



Bioenergía a partir de residuos forestales y de madera

Bioenergy from forest and wood residues

Neydeli Ayala-Mendivil¹ y Georgina Sandoval^{1*}

¹ Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y
Diseño del Estado de Jalisco A. C. (CIATEJ). Guadala-
jara, Jalisco, México.

* Autor de correspondencia. gsandoval@ciatej.mx

RESUMEN

Una de las prioridades del mundo actual es la generación de bioenergéticos sustentables y amigables con el medio ambiente, para lo cual son necesarios cambios en los modelos de producción y utilización de energía. El uso de residuos forestales como una fuente de biomasa para la generación de bioenergéticos representa una alternativa potencial, ya que genera un biocombustible menos contaminante en comparación con los de origen fósil. Además, mientras que el calor y la electricidad pueden ser generados por otras alternativas renovables como viento, sol y agua, la producción de combustibles y la síntesis de productos químicos requieren transformar la biomasa. La elección de la estrategia de conversión depende del tipo, propiedades y cantidad de la biomasa disponible, de los requerimientos de uso, así como de los estándares ambientales y condiciones económicas. El objetivo del presente trabajo es describir los diferentes procesos a través de los cuales se puede obtener energía a partir de residuos de biomasa forestal, así como el potencial que tienen estos residuos en la producción de los diferentes tipos de bioenergéticos. Asimismo, se describen los desafíos y problemas que aún siguen sin resolver, como lo son la recolección de residuos, escalamiento y costos de producción.

PALABRAS CLAVE: biomasa, procesos bioquímicos, procesos termoquímicos.

ABSTRACT

Recently, the development of biofuels from renewable sources and the use of friendly environmental technologies have received a great deal of worldwide interest. Thus, many changes in the energy production model and management are necessary. The use of forest residues as raw material for bioenergy generation is an interesting option since the biofuels obtained are less polluting than fossil fuels. In addition, while heat and electricity can be obtained by other renewable alternatives (wind, solar and hydro), the production of liquid fuels and chemicals requires biomass transformation. The selection of the conversion process depends on the type, property and biomass stock, the desired form of the bioenergy, environmental standards and economic conditions. The aim of this work is to describe the different processes through which energy can be obtained, as well as the potential use of forest residues as raw material to produce the different types of bioenergy and, to describe the different biofuels that can be obtained by these processes. In addition, we analyze current challenges and unsolved problems in bioenergy production such as waste collection, scale-up and techno-economic feasibility.

KEYWORDS: biomass, biochemical process, thermochemical process.

INTRODUCCIÓN

Las emisiones globales de CO₂ por el uso de combustibles fósiles han aumentado significativamente en las últimas décadas. El Centro de Análisis de Información de Dióxido de Carbono registró que en el periodo de 1970 a 2016, las emisiones de CO₂ incrementaron en 90%, y son la combustión de combustibles fósiles y procesos industriales los que contribuyen aproximadamente en 78% del total de las emisiones (Le Quéré *et al.*, 2016). En México, con el incremento de la población y la demanda energética, en los últimos 10 años las industrias del transporte y generación de energía eléctrica han presentado las mayores emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con otros sectores (Conde, Salas, Centeno, Leal y Escalona, 2013). En consecuencia, los efectos negativos en el medio ambiente, así como la dependencia hacia los combustibles fósiles han impulsado la búsqueda de fuentes de biocombustibles renovables y amigables con el ambiente.

Existen estudios que señalan el potencial del uso de residuos de la industria forestal para la generación de energía (McKechnie, Colombo, Chen, Mabee y Machlean, 2011). Cherubini *et al.* (2009) mencionaron que los mejores rendimientos de generación de bioenergía y disminución de los gases de efecto invernadero se obtienen en los procesos que utilizan residuos como materia prima, ya que se evita el impacto ambiental de la producción de cultivos específicos. Los residuos forestales se consideran renovables, debido a que van de la mano con las actividades forestales, es decir, se puede cultivar nueva biomasa para reemplazar la biomasa utilizada (Akhtari, Sowlati y Day, 2014). En México existe un enorme potencial para la creación de industrias de bioenergéticos a partir de residuos de biomasa forestal, ya que la industria forestal es una actividad de relevancia económica en el país. Sin embargo, es necesario un análisis de las alternativas sobre el manejo y uso de los recursos forestales, así como de los coproductos para lograr una producción forestal sustentable y el aprovechamiento integral de la biomasa. Para esto, se deben estudiar a detalle aspectos ambientales, evaluar las fuentes potenciales de biomasa y la cadena de suminis-

tro necesaria para hacer el proceso económicamente viable y sustentable (Baral y Guha, 2004; McKechnie *et al.*, 2011).

En un escenario favorable las industrias de bioenergéticos podrán ser una nueva fuente de empleos, lo cual, además de las ventajas ambientales antes mencionadas, contribuiría en la economía del país. Para esto es necesario combinar acciones, que incluyen cambios en el comportamiento social, en las tecnologías de los vehículos e introducción a biocombustibles y tecnologías innovadoras y sustentables.

En los últimos años, algunos proyectos individuales de bioenergía se han visto obstaculizados por la incertidumbre del mercado y otros problemas de suministro del combustible. En contraste, actualmente existe una alianza “Gobierno Mexicano-Industria-Academia” que tiene como objetivo el desarrollo de proyectos de investigación científica para la producción de bioenergéticos a escala industrial. Los proyectos se enfocan en diferentes áreas, las cuales son biocombustibles sólidos, bioalcoholes, biodiesel, biogás y bioturbosina. Estos proyectos deberán tener un enfoque especial en la disponibilidad y uso de la biomasa como materia prima, por lo que en este trabajo se presenta evidencia de las rutas de producción de energía sustentable a partir de residuos de biomasa forestal (Flores, 2015).

OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo fue describir los diferentes procesos a través de los cuales se puede obtener energía a partir de residuos de biomasa forestal, así como el potencial que tienen estos residuos en la producción de los diferentes tipos de bioenergéticos.

Generación de residuos forestales

El volumen de la producción forestal en México se divide en dos grandes grupos: maderable y no maderable. El primero está constituido por materiales leñosos y el segundo por semillas, resinas, fibras, gomas, ceras, rizomas, hojas, pencas y tallos. Según el anuario estadístico de la producción forestal 2015, la producción forestal maderable en



México fue de 6.1 millones de metros cúbicos-rollo (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2015). Los principales estados productores fueron Durango (28.5%), Chihuahua (18.1%), Michoacán (7.0%), Jalisco (6.7%) y Oaxaca (6.7%), con una producción total de 4.1 millones de metros cúbicos-rollo. Los principales productos que se obtuvieron durante el año 2015 fueron: madera para aserrío (73.2%), combustibles (leña y carbón) con 11.8% y el restante 15.0% se destinó a celulósicos, chapa, triplay, postes, pilotes y morillos (Semarnat, 2015).

