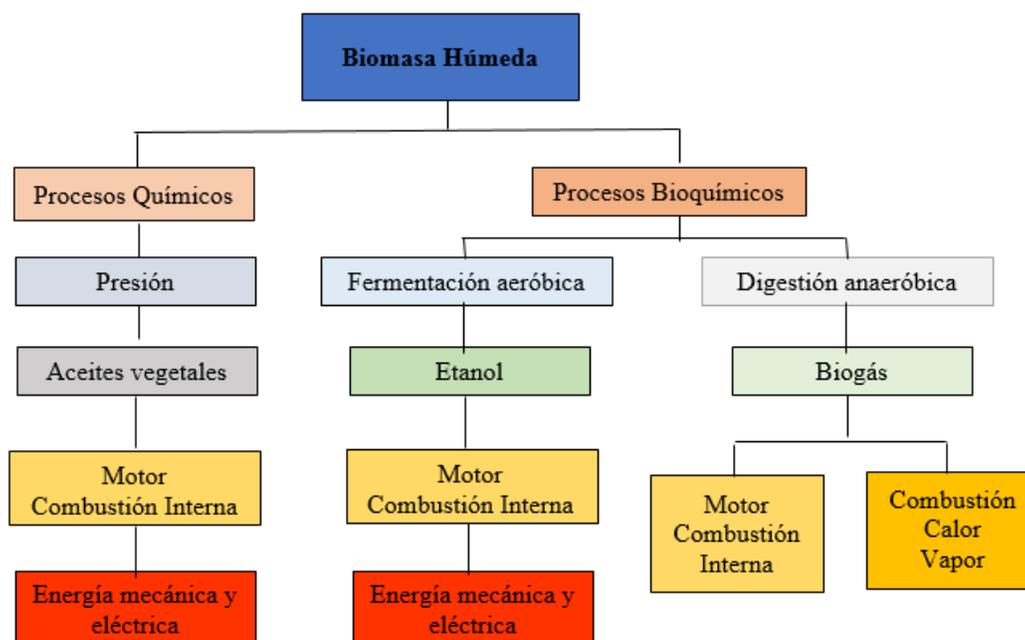


Figura 7. Proceso bioquímico y químico de aprovechamiento de biomasa (Coordinación de Energías Renovables, 2008).

La biomasa no necesita ser seca como en la mayoría de los procesos de gasificación, dado que en el proceso se adiciona agua. La licuefacción de biomasa por hidrogenación se ha logrado a escala pequeña con residuos urbanos, varios residuos agrícolas, pecuarios y forestales, encontrándose este método todavía en etapa de desarrollo (Moragues y Rapallini, 2003).

5.2 Procesos bioquímicos

Los procesos bioquímicos emplean agentes biológicos (microorganismos) para convertir la biomasa en energía almacenable, típicamente en la forma de combustibles líquidos y gaseosos. Sin embargo, estas tecnologías tienen el potencial de producir productos de valor agregado como electricidad, calor, bioproductos y combustibles (Feng, 2017). Pueden dividirse en dos grandes grupos: los que se producen en ausencia de aire (anaeróbicos) y los que se producen en presencia de aire (aeróbicos). Ejemplos de este tipo de procesos son la fermentación (producción de bioetanol) y la digestión (biogás, mezcla de metano y dióxido de carbono), ver figura 7, (Coordinación de Energías Renovables, 2008; Miguez, 2009). Dentro de este proceso hay dos variantes: la fermentación de biomasa y la digestión anaeróbica de biomasa.

5.2.1 Fermentación de biomasa

Es una de las opciones para producir etanol a partir de materias primas ricas en carbohidratos (azúcar, almidón, celulosa, etcétera) de las frutas y vegetales como la caña de azúcar y la remolacha, los cereales (trigo, maíz, sorgo), los tubérculos (papas, yuca) y en general, biomasa lignocelulósica.