Durante la producción de madera existe una gran generación de residuos, los cuales se dividen en dos clases: 1) los que proceden de operaciones forestales como recolección y extracción y 2) los que se generan en la industria durante el proceso de fabricación de madera. En la tabla 1 se enlista la cantidad de residuos generados en la industria forestal en sus diferentes etapas; en ella se puede resaltar que tan solo 28% del total de un árbol se utiliza como madera y el resto se considera residuo (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 1991).

A diferencia de otras industrias, las forestales tienen la ventaja de poder utilizar sus residuos para contribuir

con las necesidades energéticas. Existen diferentes rutas para el aprovechamiento de estos residuos y se describen en la siguiente sección.

Bioenergía a partir de residuos forestales

La bioenergía se define como la energía derivada u obtenida a partir de biomasa, la cual incluye organismos vivos y materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado (Lee y Shah, 2012). Los recursos de biomasa son materia orgánica en la que la energía se encuentra almacenada en enlaces químicos, generalmente en carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre, en proporciones menores. Las plantas, a través de la fotosíntesis, producen carbohidratos que forman los bloques de construcción de la biomasa (Saxena, Adhikari y Goyal, 2009). Durante la fotosíntesis se captura dióxido de carbono y vapor de agua que, con ayuda de la luz solar, se convierte en glucosa, la cual da origen a almidones, celulosa, hemicelulosa y lignina, entre otros. El término 'biomasa primaria' cubre una amplia gama de materiales orgánicos producidos a partir de plantas (Salinas y Gasca, 2009). Las fuentes de biomasa más importantes para la generación de energía son residuos agrícolas, forestales, del procesamiento de la madera y cultivos realizados exclusivamente para su aprovechamiento energético.

Actualmente, la biomasa contribuye aproximadamente en 10% del suministro de energía a escala mundial (Edenhofer, 2011). La biomasa puede ser convertida en tres principales tipos de productos: 1) energía eléctrica y calor, 2) combustible para el sector de transporte y 3) materia prima para la producción de químicos (Cherubini, 2010). En los últimos años, se han desarrollado varias tecnologías enfocadas principalmente en la mejora de algunas formas de biomasa, la optimización en su transporte y almacenamiento y, mayormente, en la conversión de la biomasa a biocombustibles. Los procesos de conversión de la biomasa se clasifican generalmente en termoquímicos y bioquímicos. En la figura 1 se muestran los principales procesos de conversión de biomasa y sus productos energéticos.

TABLA 1. Distribución de un árbol corriente utilizado para madera de aserrío. Tomado de FAO (1991).

<i>Parte o producto del árbol</i>	<i>Proporción (%)</i>
Recolección y extracción:	
- Copa, ramas y follaje	23
- Tocón (excluidas raíces)	10
- Aserrín	5
Aserrío:	
- Virutas, costeros y recortes	17
- Aserrín y menudos	7.5
- Pérdidas varias	4
- Corteza	5.5
- Madera Aserrada	28
Total	100

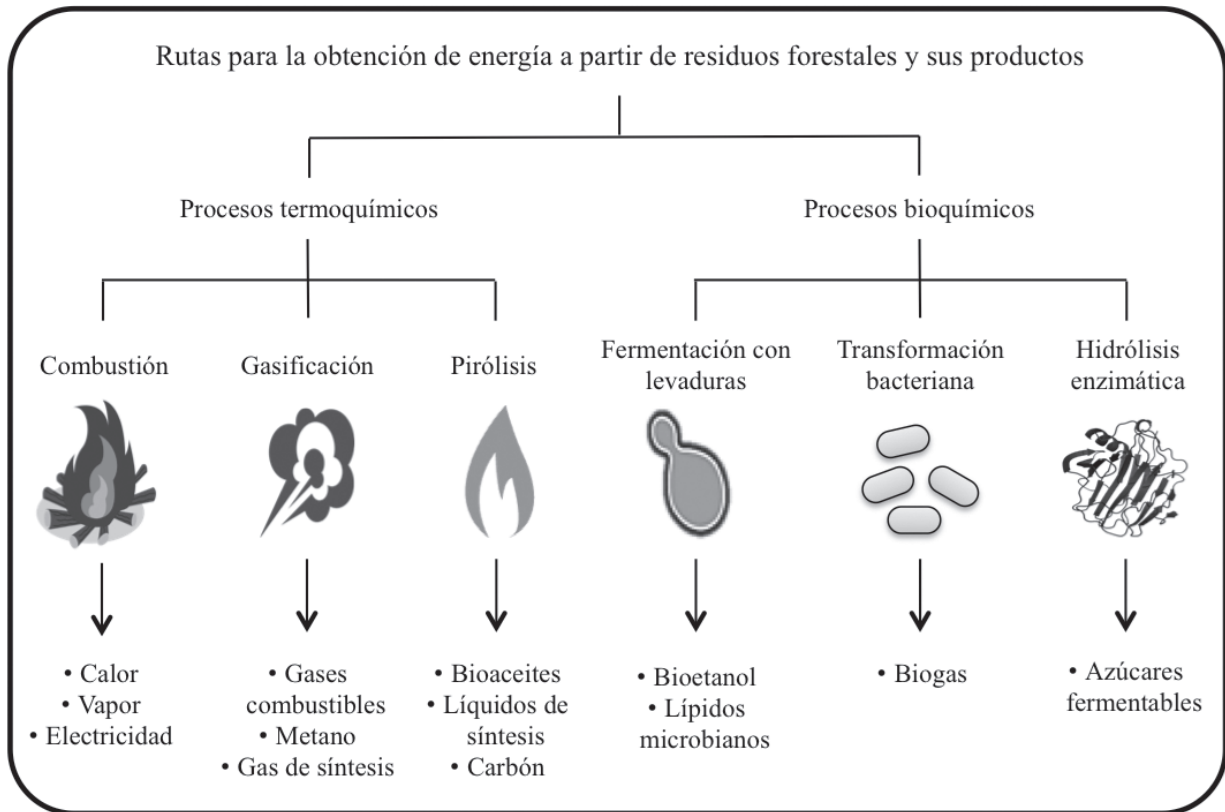


FIGURA 1. Rutas para la obtención de energía a partir de residuos forestales.

Procesos de conversión termoquímica

La conversión termoquímica de la biomasa es la tecnología más utilizada en la actualidad y los principales procesos aplicados para la producción de energía son: combustión, gasificación y pirólisis. La mayor parte de la energía de la biomasa es consumida de forma doméstica y por industrias relacionadas con la madera. Esto se lleva a cabo por combustión directa de la biomasa, para producir calor o vapor que impulsa una turbina o generador para producir electricidad. Los procesos de gasificación se utilizan para convertir la biomasa en un gas combustible o gas de síntesis que se utiliza para impulsar una turbina de gas de ciclo combinado de alta eficiencia o en la producción de biocombustibles líquidos. También, la biomasa es transformada en aceite por pirólisis, el cual es fácil de almacenar y transportar. Todos estos procesos de conversión termoquímica se detallan en las siguientes secciones.