Según la Agencia Internacional de Energía, el potencial de esta fuente de energía es considerable, pues se calcula que el bioetanol podría sustituir un 25 % de la gasolina utilizada como combustible en el año 2025 (Martínez, 2014). El etanol producido por fermentación, que además de los usos ampliamente conocidos en medicina y licorería, es un combustible líquido de características similares a los que se obtienen por medio de la refinación del petróleo. El proceso incluye una etapa de trituración y molienda para obtener una pasta homogénea, una etapa de fermentación y una etapa de destilación y rectificación.

5.2.2 Digestión anaeróbica de biomasa

Este proceso se realiza por la acción de bacterias anaeróbicas (bacterias cuyo metabolismo se realiza en ausencia de oxígeno). Estas bacterias se desarrollan muy bien a temperaturas hasta de 30 °C, es un proceso en serie donde se degrada la materia

orgánica en tres etapas fundamentales: Hidrólisis-acidogénesis, homoacetogénesis-acetogénesis y metanogénesis. En la primera etapa actúan bacterias formadoras de ácidos que emplean como materia prima hidratos de carbono, en la segunda etapa están las bacterias formadoras de ácido acético las cuales pueden ser inhibidas por H_2 y en la tercera etapa están las acetofílicas y las hidrogenofílicas que emplean ácido acético, monóxido de carbono e hidrogeno para generar el producto de la digestión que es el biogás, que es una mezcla formada por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), pequeñas cantidades de hidrógeno (H_2), sulfuro de hidrógeno (SH_2) y nitrógeno (N_2). (Martínez, 2014).

El biogás puede ser utilizado como una importante fuente energética en la combustión de motores, en turbinas o calderas utilizados en diferentes usos industriales. Para este proceso, se utilizan generalmente residuos animales o vegetales de baja relación carbono/nitrógeno, empleando un recipiente cerrado tipo digestor. Adicionalmente, la biomasa degradada que queda como residuo del proceso de producción del biogás, constituye un excelente fertilizante para cultivos agrícolas (Chamy, 2007; Coordinación de Energías Renovables, 2008).

5.3 Procesos químicos

Los procesos químicos incluyen modificaciones estructurales químicas de los triglicéridos de los aceites vegetales, reacción de esterificación para la obtención de biocombustible o biodiesel. Hace 80 años, antes de la segunda guerra mundial se introdujo por primera vez el uso de aceites transesterificados como combustible en vehículos pesados en el África. En el proceso de transesterificación para obtener el biocarburante, la mezcla de los aceites orgánicos se combina con alcohol y se altera químicamente para formar un éster etílico o metílico, el cual recibe el nombre de biodiesel. En términos generales, estas moléculas resultantes están compuestas por esteres de ácidos grasos (Forero et al., 2003). La transesterificación es un proceso relativamente sencillo, se lleva a cabo en un reactor donde las sustancias reaccionantes son mezclados a una temperatura y agitación adecuada, en un tiempo determinado para formar la mezcla de esteres (Biodiesel). Para el proceso, generalmente se usa un 20 % de agente esterificante y 0.8 % del catalizador que suele ser hidróxido de sodio. Al

final de la reacción se adiciona ácido acético glacial para evitar que los esteres se hidrolisen. La transesterificación se efectúa a presión atmosférica, una temperatura de reacción de $60\text{ }^\circ\text{C}$ y agitación constante durante el proceso. El éster o biodiesel obtenido presenta una baja viscosidad, con características similares al diésel del petróleo utilizado actualmente, y sin efectos negativos sobre el ambiente (Forero et al., 2003).

6. Conclusiones

La biomasa vegetal a partir de materia prima lignocelulósica es una fuente prometedora de energía renovable y el recurso de biorefinación de productos químicos valiosos como precursores de nuevos materiales, además, se encuentra ampliamente disponibles en la naturaleza. Este tipo de biomasa puede ser convertida en formas útiles de energía como combustibles y productos químicos a través de procesos bioquímicos o termoquímicos, siendo la pirólisis y gasificación uno de los procesos más viables y promisorios para la generación energética.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Dr. Manuel Palencia por la asesoría en la realización de este documento.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Álvarez, O. T., & Cortés, F. P. (2011). Zonificación del potencial energético de la biomasa residual forestal en la cuenca del lago Ranco, Chile. *Bosque*, 32, 77-84.
- Becerra, A. P., Buitrago, A. L., & Pinto, P. (2016). Sostenibilidad del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca, Colombia. *Ingeniería Solidaria*, 12(20), 133-149.
- Bernardo, E. C. (1997). Decolorization of molasses wastewater using. *Pergamon*, 35(9), 0-4.
- Cai, J., He, Y., Yu, X., Banks, S. W., Yang, Y., Zhang, X., et al. (2017). Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 309-322.
- Centros Tecnológicos de España. (2011). Biomasa. Oportunidades para el sector de fabricantes de