Combustión

‘Combustión directa’ se refiere a la quema de biomasa en presencia de aire, esta combustión es usada comúnmente para convertir la energía química almacenada en la biomasa en calor, energía mecánica o electricidad. Es posible quemar cualquier tipo de biomasa con contenido de humedad menor a 50%; en caso contrario, es necesario un pretratamiento de secado. La combustión de biomasa ha sido comúnmente usada desde la antigüedad a pequeña escala para cocina doméstica y calefacción de espacios. Sin embargo, este tipo de combustión directa es considerada ineficiente debido a que se pierde entre 30% y 90% de transferencia de calor durante el proceso (Demirbas, 2001). La combustión de biomasa a gran escala se puede llevar a cabo en estufas, hornos, calderas, turbinas de vapor y turbogeneradores, en los cuales la transferencia de calor es mucho más eficiente (Tarelho, Neves y Matos, 2011). Actualmente, se ha escalado a plantas industriales



en un intervalo de 100 MW a 3000 MW; de esta manera la combustión de biomasa contribuye significativamente al suministro de energía global (McKendry, 2002).

La quema de biomasa produce ciertos contaminantes, incluyendo polvos y gases de lluvia ácida como dióxido de azufre y óxido nitroso, pero la cantidad de contaminantes producidos es 90% menor que los que se producen durante la combustión de carbón y combustibles fósiles (Vanneste, van Gerven, van der Putten, van der Bruggen y Helsen, 2011). Por otro lado, la combustión de carbón es de gran interés debido a que presenta una alta eficiencia de conversión. La cocombustión de biomasa con carbón es un proceso de conversión prometedor, ya que en este se combina la alta eficiencia de conversión y transporte del carbón con reducción en la emisión de gases durante la quema de biomasa (Nussbaumer, 2003).

Nunes, Matias y Catalão (2014) indicaron que para evaluar el potencial de combustión de la biomasa es necesario considerar varios aspectos, entre los cuales se encuentran algunas propiedades físicas y químicas como el contenido de humedad, el contenido de carbono, el valor calorífico y la densidad. Todos estos aspectos son de gran importancia, ya que determinan el uso y la aplicación real que puede darse a cada tipo de biomasa. El valor calorífico se refiere a la cantidad de energía generada por kilogramo de sustancia durante el proceso de combustión. La biomasa de madera y residuos agroindustriales contienen entre 12 MJ/kg y 18 MJ/kg de valor calorífico, mientras que los *pellets* tienen valores ligeramente superiores (20 MJ/kg) y el carbón contiene 28 MJ/kg. Si bien los valores caloríficos de la biomasa y de los *pellets* son menores al del carbón, la combustión de biomasa presenta la ventaja de reducir las emisiones de gases contaminantes. Además, si los *pellets* se producen a partir de residuos forestales, se tiene un doble beneficio ambiental y se crea una fuente de energía renovable.

Gasificación

La gasificación permite convertir la biomasa sólida en un gas combustible a través de una serie de reacciones químicas que se producen a elevadas temperaturas (750 °C -

900°C) con el uso de aire, oxígeno, vapor de agua o una mezcla de ellos como agente oxidante (Martínez, Lora y González, 2015). Con este proceso se pueden producir gases con valor calorífico de 4 MJ/m³ a 6 MJ/m³, los cuales pueden utilizarse para combustión directa o como combustible para motores y turbinas de gas. También, el gas producido puede usarse como materia prima en la producción de otros químicos, caso en el que recibe el nombre de gas de síntesis. La producción de gas de síntesis a partir de biomasa permite la producción de metano, hidrógeno, biogasolina y biodiesel, los cuales son de gran importancia en el futuro de los combustibles (McKendry, 2002).

Pirólisis

La pirólisis es un proceso termoquímico en el cual la biomasa se convierte en líquido (bioaceites y biocrudos), carbón y gases no condensables, ácido acético, acetona y metanol, calentando la biomasa alrededor de 500 °C en ausencia de oxígeno. Este proceso puede ser ajustado para favorecer la producción de carbón, aceites y gas con una eficiencia de 95%. Los tres productos siempre se generan durante este proceso, pero las proporciones pueden variar ajustando los parámetros. En el caso de pirólisis rápida, la biomasa se calienta a 500 °C durante un segundo, con lo que se obtiene un rendimiento de productos de 75% de líquido, 12% de sólido y 13% de gas. Este tipo de proceso es de gran interés para la producción de combustibles líquidos, los cuales pueden almacenarse y transportarse fácilmente, para su posterior uso en la producción de energía y otros productos químicos (Bridgwater, 2012).

Procesos de conversión bioquímica

La biomasa puede transformarse en formas de energía más útiles mediante la diversificación de los procesos aplicados. Existen varios procesos bioquímicos de conversión de biomasa a energéticos que proporcionan ventajas ambientales y económicas, ya que se llevan a cabo bajo condiciones de reacción más suaves en comparación con los procesos termoquímicos. Los procesos bioquímicos más comunes son la hidrólisis enzimática, la fermentación

y la digestión anaerobia; los principales bioenergéticos obtenidos a partir de estos son bioetanol, biobutano, biodiesel y biogás. De estos, el etanol es el biocombustible comúnmente producido por fermentación, pero la generación de otros compuestos químicos en un proceso integral es objeto de muchas investigaciones y actividades de desarrollo en la actualidad (Boucher, Chirat y Lachenal, 2014; Hill, Nelson, Tilman, Polasky y Tiffany, 2006; Koppram, Tomás-Pejó, Xiros y Olsson, 2014; Tsuji, Yokota, Kudoh y Hoshino, 2014).

Pretratamiento

El pretratamiento es un proceso requerido previo a la hidrólisis enzimática, el cual consiste en la ruptura de la estructura de lignina y las estructuras cristalinas de celulosa con la finalidad de obtener cadenas de celulosa y hemicelulosa disponibles para las enzimas (Himmel *et al.*, 2007) (Fig. 2). El proceso de pretratamiento puede ayudar a la transformación de los residuos forestales en biocombustibles, con él se incrementa la digestibilidad enzimática y a su vez los rendimientos de producción de azúcares fermentables. En la literatura se pueden encontrar diferentes

pretratamientos, los más utilizados se clasifican en físicos, fisicoquímicos, químicos y biológicos y en algunos estudios se utilizan en combinación (Chandra *et al.*, 2007).

El primer paso crítico para una hidrólisis eficiente es el pretratamiento físico, el cual consiste en la reducción de tamaño de la biomasa, ya que se ha demostrado que el tamaño y el contenido de humedad tienen un importante efecto en la posterior hidrólisis (Cullis, Saddler y Mansfield, 2004). Existen muchos tipos de molinos considerados eficientes durante la producción de biocombustibles a partir de biomasa; sin embargo, presentan el inconveniente de requerir grandes cantidades de energía, lo cual a su vez incrementa los costos de producción (Haghighi *et al.*, 2013). Debido a esto, en los últimos años se han estudiado otros procesos físicos y termo-físicos para la reducción del tamaño de partícula. Uno de ellos es el proceso de extrusión, el cual presenta las ventajas de obtener alto cizallamiento de la biomasa, tiempos de residencia cortos, uso de temperaturas moderadas, ausencia de producción de inhibidores, adaptabilidad, fácil escalamiento, funcionamiento en continuo y no produce efluentes (Zheng y Rehmann, 2014). Otro método termo-físico estudiado en los últimos años es la explosión de vapor y se ha demostrado su eficiencia y optimización durante el pretratamiento de residuos forestales (Janzon *et al.*, 2014) y biomasa forestal como materia prima a escala laboratorio (Cotana, Buratti, Barbanera y Lascaro, 2015). Por otro lado, Di Risio, Hu, Saville, Liao y Lortie (2011) evaluaron la hidrólisis enzimática de biomasa forestal pretratada con explosión de vapor en una escala de 200:l, mediante el monitoreo de la producción de azúcares fermentables e inhibidores. Los factores estudiados fueron composición del coctel enzimático, cantidad de biomasa y temperatura de hidrólisis, así como las condiciones de pretratamiento más adecuadas. Ellos observaron que después de 48 h de reacción no hubo aumento en la concentración de azúcares, incluso con un aumento de la biomasa forestal, lo cual indica una inhibición severa de la reacción. También determinaron que un pretratamiento de 200 °C durante 8 min conduce a una hidrólisis eficiente; mientras que un aumento en la temperatura por arriba de 205 °C destruye

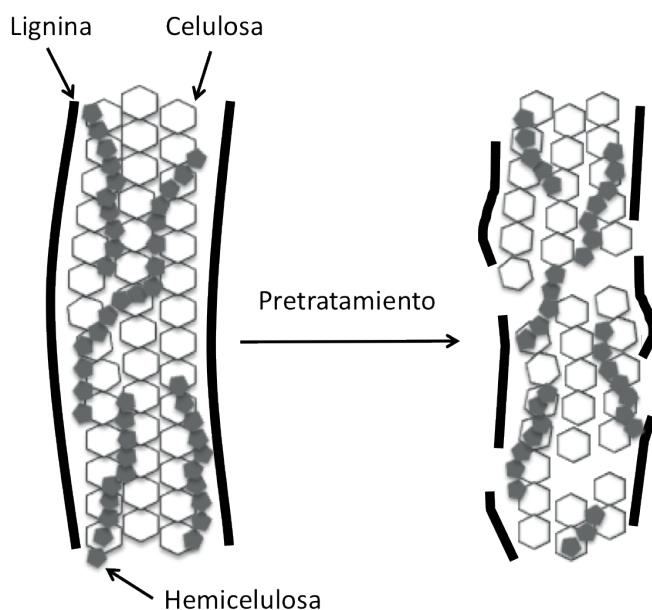


FIGURA 2. Efecto del proceso de pretratamiento en la biomasa lignocelulósica.



la hemicelulosa, disminuyendo la producción de azúcares. Por lo tanto, se requieren estrategias para solucionar los problemas técnicos de la hidrólisis enzimática a escala industrial para la obtención de azúcares fermentables a niveles comercialmente relevantes. Además, como existe una variación en la composición de los residuos dependiente de su origen, debe realizarse una optimización del proceso y resolución de problemas técnicos para cada caso en específico.

También existen pretratamientos biológicos señalados como eficientes y de bajo costo, que generalmente involucran el uso de hongos productores de enzimas degradantes de la lignina; sin embargo, tienen como desventaja que requieren largos tiempos de incubación (López *et al.*, 2013; Wan y Li, 2012). En contraste con lo anterior, el uso de ácidos en concentraciones diluidas y altas temperaturas (140 °C a 200 °C) logra que la celulosa contenida en la biomasa sea más accesible para la sacarificación enzimática (Cheng y Timilsina, 2011).

En conclusión, un pretratamiento efectivo debe tener las siguientes características: preservar las fracciones de hexosas y pentosas, limitar la formación de inhibidores del crecimiento microbiano durante la fermentación, minimizar la demanda de energía, disminuir costos y no generar efluentes contaminantes (Mosier *et al.*, 2005). Por otro lado, debido a la diversificación de los sustratos, es importante establecer una técnica de recolección de los residuos forestales altamente ordenada, en la cual sea mínima la variación en la composición de la mezcla de sustratos. Una vez establecida la biomasa forestal que se usará para la producción de bioenergía, se requieren estudios de optimización del proceso de pretratamiento a escala industrial que maximicen la posterior hidrólisis enzimática.

Hidrólisis enzimática

Los procesos de conversión bioquímica basados en fermentación requieren la hidrólisis de celulosa y hemicelulosa contenidas en la biomasa para la obtención de azúcares fermentables. La hidrólisis enzimática con celulasas y hemicelulasas, en sinergia, ha sido bien estudiada y

presenta la ventaja de tener altos rendimientos de conversión y sus condiciones de reacción son menos corrosivas y tóxicas en comparación con la hidrólisis ácida (Liguori, Amore y Faraco, 2013). En la tabla 2 se muestran estudios recientes de hidrólisis enzimática de residuos forestales con preparados enzimáticos comerciales. En estos estudios se evalúa el rendimiento en la producción de azúcares fermentables para su posterior uso en la producción biocombustibles.

Si bien se ha encontrado que el uso de enzimas es eficiente en la producción de biocombustibles, el costo de estas sigue siendo un desafío. Klein-Marcuschamer, Oleskiewicz-Popiel, Simmons y Blanch (2012) realizaron un análisis tecnoeconómico de la producción de biocombustibles con el uso de enzimas, considerando el costo de la materia prima, los tiempos de fermentación y las enzimas. Ellos concluyen que es necesaria la disminución del costo de las enzimas para la obtención de un biocombustible económicamente competente en el mercado. Debido a esto, se han realizado varios estudios acerca de la búsqueda de microorganismos productores de enzimas útiles en la hidrólisis de residuos (Ayala-Mendivil, De los Angeles Calixto-Romo, Amaya-Delgado, Casas-Godoy y Sandoval, 2016), así como de la optimización en la producción de enzimas celulasas (Deswal, Khasa y Kuhad, 2011), hemicelulasas (Kar *et al.*, 2013) y ligninasas (Rodríguez y Sanromán, 2005) a nivel de laboratorio. Una vez optimizada la generación de preparados enzimáticos con actividad lignocelulolítica, la producción podría integrarse en el proceso general de obtención de biocombustibles, como se muestra en la figura 3 y, de esta manera, lograr una disminución de costos de producción.

Fermentación

La fermentación consiste en el uso de microorganismos para convertir un sustrato fermentable en productos recuperables como biomasa, alcoholes y ácidos orgánicos. Las hexosas, principalmente glucosa, constituyen el sustrato más asimilable por los microorganismos, mientras que las pentosas (azúcares de hemicelulosa), glicerina y otros compuestos requieren de organismos específicos o modifi-

Tabla 2. Hidrólisis enzimática de residuos forestales y su pretratamiento.