- Bienes de Equipo. Fedit.
- Chamy, R., & Vivanco, E. (2007). Identificación y clasificación de los distintos tipos de biomasa disponibles en Chile para la generación de biogás. (CNDE-NACE, Ed.). Chile: Proyecto Energías Renovables.
- Coordinación de Energías Renovables. (2008). Energías Renovables, Energía Biomasa. (E. B. IEB, Ed.), Energías Renovables.
- Corporación Ruta N (2016). Informe No. 1: Alerta de Mercado Biotecnología Sector Agrícola. Medellín: Ruta Medellín.
- Cutz, L., Haro, P., Santana, D., & Johnsson, F. (2016). Assessment of biomass energy sources and technologies: The case of Central America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1411–1431.
- Del Rio, J., Marques, G., Lino, A. G., Lima, C. F., Colodette, J. L., & Gutiérrez, A. (2015). Lipophilic phytochemicals from sugarcane bagasse and straw. *Industrial Crops & Products*, 77, 992–996.
- Estrada, T. G., & Marín, J. A. V. (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia Integración de las energías en Colombia (upme, MINMI). Bogota - Colombia.
- Estrada, T. G., & Marín, J. A. V. (2017). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia, resumen ejecutivo. Bogota - Colombia.
- Feng, Q., & Lin, Y. (2017). Integrated processes of anaerobic digestion and pyrolysis for higher bioenergy recovery from lignocellulosic biomass: A brief review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77(May 2016), 1272–1287.
- Feng, S., Luo, Z., Zhang, Y., Zhong, Z., & Lu, B. (2014). Phytochemical contents and antioxidant capacities of different parts of two sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) cultivars. *Food Chemistry*, 151, 452–458.
- Fernández, J., Gutierrez, F., Del Rio, P., San Miguel, G., & Bahillo, A. (2015). Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética (Mundi-Pren). Madrid (España).
- Flandes, C. R. F. (2012). Potencial de generación de energía eléctrica a partir de residuos forestales producto de manejo en *Pinus radiata*, XIV Región de Los Ríos y X Región de Los Lagos. Santiago de Chile: Universidad Austral de Chile.
- Forero, C., Gnecco, J., & Torres, A. (2003). Producción de biodiesel de moriche (*mauritia flexuosa*) como alternativa energética para las regiones apartadas de la orinoquia colombiana. *Orinoquia*, 7(1–2), 59–69.
- Ghaffariyan, M. R., Brown, M., Acuna, M., Sessions, J., Gallagher, T., Khmaier, M., ... Egnell, G. (2017). An international review of the most productive and cost effective forest biomass recovery technologies and supply chains. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 145–158.
- Gonzalez, J. (2000). Fixed-bed pyrolysis of *Cynara cardunculus* L. Product yields and compositions. *Fuel Processing Technology* 68, 210–215.
- Goyal, H. B., Seal, D., & Saxena, R. C. (2008). Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 504–517.
- Hernández, H. E., Prada, J. O., Lesmes, H. J. Z., Ruiz, M. C. C., & Ortega, M. D. (2010). Atlas del Potencial Energético de la Biomasa en Colombia (Ministerio de Minas y Energía). (UPME, IDEAM, COLCIENCIAS, & U. I. de Santander, Eds.) (2010th ed.). Colombia.
- Khan, M. T., Seema, N., Khan, I. A., & Yasmine, S. (2017). Applications and Potential of Sugarcane as an Energy Crop. *Agricultural Research Updates*, 16, 1–24.
- Kumar, M., Oyedun, A. O., & Kumar, A. (2017). A review on the current status of various hydrothermal technologies on biomass feedstock. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (March), 1–28.
- Kwietniewska, E., & Tys, J. (2014). Process characteristics, inhibition factors and methane yields of anaerobic digestion process, with particular focus on microalgal biomass fermentation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 491–500.
- Li, Y., Zhou, L. W., & Wang, R. Z. (2017). Urban biomass and methods of estimating municipal biomass resources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80(April), 1017–1030.
- López, J. A. C., León, F. de S. M., Montilla, V. M., Pagés, A. S., Heras, T. P., & Clavero, F. C. (2008). Potencial energético de la biomasa residual agrícola y ganadera en Andalucía. Andalucía: Junta de Andalucía, Consejería de Agricultura y Pesca.
- Marco, L., Goldstein, E., & Griffa, B. (2017). Generación de energía eléctrica a partir de biomasa, experiencias y actualidad en Argentina. San Martin - Argentina.
- Martínez, P. E. P. (2014). Biomasa residual vegetal: tecnologías de transformación y estado actual. *Innovaciencia*, 2(1), 45–52.
- Mercado J., Combatt E., & Palencia M. (2016). Extractants for available boron in limed acid soils and its correlation in crops with high carbon storage capacity (*Tectona grandis*). *Journal of Plant Nutrition*. 39, 2136-2143.
- Míguez, J. L. (2009). Procesos Termoquímicos a Partir De La Fitomasa Residual (Combustión, gasificación, pirolisis) (1–28).
- Mohapatra, S., Mishra, C., Behera, S. S., & Thatoi, H. (2017). Application of pretreatment, fermentation