Biomasa	Enzimas	Pretratamiento	Rendimiento	Referencia
Residuos de la industria maderera	Enzimas de <i>Aspergillus niger</i> (Sigma-Aldrich Co.)	Termo-químico	130 mg/g azúcares	Jin <i>et al.</i> (2016)
Residuos forestales	Cellic Ctec2 (Novozymes)	Fúngico con <i>Ceriporiopsis subvermispora</i>	40% glucosa 30% xilosa	Ge, Matsumoto, Keith y Li (2015)
Tres diferentes residuos forestales	Accellerase 1500 (Genencor)	Termo-físico	16% - 77% azúcares	Nitsos, Choli-Papadopoulou, Matis y Triantafyllidis (2016)
Residuos forestales	Celluclast 1.5 L (Novozyme)	Termo-físico	55% azúcares	Janzon <i>et al.</i> (2014)
Residuos de la industria maderera	Seis diferentes preparados de enzimas comerciales	Termo-físico	50 mg/ml glucosa 20 mg/ml xilosa	Di Rísio <i>et al.</i> (2011)
Madera	Cellic Ctec2 (Novozymes)	Termo-físico	60% - 80% azúcares	Cotana <i>et al.</i> (2015)

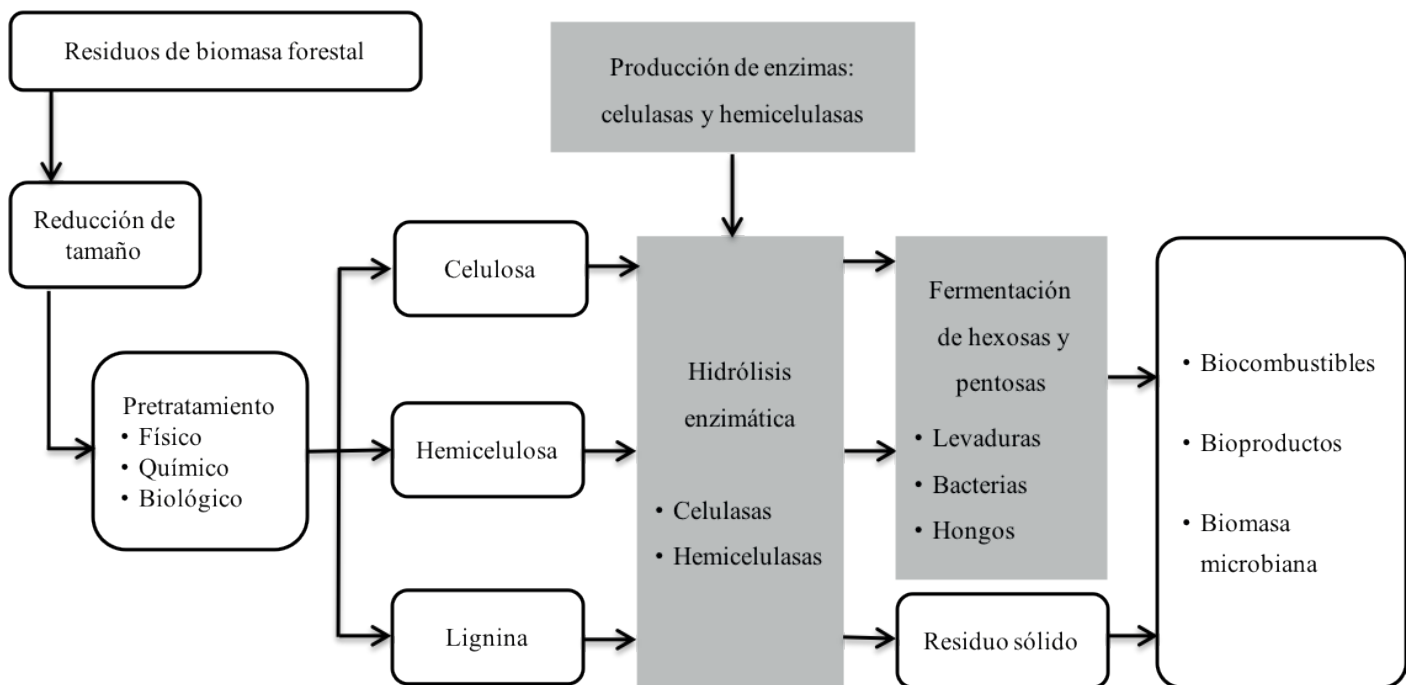


Figura 3. Aprovechamiento integral de residuos de la biomasa forestal para la producción de biocombustibles a través de procesos bioquímicos.



cados para llevar a cabo la conversión a etanol. Existen diversos microorganismos que pueden realizar la fermentación de azúcares obtenidos de residuos forestales. Estos dos procesos 1) hidrólisis de los residuos forestales o saccharificación y 2) fermentación, pueden llevarse a cabo por separado o de forma simultánea. En la tabla 3 se presentan estudios recientes de la producción de biocombustibles a partir de residuos forestales mediante hidrólisis enzimática y fermentación.

El biocombustible mayormente producido por fermentación es el etanol, seguido de butanol y acetona. Durante la producción de etanol se utilizan principalmente levaduras que llevan a cabo la fermentación alcohólica, sin embargo, también se ha registrado el proceso de hidrólisis enzimática y fermentación por hongos filamentosos y bacterias. Sasaki, Kushiki, Asada y Nakamura (2014) lograron la producción de la mezcla de etanol, acetona y butanol (EAB) a partir de residuos forestales mediante hidrólisis enzimática y fermentación utilizando una bacteria. En este estudio se comparó la hidrólisis y fermentación llevada a cabo por separado y de forma simultánea, obteniendo un rendimiento de producción de EAB de 15.29 g/l y 13.41 g/l, respectivamente. Otros estudios acerca de la producción de etanol a partir de residuos forestales y de madera presentan rendimientos de producción entre 15 g/l y 16 g/l (Kaushal, Sharma y Dogra, 2016; Tsuji *et al.*, 2014). En contraste, Wang, Zhu, Zalesny y Chen (2012) obtuvieron un rendimiento de producción de etanol de 29.7 g/l; en este trabajo determinaron que para mejorar la eficiencia en la producción de etanol es muy importante aplicar un pretratamiento eficiente de los residuos forestales.

Por otro lado, a medida que la investigación sobre biocombustibles avanza, la producción de lípidos microbianos a partir de biomasa lignocelulósica ha recibido atención considerable. Este interés se debe a que con el uso de lípidos microbianos para la producción de biocombustibles se evita el conflicto del uso de cultivos oleaginosos útiles en la alimentación. Otra ventaja es que se requiere una menor área para su producción en comparación con los cultivos de plantas oleaginosas (Rittmann, 2008). Los

lípidos microbianos pueden producirse a partir de azúcares fermentables provenientes de la hidrólisis de residuos forestales (Jin *et al.*, 2015). Actualmente, los trabajos de investigación se centran en la búsqueda de microorganismos oleaginosos y mejoramiento mediante ingeniería genética, métodos de recuperación de lípidos, así como la resolución de retos técnicos y factibilidad económica (Lian, Garcia-Perez, Coates, Wu y Chen, 2012; Niehus, Crutz-Le Coq, Sandoval, Nicaud y Ledesma-Amaro, 2017). La mayoría de los estudios son a nivel de laboratorio y utilizan como sustrato biomasa proveniente de cultivos ricos en almidones, siendo pocos los estudios en los cuales se utilizan residuos forestales (Dien *et al.*, 2016; Lee, Vadlani y Min, 2017).

Transformación bacteriana

La transformación bacteriana involucra la digestión anaerobia de material orgánico biodegradable en un intervalo de temperatura de 30 °C a 65 °C. El principal producto que se obtiene por este proceso es biogás, una mezcla de metano, dióxido de carbono y otras impurezas. Normalmente el biogás obtenido se purifica hasta obtener un gas con un contenido mayor a 97% de metano, el cual puede utilizarse como sustituto del gas natural (Chandra, Takeuchi y Hasegawa, 2012). Otros productos que pueden obtenerse por fermentación bacteriana son acetona, butanol y etanol; para tal fin, la especie *Clostridium acetobutylicum* ha sido utilizada en numerosas investigaciones (Sasaki *et al.*, 2014). Ahring y Westermann (2007) plantearon un diseño de biorefinería en el cual se encuentran de manera secuencial la producción de etanol con levaduras y una segunda fermentación del residuo con bacterias para la producción de hidrógeno y metano. Además, describen el aprovechamiento integral de la biomasa, así como de todos los subproductos generados durante el procesamiento. Muchas de las investigaciones actuales se centran en la producción de un solo biocombustible; sin embargo, es de gran importancia optimizar el aprovechamiento de la biomasa forestal mediante la generación de coproductos, para así lograr que sea un proceso rentable.

TABLA 3. Procesos de fermentación para la producción de etanol a partir de biomasa y residuos forestales.

Bioproceso		Sustrato	Producto	Referencia
Sacarificación	Fermentación			
Pretratamiento ácido y deslignificación con bisulfito de sodio + hidrólisis con enzimas comerciales	<i>Sacharomices cerevisiae</i> FPL-450	Residuos de madera	Bioetanol 29.7 g/l	Wang <i>et al.</i> (2012)
Hidrólisis con enzimas comerciales	Fermentación con <i>Clostridium acetobutylicum</i> NBRC 13948	Residuos forestales y de la industria de la madera	Mezcla de acetona, butanol y etanol 15.29 g/l	Sasaki <i>et al.</i> (2014)
Pretratamiento ácido + hidrólisis con enzimas comerciales	<i>Sacharomices cerevisiae</i>	Residuos forestales	Bioetanol 37.5 g/100 g de azúcares	Messaoudi, Smichi, Allaf, Allaf y Gargouri (2015)
Pretratamiento ácido + hidrólisis enzimática (<i>Trichoderma harzianum</i>)	Co-cultivo <i>Sacharomices cerevisiae</i> MTCC 3089 + <i>Pichia stipitis</i> NCIM 3498	Madera de <i>Populus deltoides</i>	Bioetanol 15.6 g/l	Kaushal <i>et al.</i> (2016)
Hidrólisis y fermentación simultánea por <i>Phlebia sp.</i> MG-60		Madera de <i>Quercus serrata</i>	Bioetanol	Kamei, Hirota y Meguro (2012)
Técnica de fermentación directa utilizando la levadura <i>Mrakia blollopis</i> SK-4 + conversión enzimática con lipasas		Madera	Bioetanol 16 g/l	Tsuji <i>et al.</i> (2014)

Comentarios finales

En conclusión, los beneficios del uso de residuos forestales para la producción de bioenergéticos son:

- Ambientales: la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero con el uso de algunos biocombustibles y revalorización de los residuos forestales que no se utilizan actualmente. Otra ventaja de utilizar residuos forestales como biomasa para la producción de bioenergéticos es que durante su generación no existe el uso de pesticidas ni fertilizantes contaminantes que se utilizan en el caso de cultivos agrícolas y que se han relacionado con el efecto invernadero.
- Económicos y sociales: el establecimiento de biorefinerías en el país será una nueva fuente de empleos. Además, con la descentralización de la biomasa forestal y otros residuos lignocelulósicos, estos

empleos se generarán en distintas regiones del país, lo cual minimizará el transporte por largas distancias del biocombustible generado. No obstante, para alcanzar estos objetivos serán necesarios incentivos y normas que promuevan y aseguren la calidad de los biocombustibles.

Si bien ya han sido descritas las ventajas de la producción de biocombustibles a partir de biomasa forestal, ahora es importante resaltar los desafíos a los cuales se enfrenta esta nueva tecnología:

- Uno de los principales atractivos de los biocombustibles es el menor impacto ambiental durante su combustión, comparado con el del combustible fósil. Sin embargo, es importante considerar el gasto energético y los residuos generados durante su producción; es decir, aún es necesario seleccionar un proceso



óptimo para un máximo aprovechamiento de la biomasa. Para esto se necesita hacer una homogenización de las técnicas para comparar las rutas de generación de energía y sus productos, con base en rendimientos energéticos, coproductos y generación de residuos.

- Otro aspecto que requiere especial atención es la factibilidad económica de las biorefinerías. Es necesario el aprovechamiento integral de otros subproductos como la lignina y proteínas contenidas en la biomasa forestal, así como otros coproductos generados durante el proceso.
- También es necesario establecer políticas y normas estrictas acerca del uso de los residuos forestales de manera sustentable, para evitar la sobreexplotación de este recurso y la deforestación, así como basar la producción de bioenergéticos en diversas fuentes de biomasa en sinergia con los residuos forestales y de madera.

REFERENCIAS

- Ahring, B. K., & Westermann, P. (2007). Coproduction of Bioethanol with Other Biofuels. *In* L. Olsson (ed.), *Biofuels* (pp. 289–302). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/10_2007_067
- Akhtari, S., Sowlati, T., & Day, K. (2014). Economic feasibility of utilizing forest biomass in district energy systems - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 117–127. doi: 10.1016/j.rser.2014.01.058
- Ayala-Mendivil, N., De Los Angeles Calixto-Romo, M., Amaya-Delgado, L., Casas-Godoy, L., & Sandoval, G. (2016). High throughput screening: Developed techniques for cellulolytic and xylanolytic activities assay. *Combinatorial Chemistry and High Throughput Screening*, 19(8). doi: 10.2174/1386207319666160810105808
- Baral, A., & Guha, G. S. (2004). Trees for carbon sequestration or fossil fuel substitution: The issue of cost vs. carbon benefit. *Biomass and Bioenergy*, 27(1), 41–55. doi: 10.1016/j.biombioe.2003.11.004
- Boucher, J., Chirat, C., & Lachenal, D. (2014). Extraction of hemicelluloses from wood in a pulp biorefinery, and subsequent fermentation into ethanol. *Energy Conversion and Management*, 88, 1120–1126. doi: 10.1016/j.enconman.2014.05.104
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94. doi: 10.1016/j.biombioe.2011.01.048
- Chandra, R. P., Bura, R., Mabee, W. E., Berlin, A., Pan, X., & Saddler, J. N. (2007). Substrate Pretreatment: The Key to Effective Enzymatic Hydrolysis of Lignocellulosics? *In* L. Olsson (ed.), *Biofuels* (pp. 67–93). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/10_2007_064
- Chandra, R., Takeuchi, H., & Hasegawa, T. (2012). Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1462–1476. doi: 10.1016/j.rser.2011.11.035
- Cheng, J. J., & Timilsina, G. R. (2011). Status and barriers of advanced biofuel technologies: A review. *Renewable Energy*, 36(12), 3541–3549. doi: 10.1016/j.renene.2011.04.031
- Cherubini, F. (2010). The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 51(7), 1412–1421. doi: 10.1016/j.enconman.2010.01.015
- Cherubini, F., Bird, N. D., Cowie, A., Jungmeier, G., Schlamadinger, B., & Woess-Gallasch, S. (2009). Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(8), 434–447. doi: 10.1016/j.resconrec.2009.03.013
- Conde, L. A., Salas, G. V., Centeno, S. P., Leal, A., & Escalona, V. (2013). *Tendencias de las emisiones. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010* (Vol. 1). México. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004
- Cotana, F., Buratti, C., Barbanera, M., & Lascaro, E. (2015). Optimization of the steam explosion and enzymatic hydrolysis for sugars production from oak woods. *Bioresource Technology*, 198, 470–477. doi: 10.1016/j.biortech.2015.09.047
- Cullis, I. F., Saddler, J. N., & Mansfield, S. D. (2004). Effect of Initial Moisture Content and Chip Size on the