- and molecular techniques for enhancing bioethanol production from grass biomass – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78(March), 1007–1032.
- Monroy, A. C. (2016). Oceso de ensilaje a partir de bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) (1st ed.). Medellín-Colombia: Universidad de Antioquia.
- Moragues, J., & Rapallini, A. (2003). Energía de a biomasa. *Energías Renovables*, 18–21.
- Nawaz, M., Chattha, M. U., Chattha, M. B., Ahmad, R., Munir, H., Usman, M., ... Kharal, M. (2017). Assessment of compost as nutrient supplement for spring planted sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Journal of Animal and Plant Sciences*, 27(1), 283–293.
- Pinheiro, F. G. C., Soares, A. K. L., Santaella, S. T., et al. (2017). Optimization of the acetosolv extraction of lignin from sugarcane bagasse for phenolic resin production. *Industrial Crops and Products*, 96, 80–90.
- Red mundial de políticas en energía renovable. (2016). *Energías Renovables 2016 Reporte De La Situación Mundial*. España.
- Sector Azucarero de Colombia. (2015). *Sector Azucarero: Patrimonio Cultural, Social y Económico de los Colombianos*. Sector Azucarero de Colombia, 1–50.
- Sherpa, K. C., Rajak, R. C., Banerjee, R., & Sharma, V. (2017). Sugarcane: A Potential Agricultural Crop for Bioeconomy through Biorefinery. *Lignocellulosic Biomass Production and Industrial Applications*, 171–196.
- Shuit, S. H., Tan, K. T., Lee, K. T., & Kamaruddin, A. H. (2009). Oil palm biomass as a sustainable energy source: A Malaysian case study. *Energy*, 34(9), 1225–1235. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.05.008>
- Thomas, Q. M. A. links open the author workspace. W. A. M. A. links open the author workspace. S. (2008). Activated carbons from materials of varying morphological structure. *Thermochimica Acta*, 129, 173–176.
- Triana, O., León, T., Céspedes, M., & Cámara, A. (2014). Caracterización de los residuos de la cosecha de la caña de azúcar almacenados a granel. *ICIDCA. Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar*, 48(1), 65–70.
- Wang, S., Dai, G., Yang, H., & Luo, Z. (2017). Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 62, 33–86.
- Zandersons, J., Gravitis, J., Kokorevics, A., Zhurinsh, A., & Bikovens, O. (1999). Studies of the Brazilian sugarcane bagasse carbonisation process and products properties. *Biomass and Bioenergy*, 17, 214–217.