- Bioconversion Efficiency of Softwood Lignocellulosics. *Biotechnology and Bioengineering*, 85(4), 413–421. doi: 10.1002/bit.10905
- Demirbas, A. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 42, 1357–1378.
- Deswal, D., Khasa, Y. P., & Kuhad, R. C. (2011). Optimization of cellulase production by a brown rot fungus *Fomitopsis* sp. RCK2010 under solid state fermentation. *Bioresource Technology*, 102(10), 6065–6072. doi: 10.1016/j.biortech.2011.03.032
- Di Risio, S., Hu, C. S., Saville, B. A., Liao, D., & Lortie, J. (2011). Large-scale, high-solids enzymatic hydrolysis of steam-exploded poplar. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(6), 609–620. doi: 10.1002/bbb.323
- Dien, B. S., Zhu, J. Y., Slininger, P. J., Kurtzman, C. P., Moser, B. R., O'Bryan, P. J., Gleisner, R., & Cotta, M. A. (2016). Conversion of SPORL pretreated Douglas fir forest residues into microbial lipids with oleaginous yeasts. *RSC Adv.*, 6(25), 20695–20705. doi: 10.1039/C5RA24430G
- Edenhofer, O. (2011). *The IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. New York. Recuperado de https://www.pik-potsdam.de/members/edenh/talks/NewYork_Edenhofer_v03.pdf
- Flores, M. (2015). *CEMIE-BIO: los frutos de la biomasa*. PROYECTO FSE. Recuperado de <http://proyectofse.mx/2016/02/03/cemie-bio-los-frutos-la-biomasa/>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (1991). Aprovechamiento potencial de los residuos de madera para la producción de energía. In *Conservación de energía en las industrias mecánicas forestales* (Vol. 93). Roma, Italia: Food & Agriculture Org. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/T0269S/T0269S00.htm>
- Ge, X., Matsumoto, T., Keith, L., & Li, Y. (2015). Fungal Pretreatment of Albizia Chips for Enhanced Biogas Production by Solid-State Anaerobic Digestion. *Energy & Fuels*, 29(1), 200–204. doi: 10.1021/ef501922t
- Haghighi Mood, S., Hossein Golfeshan, A., Tabatabaei, M., Salehi Jouzani, G., Najafi, G. H., Gholami, M., & Ardjmand, M. (2013). Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 77–93. doi: 10.1016/j.rser.2013.06.033
- Hill, J., Nelson, E., Tilman, D., Polasky, S., & Tiffany, D. (2006). Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(30), 11206–11210. doi: 10.1073/pnas.0604600103
- Himmel, M. E., Ding, S.-Y., Johnson, D. K., Adney, W. S., Nimlos, M. R., Brady, J. W., & Foust, T. D. (2007). Biomass recalcitrance: engineering plants and enzymes for biofuels production. *Science*, 315(5813), 804–7. doi: 10.1126/science.1137016
- Janzon, R., Schütt, F., Oldenburg, S., Fischer, E., Körner, I., & Saake, B. (2014). Steam pretreatment of spruce forest residues: Optimal conditions for biogas production and enzymatic hydrolysis. *Carbohydrate Polymers*, 100, 202–210. doi: 10.1016/j.carbpol.2013.04.093
- Jin, M., Slininger, P. J., Dien, B. S., Waghmode, S., Moser, B. R., Orjuela, A., Sousa, L. da C., & Balan, V. (2015). Microbial lipid-based lignocellulosic biorefinery: Feasibility and challenges. *Trends in Biotechnology*, 33(1), 43–54. doi: 10.1016/j.tibtech.2014.11.005
- Jin, S., Zhang, G., Zhang, P., Li, F., Fan, S., & Li, J. (2016). Thermo-chemical pretreatment and enzymatic hydrolysis for enhancing saccharification of catalpa sawdust. *Bioresource Technology*, 205, 34–39. doi: 10.1016/j.biortech.2016.01.019
- Kamei, I., Hirota, Y., & Meguro, S. (2012). Integrated delignification and simultaneous saccharification and fermentation of hard wood by a white-rot fungus, *Phlebia* sp. MG-60. *Bioresource Technology*, 126, 137–141. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.007>
- Kar, S., Sona Gauri, S., Das, A., Jana, A., Maity, C., Mandal, A., Das Mohapatra, P. K., Pati, B. R., & Mondal, K. C. (2013). Process optimization of xylanase production using cheap solid substrate by *Trichoderma reesei* SAF3 and study on the alteration of behavioral properties of enzyme obtained from SSF and SmF. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 36(1), 57–68. doi: 10.1007/s00449-012-0761-x



- Kaushal, R., Sharma, N., & Dogra, V. (2016). Molecular characterization of glycosyl hydrolases of *Trichoderma harzianum* WF5 - A potential strain isolated from decaying wood and their application in bioconversion of poplar wood to ethanol under separate hydrolysis and fermentation. *Biomass and Bioenergy*, 85, 243–251. doi: 10.1016/j.biombioe.2015.12.010
- Klein-Marcuschamer, D., Oleskowicz-Popiel, P., Simmons, B. A., & Blanch, H. W. (2012). The challenge of enzyme cost in the production of lignocellulosic biofuels. *Biotechnology and Bioengineering*, 109(4), 1083–1087. doi: 10.1002/bit.24370
- Koppram, R., Tomás-Pejó, E., Xiros, C., & Olsson, L. (2014). Lignocellulosic ethanol production at high-gravity: Challenges and perspectives. *Trends in Biotechnology*, 32(1), 46–53. doi: 10.1016/j.tibtech.2013.10.003
- Le Quéré, C., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Sitch, S., Ivar Korsbakken, J., Peters, G. P., ..., & Zaehle, S. (2016). Global Carbon Budget 2016. *Earth System Science Data*, 8(2), 605–649. doi: 10.5194/essd-8-605-2016
- Lee, J.-E., Vadlani, P. V., & Min, D. (2017). Sustainable Production of Microbial Lipids from Lignocellulosic Biomass Using Oleaginous Yeast Cultures. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 7(1), 36–50. doi: 10.4236/jsbs.2017.71004
- Lee, S., & Shah, Y. T. (2012). *Biofuels and bioenergy: processes and technologies*. (S. Lee & Y. T. Shah, Eds.). London UK: CRC Press Inc.
- Lian, J., Garcia-Perez, M., Coates, R., Wu, H., & Chen, S. (2012). Yeast fermentation of carboxylic acids obtained from pyrolytic aqueous phases for lipid production. *Bioresource Technology*, 118, 177–186. doi: 10.1016/j.biortech.2012.05.010
- Liguori, R., Amore, A., & Faraco, V. (2013). Waste valorization by biotechnological conversion into added value products. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(14), 6129–6147. doi: 10.1007/s00253-013-5014-7
- López, M. J., Suárez-Estrella, F., Vargas-García, M. C., López-González, J. A., Verstichel, S., Debeer, L., Wierinck, I., & Moreno, J. (2013). Biodelignification of agricultural and forest wastes: Effect on anaerobic digestion. *Biomass and Bioenergy*, 58, 343–349. doi: 10.1016/j.biombioe.2013.10.021
- Martínez, J. M. R., Lora, E. E. S., & González, L. N. L. (2015). *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad*. José María Rincón Martínez, Electo Eduardo Silva Lora.
- McKechnie, J., Colombo, S., Chen, J., Mabee, W., & Machlean, H. L. (2011). Forest Bioenergy or Forest Carbon? Assessing Trade - Offs in Greenhouse Gas Mitigation with Wood - Based Fuels. *Environ. Sci. Technol.*, 45(2), 789–795. doi: 10.1021/es1024004
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Reviews Issue*, 83(1), 47–54. doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00119-5
- Messaoudi, Y., Smichi, N., Allaf, T., Allaf, K., & Gargouri, M. (2015). Effect of instant controlled pressure drop pretreatment of lignocellulosic wastes on enzymatic saccharification and ethanol production. *Industrial Crops and Products*, 77, 910–919. doi: 10.1016/j.indcrop.2015.09.074
- Mosier, N., Wyman, C., Dale, B., Elander, R., Lee, Y. Y., Holtzapple, M., & Ladisch, M. (2005). Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 96(6), 673–686. doi: 10.1016/j.biortech.2004.06.025
- Niehus, X., Crutz-Le Coq, A.-M., Sandoval, G., Nicaud, J. M., & Ledesma-Amaro, R. (2017). Engineering *Yarrowia lipolytica* to enhance lipid production from lignocellulosic materials. *Biotechnology for Biofuels*, In Press.
- Nitsos, C. K., Choli-Papadopoulou, T., Matis, K. A., & Triantafyllidis, K. S. (2016). Optimization of hydrothermal pretreatment of hardwood and softwood lignocellulosic residues for selective hemicellulose recovery and improved cellulose enzymatic hydrolysis. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 4(9), 4529–4544. doi: 10.1021/acssuschemeng.6b00535
- Nunes, L. J. R., Matias, J. C. O., & Catalão, J. P. S. (2014). Mixed biomass pellets for thermal energy production: A review of combustion models. *Applied Energy*, 127, 135–140. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.04.042
- Nussbaumer, T. (2003). Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction. *Energy and Fuels*, 17(6), 1510–1521. doi: 10.1021/ef030031q

- Rittmann, B. E. (2008). Opportunities for renewable bioenergy using microorganisms. *Biotechnology and Bioengineering*, 100(2), 203–212. doi: 10.1002/bit.21875
- Rodríguez, S., & Sanromán, M. A. (2005). Application of solid-state fermentation to ligninolytic enzyme production. *Biochemical Engineering Journal*, 22(3), 211–219. doi: 10.1016/j.bej.2004.09.013
- Salinas, E., & Gasca, V. (2009). Los biocombustibles. *El Cotidiano*, (157), 75–82. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/325/32512739009.pdf>
- Sasaki, C., Kushiki, Y., Asada, C., & Nakamura, Y. (2014). Acetone-butanol-ethanol production by separate hydrolysis and fermentation (SHF) and simultaneous saccharification and fermentation (SSF) methods using acorns and wood chips of *Quercus acutissima* as a carbon source. *Industrial Crops and Products*, 62, 286–292. doi: 10.1016/j.indcrop.2014.08.049
- Saxena, R. C., Adhikari, D. K., & Goyal, H. B. (2009). Biomass-based energy fuel through biochemical routes: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(1), 167–178. doi: 10.1016/j.rser.2007.07.011
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat]. (2015). *Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2015*. Coyoacán, Ciudad de México. Recuperado de <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/anuarios-estadisticos-forestales>
- Tarelho, L. A. C., Neves, D. S. F., & Matos, M. A. A. (2011). Forest biomass waste combustion in a pilot-scale bubbling fluidised bed combustor. *Biomass and Bioenergy*, 35(4), 1511–1523. doi: 10.1016/j.biombioe.2010.12.052
- Tsuji, M., Yokota, Y., Kudoh, S., & Hoshino, T. (2014). Improvement of direct ethanol fermentation from woody biomasses by the Antarctic basidiomycetous yeast, *Mrakia blollopis*, under a low temperature condition. *Cryobiology*, 68(2), 303–305. doi: 10.1016/j.cryobiol.2013.12.008
- Vanneste, J., van Gerven, T., van der Putten, E., van der Bruggen, B., & Helsen, L. (2011). Energetic valorization of wood waste: Estimation of the reduction in CO₂ emissions. *Science of the Total Environment*, 409(19), 3595–3602. doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.04.059
- Wan, C., & Li, Y. (2012). Fungal pretreatment of lignocellulosic biomass. *Biotechnology Advances*, 30(6), 1447–1457. doi: 10.1016/j.biotechadv.2012.03.003
- Wang, Z. J., Zhu, J. Y., Zalesny, R. S., & Chen, K. F. (2012). Ethanol production from poplar wood through enzymatic saccharification and fermentation by dilute acid and SPORL pretreatments. *Fuel*, 95, 606–614. doi: 10.1016/j.fuel.2011.12.032
- Zheng, J., & Rehmann, L. (2014). Extrusion pretreatment of lignocellulosic biomass: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 15(10), 18967–18984. doi: 10.3390/ijms151018967
- Manuscrito recibido el 13 de julio de 2017
 Aceptado el 31 de abril de 2018
 Publicado el 25 de octubre de 2018
- Este documento se debe citar como:
 Ayala-Mendivil, N., & Sandoval, G. (2018). Bioenergía a partir de residuos forestales y de madera. *Madera y Bosques*, 24(Núm. esp.), e2401877. doi: 10.21829/myb.2018.2401877



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional.