

Archivo exclusivo para revisión y aval

Biomasa residual como fuente de energía

Judith Rodríguez Salcedo

Juan Carlos Clavijo Salinas

Leidy Johana Valencia Hernández

María Isabel Gutiérrez López



Capítulo 7

Archivo exclusivo para revisión y aval

Introducción

La energía es actualmente un insumo necesario para la mayoría de actividades de la sociedad en todo el mundo; no obstante, más de un 80% de la energía consumida en el planeta proviene de fuentes fósiles (International Energy Agency - IEA, 2018), trayendo consigo efectos adversos sobre el medio ambiente, y poniendo en riesgo el abastecimiento de energía a mediano y a largo plazo, ya que no son recursos renovables.

La sociedad no es indiferente a esta realidad; prueba de ello es que, de acuerdo con la base de datos Scopus, desde los años noventa se ha incrementado en casi cien veces la cantidad de publicaciones científicas relacionadas con energías renovables, como se puede apreciar en la figura 7.1.

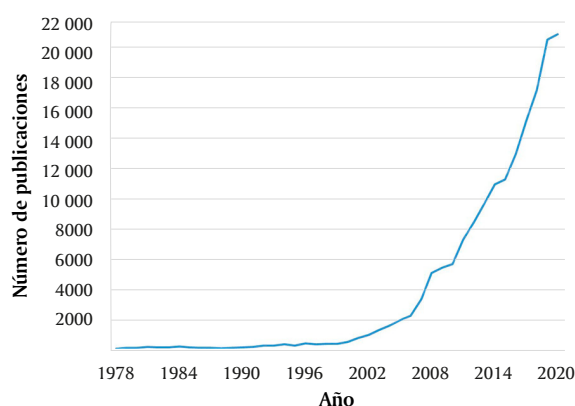


Figura 7.1
Publicaciones científicas en Scopus
relacionadas con energías renovables (1978-2020)
Fuente: elaboración propia.

En Colombia, el desarrollo de proyectos para el uso de fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) se ha incentivado a través del fortalecimiento del marco legal. Algunos ejemplos son: la Ley 697 de 2001, que fomenta el uso racional y eficiente de la energía y promueve la utilización de energías alternativas; las leyes 693 de 2001 y 939 de 2004, que



crean estímulos para la producción, comercialización y consumo de alcohol carburante y biodiésel, respectivamente, y la Ley 1715 de 2014, que regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional.

La biomasa, considerada como una FNCER, se caracteriza por ser un conjunto diverso de materiales orgánicos cuyo origen es primordialmente fotosintético, por lo cual capta una cantidad sustancial de CO_2 en la etapa de cultivo, que luego compensa las emisiones de CO_2 generadas en el proceso de conversión a energía (Karthä, 2006). Esta es la principal razón por la que se considera a la biomasa como una de las alternativas energéticas para la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

El uso energético de la biomasa a escala industrial se lleva a cabo principalmente a partir de monocultivos energéticos. Según reportes de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD, por sus siglas en inglés) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), más del 80% de las materias primas para la producción de biodiésel a nivel mundial son aceites vegetales comestibles, mientras que el etanol se produce, en un 80%, a partir de maíz, trigo y cultivos sacarinos (OECD-FAO, 2016). Sin embargo, el uso de este tipo de fuentes para fines energéticos ha sido cuestionado desde hace varios años, ya que los monocultivos requieren grandes superficies, así como altas cantidades de agua, energía y fertilizantes químicos, dando como resultado un costo ambiental que puede ser incluso superior al de las fuentes fósiles (Chu y Majumdar, 2012; Correa, Beyer, Possingham, Thomas-Hall y Schenk, 2017; Havlík *et al.*, 2011; Ho, Ngo y Guo, 2014). Además, el uso energético de cultivos comestibles es una práctica que compromete la seguridad alimentaria (Naik *et al.*, 2010; Rulli, Bellomi, Cazzoli, De Carolis y D'Odorico, 2016).

Esto ha provocado que los esfuerzos en investigación y desarrollo migren paulatinamente de la exploración y los estudios para obtención de energía desde los cultivos energéticos y las biomasas primarias o naturales hacia las tecnologías de transformación de biomasas residuales, que pueden encontrarse en una vasta gama de composiciones químicas dependiendo del proceso que las genera: agrícola, pecuario, forestal, urbano o industrial. Su potencial energético radica en la energía contenida en los enlaces químicos de las moléculas orgánicas, la cual se puede extraer mediante procesos termoquímicos, físicos, químicos y bioquímicos.

En este capítulo se explicarán las principales consideraciones para el uso de la biomasa residual como fuente de energía, la situación de la bioenergía en el ámbito nacional e internacional, el concepto de biocombustible

y los diferentes procesos existentes para su obtención. Finalmente, se expondrán las experiencias de investigación más relevantes del Grupo de Investigación en Eficiencia Energética y Energías Alternativas (GEAL) de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira, en relación con el aprovechamiento energético de biomasas residuales de la región.

Biomasa residual como fuente de energía

La biomasa se define como la fracción biodegradable de todo material procedente de cultivos agrícolas y forestales, desechos pecuarios y residuos urbanos e industriales. Por ser un material que acumula energía en forma bioquímica que procede de la energía solar fijada por los vegetales en el proceso fotosintético, la biomasa se considera un recurso renovable, siempre y cuando la velocidad de consumo no supere la velocidad de producción y se evite la sobreexplotación de los recursos naturales (Red Mexicana de Bioenergía - Rembio, 2011).

De acuerdo con lo reportado por la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2018), para el 2016 la biomasa representaba el 9.8% de la energía primaria mundial. Otras fuentes que forman parte de la matriz energética mundial son: carbón (27.1%), crudo (31.9%), gas natural (22.1%), nuclear (4.9%), hídrica (2.5%) y otras fuentes como geotérmica, eólica, solar (1.7%).

Los recursos biomásicos se pueden clasificar en dos grandes grupos: 1) biomasa primaria, que incluye la biomasa natural, corresponde a los árboles, arbustos, pastizales y plantas acuáticas que se encuentran en sitios en los que no ha existido intervención humana, y los cultivos energéticos, que son plantaciones destinadas para la producción directa de biocombustibles; 2) biomasa residual, procedente de cualquier actividad agrícola, forestal, pecuaria, urbana o industrial.

Los cultivos energéticos son cultivos agrícolas implantados y explotados con el objetivo de producir biomasa para obtención de bioenergía, en forma de bioetanol o biodiésel, los cuales se consideran los principales biocombustibles en el mundo. Estudios llevados a cabo por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (Idae, 2007) y Ciria (2007) clasifican los cultivos energéticos en: 1) cultivos oleaginosos para la producción de aceites transformables en biodiésel, entre los que se distinguen cultivos de palma, soya, colza, girasol, algas, entre otros; 2) cultivos alcoholígenos para la producción de bioetanol a partir de procesos de fermentación de azúcares, incluyen caña de azúcar, maíz, remolacha azucarera, yuca, entre otros, y



3) cultivos lignocelulósicos, para la generación de biomasa sólida, cuyo uso puede ser destinado para distintas aplicaciones.

Los biocombustibles, entendidos como cualquier tipo de combustible sólido, líquido o gaseoso proveniente de la biomasa, pueden clasificarse según la materia prima y el avance de la tecnología empleada para su producción, por lo que hay cinco generaciones, como se muestra en la tabla 7.1.

La biomasa residual está ampliamente disponible en Colombia. Según el atlas de biomasa (Escalante, Orduz, Zapata, Cardona y Duarte, 2011), estos residuos se pueden clasificar en: 1) residuos agrícolas, que incluyen los subproductos generados durante la recolección y cosecha de cultivos, como residuos agrícolas de caña, musáceas, arroz, café, entre otros; 2) residuos pecuarios, que se refieren a las excretas producidas durante la cadena productiva de animales como aves, cerdos, ovinos y porcinos; 3) residuos sólidos orgánicos urbanos (RSOU), referidos a los desechos generados por la población urbana, y 4) residuos forestales, aquellos generados durante la cosecha de árboles destinados a aplicaciones industriales como fabricación de pulpa para la industria papelera y el comercio de madera para aserrío.

Para proyectar la biomasa residual como alternativa de sustitución del uso de combustibles fósiles, es necesario estimar su contenido energético. En la tabla 7.2 se evidencian las características químicas en base seca (b. s.) y los potenciales energéticos de algunas biomásas residuales.

Se ha estimado que los residuos agrícolas en todo el mundo podrían tener un potencial energético de 13 a 30 EJ/año para el 2030 (Nakada, Saygin y Gielen, 2014), y los residuos forestales 35 EJ/año (Slade, Bauén y Gross, 2014). Mientras que en Colombia se ha reportado un potencial bioenergético de residuos agrícolas, pecuarios y sólidos urbanos correspondientes a 331 645, 117 747, y 91.72 TJ/año, respectivamente (Escalante *et al.*, 2011).

En el valle geográfico del río Cauca, una de las regiones más fértiles del suroccidente colombiano, se ha estudiado la disponibilidad de algunas biomásas residuales para aprovechamiento energético. Allí se destacan importantes industrias como la azucarera, cuya producción se extiende en más de 230 000 ha, generando alrededor de 950 000 t/año de residuos de cosecha. Por su parte, la industria avícola está representada en más de 700 granjas, con una generación de residuos cercana a las 870 000 t/año (GEAL, 2016).

En general, la biomasa residual es un recurso energético que se caracteriza por su abundancia, dispersión y variedad composicional, como se muestra en la tabla 7.2. Por esta razón, resulta de gran importancia entender los factores que determinan la oferta de la biomasa residual en el contexto donde se pretenda aprovechar energéticamente, así como los procesos de conversión energética más adecuados para cada tipo de biomasa.

Tabla 7.1

Descripción de las generaciones de biocombustibles

Generación	Característica	Materia prima	Procesos de obtención del biocombustible
Cero	Uso directo de la biomasa para producir energía.	Leña, paja, rastrojo, estiércol seco, carbón vegetal, etc.	Combustión directa, pirólisis (elaboración de carbón vegetal).
Primera	Uso de materias primas alimentarias en monocultivo.	Caña de azúcar, palma de aceite, maíz, remolacha, soya, girasol, etc.	Fermentación, transesterificación.
Segunda	Uso de materias primas no alimentarias como residuos o cultivos en tierras marginales, mejores tecnologías de conversión de biomasa.	Residuos lignocelulósicos (paja, bagazo, residuos forestales, residuos de plazas de mercado), especies de rápido crecimiento (álamo sauce, miscanthus, mijo), oleaginosas no comestibles (jatropha, higuera).	Pretratamientos físicos y químicos, hidrólisis enzimática y termoquímica, fermentación, gasificación térmica y licuefacción.
Tercera	Uso de cultivos genéticamente modificados para mejorar conversión de biomasa y reducir costos de pretratamientos de materias primas.	Microalgas, cultivos con celulasas integradas, árboles bajos en lignina.	Transesterificación enzimática o supercrítica, hidrólisis enzimática o termoquímica.
Cuarta	Lo importante es captar y almacenar carbono en la producción y conversión de la biomasa.	Materias primas adaptadas para mejorar la eficiencia del proceso de conversión y captar más CO ₂ en su crecimiento. Bosques, algas, bacterias genéticamente modificadas.	Hidrólisis enzimática, transesterificación enzimática o supercrítica.

Fuente: Rodríguez *et al.* (2010, p. 12).

Biomasa residual como fuente de energía



Tabla 7.2
Características químicas y potencial energético de algunas biomasas residuales

Biomasa residual	Tipo de material	Análisis elemental (% b. s.)						Humedad		PCS (Mj/kg)	PCI (Mj/kg)
		C	H	N	S	O	Cenizas	(%)			
Resíduos del beneficio de la caña de azúcar	Bagazo	45.44	6.11	1.03	0.04	39.26	8.13	47.05		17.22	14.74
Resíduos del beneficio de la palma de aceite	Fibra	51.03	5.92	1.12	0.20	23.66	18.07	19.48		18.41	16.64
	Cusco	47.99	6.11	1.37	0.11	36.63	7.79	23.02		18.67	16.77
	Raquis	53.65	6.05	0.40	0.03	32.67	7.20	19.48		20.09	18.30
Resíduos del beneficio del arroz	Cascarilla	42.39	5.19	3.89	0.12	30.56	17.86	9.00		16.31	14.95
Resíduos del beneficio del café	Borra	60.65	7.79	1.91	0.15	29.00	0.51	34.62		27.02	24.51
	Cisco	51.08	6.47	1.45	0.07	38.43	2.52	9.04		19.56	17.93
Resíduos forestales	Madera de pino	54.73	7.13	0.67	0.01	37.26	0.24	8.72		23.35	18.97
	Madera de eucalipto	53.31	6.74	0.39	0.02	39.26	0.31	8.54		22.18	18.49
Resíduos agrícolas y pecuarios en general	Biogás genérico ^a	46.37	10.05	0.00	0.24	43.34	0.00	0.00		22.00	24.43

^a Corresponde al biogás obtenido de la digestión anaerobia de residuos orgánicos, sin procesos de remoción de CO₂ ni H₂S.
Fuente: elaboración propia con base en datos de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME, 2016).

Fundamentos de la bioenergía

La energía de biomasa o bioenergía es considerada como energía obtenida a partir de aquella fuente no convencional de energía renovable que se basa en la degradación espontánea o inducida de cualquier tipo de materia orgánica que ha tenido su origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico y toda materia vegetal originada por el proceso de fotosíntesis, así como de los procesos metabólicos de los organismos heterótrofos, y que no contiene o hayan estado en contacto con trazas de elementos que confieren algún grado de peligrosidad. (Ministerio de Minas y Energía - MinMinas, 2014, p. 4)

La bioenergía, por lo tanto, es la energía que se obtiene directa o indirectamente de la biomasa a partir de procesos de conversión termoquímicos, bioquímicos y/o fisicoquímicos.

Bioenergía y balance de carbono

En sus inicios, los sistemas de bioenergía (SB) fueron considerados procesos de carbono neutral, bajo la premisa de que en el proceso de generación de energía no se produce un incremento en las emisiones de carbono, ya que la biomasa vegetal captura carbono del aire y cuando se transforma a energía, en su uso final, el carbono regresa a la atmósfera para completar el ciclo del carbono (Karthä, 2006).

En general, los SB tienen un gran potencial para mitigar los GEI una vez las fuentes de biomasa empleadas provengan de procesos sostenibles y se empleen sistemas de producción de bioenergía eficientes (Arvizu *et al.*, 2011). Se estima que el uso de cultivos energéticos perennes y de biomásas residuales no dispersas, transformados en sistemas avanzados de conversión, podrían disminuir las emisiones de GEI en un 80% al 90%, en comparación con los sistemas de energía fósil (Arvizu *et al.*, 2011; Faaij, 2018).

Sin embargo, es necesario determinar el balance de carbono real de los SB para evaluar el efecto neto sobre el ciclo del carbono global, dado que los efectos pueden ser: 1) efecto positivo, cuando se libera dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera; 2) efecto negativo, cuando se remueve más CO₂ del que se libera a la atmósfera, y 3) efecto neutral o actividad de carbono neutral, cuando el CO₂ liberado es igual al fijado (Bracmort, 2016). La figura 7.2 ilustra los flujos de carbono que en el balance global podría representar alguno de los efectos anteriores.



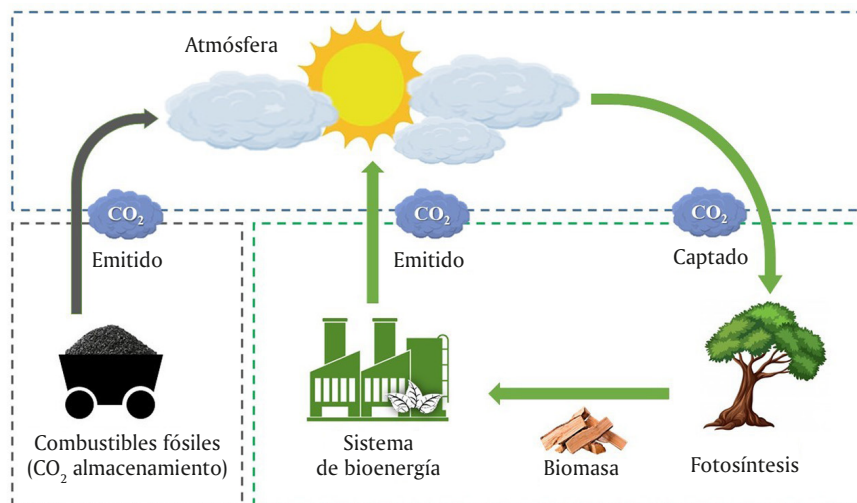


Figura 7.2

Comparación de flujos de carbono
en los sistemas energéticos convencionales y los SB

Fuente: elaboración propia.

De tal forma, puede generalizarse que para categorizar los SB como procesos de “carbono neutral” se deben conocer diversos factores: el tipo y origen de la biomasa, la tecnología empleada y la ventana de tiempo examinada, para realizar el balance de carbono (Cherubini, Peters, Berntsen, Strømman y Hertwich, 2011).

Por ejemplo, plantaciones forestales para la producción de energía que emplean procesos de combustión liberan grandes cantidades de carbono a la atmósfera en un periodo de tiempo muy corto, pero dependiendo del tipo de árbol, la fijación del carbono liberado puede tomar décadas o siglos (Harvey y Heikkinen, 2018).

En consecuencia, para determinar las emisiones de CO₂ y los balances de carbono en SB se debe abordar toda la cadena de valor, desde la producción de la biomasa hasta la obtención y el uso final de la bioenergía. Parámetros como el cambio en el uso del suelo y el manejo de cultivos energéticos pueden llevar a una pérdida de las reservas de carbono, disminuyendo el potencial de mitigación de las emisiones (Valade *et al.*, 2018).

El método convencional para cuantificar las tasas y los flujos de las emisiones de GEI en SB es el enfoque basado en la evaluación “desde la cuna a la tumba”, bajo el concepto de análisis de ciclo de vida (ACV) (Giwa, 2017), es decir que abordará toda la cadena de valor del sistema desde el origen y la

producción de la biomasa hasta su uso final. Este método permite comparar el rendimiento del sistema y determinar el cumplimiento de los *SB* con los estándares o políticas de sostenibilidad.

Adicionalmente, el análisis debe considerar aspectos como los diferentes niveles de sustitución energética en procesos específicos, la temporalidad y el espacio donde se pueden estar realizando otras medidas de captura de carbono. Así, algunas materias primas y tecnologías de primera generación tienen balances de carbono con puntos iguales, por debajo o por encima de los del petróleo, aunque otros, como el etanol de la caña de azúcar en la India, presentan reducciones significativas de CO₂ (Karthi, 2006).

En el caso de las plantaciones forestales, el balance de carbono en diferentes regímenes de manejo de bosques depende principalmente del origen y uso de la madera cosechada (Valade *et al.*, 2018).

Dado que el suelo y la biomasa de las plantas se consideran los dos mayores depósitos de carbono en los ecosistemas terrestres, en el caso de los biocombustibles de primera generación se impacta —directa e indirectamente— el balance de carbono de los ecosistemas por el cambio del uso del suelo para la implementación de monocultivos energéticos. Los cambios en el uso del suelo y su cobertura, por su parte, afectan el intercambio de carbono en los sistemas suelo-planta-atmósfera. Entonces, cambiar hábitats naturales hacia monocultivos alimentarios con destino a biocombustibles implica cambiar una cadena de recursos: uso del suelo, manejo de la tierra y del agua y reducción de biodiversidad. Estos cambios crean una “deuda de carbono”, liberando más CO₂ de lo que se ahorraría con la sustitución de combustibles fósiles (Fargione, Plevin y Hill, 2010; Karthi, 2006).

Retos actuales de la bioenergía

La producción y el uso de la bioenergía se ha intensificado en todo el mundo, basándose en premisas como la necesidad de diversificar las fuentes energéticas para promover el desarrollo económico, la seguridad energética y la calidad del medio ambiente (FAO, 2011). A nivel global, el mayor impulso que ha tenido la bioenergía ha sido en la búsqueda de combustibles alternativos para su uso en transporte y, como resultado, se ha industrializado la producción de biocombustibles (bioetanol y el biodiésel) de primera generación.

Sin embargo, lo anterior ha generado conflictos ambientales y sociales debido a la expansión de monocultivos, a costa de cambios de culturas agrícolas, con pérdida de biodiversidad y/o deforestación de bosques para cultivos energéticos. La intensificación de cultivos energéticos genera altas



emisiones de GEI por el cambio del uso del suelo —como ya se dijo—, y por la producción de agroquímicos de síntesis requeridos en el monocultivo; así mismo se generan GEI en el territorio impactado durante el proceso industrial de producción de los biocombustibles. En las regiones donde están implementados los SB suele presentarse degradación de suelos, por mecanización y uso de agroquímicos de síntesis, así como conflictos sociales por la demanda de agua, energía y tierra para cultivos, y grandes presiones sobre la biodiversidad (Lupp, Steinhäuser, Bastian y Syrbe, 2015; Qin, Zhuang y Chen, 2012). El impacto de los monocultivos comerciales en los ecosistemas tropicales por la alteración de la dinámica ecológica de los sistemas agrícolas tradicionales ha sido ampliamente estudiado por Altieri y Farrell (1984), Gliessman (1983), González (2011), Marten (1986), entre otros.

Por lo tanto, las investigaciones y el desarrollo de tecnologías maduras en SB apuntan hacia el aprovechamiento de cultivos energéticos no comestibles y biomasa residual para la producción de biocombustibles (de segunda y tercera generación), energía eléctrica y generación de calor. A pesar de que se han desarrollado las tecnologías de producción de biocombustibles de segunda y tercera generación, aún se trabaja en investigación y desarrollo para viabilizar su implementación a escala industrial.

Por otro lado, a largo plazo existe una incertidumbre de la suficiencia de la biomasa para suplir el incremento de la producción de bioenergía. Estudios como la hoja de ruta mundial de energías renovables (REMAP 2030, por sus siglas en inglés) desarrollado por la Agencia Internacional de Energías Renovables (Irena, por sus siglas en inglés), ha proyectado que para el 2030 la biomasa podría contribuir con el 60% del uso final de energías renovables, y además se presentará un gran potencial en todos los sectores industriales (Nakada *et al.*, 2014), lo cual puede conducir a una competencia por su uso.

En este contexto, se avecinan desafíos para atender la demanda y la oferta de biomasa tanto en el ámbito regional como en el de comercio internacional, así como la transición desde su uso “tradicional” (combustión directa de biomasa) hacia tecnologías de mayor eficiencia, agrupadas en la bioenergía moderna, la cual contempla: producción de biocombustibles a partir de biomasa lignocelulosa, el establecimiento de SB como biorrefinerías, el aprovechamiento de biomasa residual y densificación en nuevos energéticos (*pellets*), entre otros (Dahunsi y Enyinnaya, 2019).

Por otro lado, ante la proyección de que la demanda de bioenergía entre el 2010 y el 2030 se duplicará (Nakada, Saygin y Gielen, 2014), garantizar la sostenibilidad de las cadenas de suministro de biomasa es un gran reto

debido a la variabilidad y diversidad tanto de la biomasa disponible como de los procesos de transformación, lo cual afecta los costos de operación de proyectos de bioenergía. Esto se traduce en impactos en la viabilidad económica de los SB frente a las energías de origen fósil, que actualmente tienen un costo mucho más bajo.

Con base en la trayectoria investigativa de los autores de este capítulo, es importante destacar que para la implementación de SB es necesario acoplar varias miradas: 1) la revisión del actual uso de energía en el marco de uso racional y eficiente; 2) el inventario y la caracterización de fuentes energéticas con potencial de aprovechamiento; 3) las conveniencias territoriales del uso de biomasa residual en SB; 4) la madurez de tecnologías de conversión bioenergéticas; 5) la política pública a nivel de territorio y Estado relativa a normas, estímulos, sistemas de apoyo para el uso de biomasa residual y no convencionales, y 6) la dinámica socioambiental relacionada con las fuentes energéticas alternas, entre ellas la biomasa residual, para prever los conflictos sociales por uso de la tierra, uso y agotamiento del suelo, uso del agua y disminución de biodiversidad y la evaluación del balance de carbono a lo largo de toda la cadena de valor del SB a proponerse.

Contexto internacional y nacional de la bioenergía

El uso de la bioenergía es una práctica que se viene desarrollando hace cientos de años, principalmente con fines domésticos como cocinar y generar calor. Actualmente, es una de las fuentes de energía renovable con mayor proyección a nivel mundial para la sustitución de los combustibles fósiles (Guo, Song y Buhain, 2015) en usos finales como calefacción, electricidad y transporte.

En el ámbito mundial, el surgimiento de políticas de transición hacia una economía más independiente de los combustibles fósiles ha contribuido a la expansión de la bioenergía, con el fin de alcanzar las metas contra el cambio climático. Por ejemplo, el 36% de los países tienen mandato de mezcla de biocombustibles en el sector transporte (REN21, 2019).

Entre las energías renovables, solo la bioenergía realiza la mayor contribución al suministro mundial de energía. Para el 2017 la bioenergía moderna aportó aproximadamente el 5% del consumo de energía final global, casi el 50% de toda la contribución de las energías renovables (REN21, 2019).

En el 2018, la Unión Europea (UE) llevó el liderazgo en el uso de la bioenergía para calefacción, impulsado principalmente por la Directiva de energía renovable de la UE. En bioelectricidad, China es el líder mundial en



generación, seguido de Estados Unidos, Brasil, la India y Alemania (REN21, 2019). En cuanto a la producción de biocombustibles, esta fue dominada por Estados Unidos y Brasil, que juntos produjeron el 69% de todos los biocombustibles en el 2018 (World Bioenergy Association - WBA, 2019).

Se vienen gestando iniciativas globales tendientes a facilitar el diálogo y la colaboración entre países, organizaciones, académicos y sector privado en relación con alternativas bajas en carbono y sostenibles para el transporte y las bioeconomías, entre ellas los SB.

Una iniciativa internacional destacada es la consolidación de la Plataforma Biofuturo, que agrupa veinte países (Argentina, Brasil, Canadá, China, Dinamarca, Egipto, Finlandia, Francia, la India, Indonesia, Italia, Marruecos, Mozambique, Holanda, Paraguay, Filipinas, Suiza, Reino Unido, Estados Unidos y Uruguay), con el fin de promover el establecimiento de una bioeconomía avanzada baja en carbono que sea sostenible, innovadora y escalable. Este bloque surgió en el 2017, como una iniciativa de los gobiernos, y una de sus metas es impulsar la expansión de la bioenergía mediante estrategias como la implementación de regímenes de incentivos específicos para formas más eficientes de bioenergía, directamente vinculadas a sus ahorros de emisiones de carbono, entre otros (BioFuture Platform, 2017).

En Colombia, el desarrollo industrial de la bioenergía se ha enfocado en la producción de los biocombustibles bioetanol y biodiésel (para mezclas reglamentadas con combustibles fósiles), a partir de cultivos de caña de azúcar y palma aceitera, respectivamente. También se ha acompañado el plan de bioenergía con planes de uso racional y eficiente de energía para el sector industrial (incluyendo las industrias de transformación de biomasa en biocombustibles). En este sentido, el país ha fortalecido las políticas y su reglamentación con la promulgación de leyes y normativas:

- La Ley 697 de 2001, que fomenta el uso racional y eficiente de la energía y promueve la utilización de energías alternativas. La reglamentación de dicha ley define la Comisión Intersectorial para el Uso Racional y Eficiente de la Energía y Fuentes No Convencionales de Energía (CIURE), como una instancia de asesoramiento y apoyo para el Ministerio de Minas y Energía (Decreto 2688 de 2008, modificadorio del 3683 de 2003).
- Las leyes 693 de 2001 y 939 de 2004, donde se crean estímulos para la producción, comercialización y consumo de alcohol carburante y biodiésel, respectivamente.
- La Ley 1715 de 2014, para regular la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional.

Bajo este panorama, Colombia se ha posicionado entre los diez mayores productores globales de etanol, entre los cinco mayores productores globales de aceite de palma y como el mayor productor en América Latina (Cremonez *et al.*, 2015).

Para el 2017, la bioenergía en Colombia es el segundo mayor recurso renovable de energía primaria (3.8 millones de toneladas de petróleo equivalente [Mtoe]), después de la energía hidroeléctrica (4.2 Mtoe) (Gonzalez-Salazar, Venturini, Pogonietz, Finkenrath y Leal, 2017).

Otros avances importantes en Colombia de coalición entre sectores público, académico y privado es la consolidación de la Red Colombiana de Conocimiento en Eficiencia Energética (RECIEE), para el desarrollo de proyectos tendientes a la evaluación del uso de energía en la industria para la implementación de Sistemas de Gestión Integral de Energía (SGIE) según el estándar ISO 50001 (entre ellas se han diagnosticado y recomendado los SGIE a las industrias de bioenergía). Bajo esta misión de país, durante el 2004 al 2019 se han llevado a cabo eventos internacionales y de capacitación académica a gestores energéticos auspiciados por la Asociación Nacional de Industriales (Andi). Así mismo, en los últimos años se han realizado cinco versiones del Premio a la Eficiencia Energética, liderado por el Ministerio de Minas y Energía, la Asociación Nacional de Empresas de Servicios Públicos y Comunicaciones (Andesco), la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y la Financiera de Desarrollo Territorial (Findeter) (RECIEE, 2019).

Procesos de conversión bioenergética a partir de biomasas residuales

Los procesos de conversión energética de la biomasa comprenden las diferentes opciones de transformación necesarias para aprovechar la energía de enlace contenida en las moléculas orgánicas que constituyen la biomasa, como carbohidratos, proteínas y lípidos, entre otras. Como productos de estos procesos se obtienen biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos, los cuales se transforman en energías de uso final como calor o trabajo, ya sea mecánico o eléctrico.

Clasificación general de los procesos de conversión energética

Los procesos de conversión energética de la biomasa se pueden clasificar en tres grupos: procesos fisicoquímicos, procesos termoquímicos y procesos



```

graph TD
    Biomasa[Biomasa] --> Acondicionamiento[Acondicionamiento]
    Acondicionamiento --> ProcesosFisicoquimicos[Procesos fisicoquímicos]
    Acondicionamiento --> ProcesosTermoquimicos[Procesos termoquímicos]
    Acondicionamiento --> ProcesosBiologicos[Procesos biológicos]

    ProcesosFisicoquimicos --> Extraccion[Extracción y acondicionamiento de aceites]
    Extraccion --> Aceite[Aceite]
    Aceite --> Transesterificacion[Transesterificación]
    Transesterificacion --> Biodiesel[Biodiésel]
    Biodiesel --> SistemasCombustion[Sistemas de combustión]

    ProcesosTermoquimicos --> Gasificacion[Gasificación]
    Gasificacion --> GasPobre[Gas pobre]
    GasPobre --> ProcesosSecundarios[Procesos secundarios]
    GasPobre --> BiomasaQuema[Biomasa para quema directa]
    BiomasaQuema --> SistemasCombustion

    Gasificacion --> Syngas[Syngas]
    Syngas --> ProcesosSecundarios

    Gasificacion --> Aceites1[Aceites]
    Aceites1 --> ProcesosSecundarios

    Gasificacion --> Biochar[Biochar]
    Biochar --> ProcesosSecundarios

    Gasificacion --> Gases[Gases]
    Gases --> ProcesosSecundarios

    Gasificacion --> Aceites2[Aceites]
    Aceites2 --> ProcesosSecundarios

    Gasificacion --> Licuefaccion[Licuefacción]
    Licuefaccion --> Aceites3[Aceites]
    Aceites3 --> ProcesosSecundarios

    Gasificacion --> ProcesosSecundarios
    ProcesosSecundarios --> Combustibles[Combustibles sólidos, líquidos y gaseosos]
    Combustibles --> SistemasCombustion

    ProcesosBiologicos --> Fermentacion[Fermentación alcohólica]
    Fermentacion --> Vino[Vino]
    Vino --> Destilacion[Destilación]
    Destilacion --> Etanol[Etanol]
    Etanol --> SistemasCombustion

    ProcesosBiologicos --> Digestion[Digestión anaeróbica]
    Digestion --> Biogas[Biogás]
    Biogas --> SistemasCombustion

    Digestion --> Vinaza[Vinaza]
    Vinaza --> Destilacion

    SistemasCombustion --> Calor[Calor]
    Calor --> UsosCaloricos[Usos calóricos]

    SistemasCombustion --> TrabajoFrontera[Trabajo de frontera]
    TrabajoFrontera --> SistemasMecanicos[Sistemas mecánicos]
    SistemasMecanicos --> TrabajoEje[Trabajo de eje]
    TrabajoEje --> UsosMecanicos[Usos mecánicos]

    TrabajoFrontera --> CalorResidual[Calor residual]
    CalorResidual -.-> UsosCaloricos

    TrabajoEje --> Induccion[Inducción electromagnética]
    Induccion --> Electricidad[Electricidad]
    Electricidad --> UsosElectricos[Usos eléctricos]
  
```

Clasificación general de los procesos de conversión energética de biomasa

Procesos fisicoquímicos

Estos procesos se eligen principalmente con biomásas oleaginosas, cuyo contenido de aceite es extraído por medios físicos o químicos, luego se somete a un proceso de acondicionamiento y después se hace reaccionar con un alcohol primario en presencia de un catalizador para la obtención de

biodiésel, para emplearse en motores de combustión interna. Este proceso se conoce como transesterificación. Típicamente, las biomasas residuales no contienen mucho aceite, por lo cual este tipo de procesos se utiliza principalmente para biomasas de cultivos energéticos (no residuos), como los frutos de la palma de aceite, semillas de girasol, colza, soya, entre otros.

Procesos termoquímicos

Los procesos termoquímicos se eligen principalmente con biomasas lignocelulósicas secas, las cuales se someten a altas temperaturas y diferentes niveles de oxidación para lograr su transformación. Los procesos termoquímicos más reconocidos actualmente son: combustión, gasificación y pirólisis. Estos dos últimos procesos transforman la biomasa en otras sustancias biocombustibles sólidas, líquidas y gaseosas con diferente composición química. También existe la licuefacción, una tecnología para la obtención de bioaceites a partir de materiales lignocelulósicos. A continuación, se hace una breve descripción de cada uno de estos procesos.

Combustión

Este proceso usa la biomasa como combustible para liberación directa de calor. El proceso más frecuente es el uso de biomasa en calderas para producir vapor y posteriormente accionar turbogeneradores que producen energía eléctrica. El contenido de humedad de la biomasa es un factor limitante en la combustión, siendo este inversamente proporcional a la cantidad de energía que el combustible puede entregar al final del proceso. En la figura 7.4 se muestra la relación inversa que se da entre el contenido de humedad y el poder calorífico inferior de un combustible genérico.

El contenido de humedad máximo puede determinarse también según el tipo de material a quemar (*pellets*, briquetas, astillas, leña en general) y la tecnología de combustión, con variaciones del 10% al 40%, encontrándose referencias como la norma europea EN ISO 17225-1 (Organización Internacional de Normalización - OIM, 2014). Por esta razón, en algunos casos debe realizarse un proceso de secado de la biomasa antes de su combustión.



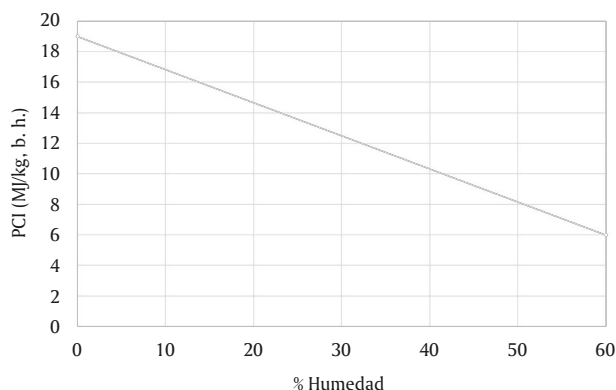


Figura 7.4

Poder calorífico inferior en función del porcentaje de humedad (b. s.) para un combustible compuesto por carbono (50 %), hidrógeno (6 %) y oxígeno (44 %)

Fuente: traducción de Van Loo y Koppejan (2008, p. 13).

Una variante de la combustión tradicional es la co-combustión, una tecnología documentada en la literatura desde hace más de veinte años (Gulyurtlu, Bordalo, Penha y Cabrita, 1995; Saxena y Dewan, 1996; Spliethoff y Hein, 1998), que consiste en la sustitución de parte del carbón, empleando entre el 5 % y el 20 % en energía por biomasa. Este proceso puede implementarse en hornos o calderas que inicialmente utilizaban carbón y ahora incluyen biomasa, siendo posible diferenciar entre co-combustión directa e indirecta (Canalis, Royo, Sebastián, Pascual y Tapia, 2003). Es necesario realizar procesos de acondicionamiento de esta biomasa, conducentes a su densificación.

Gasificación

Proceso termoquímico en el que se transforma un combustible sólido (biomasa, carbón, coque de lignito, etc.) en una mezcla gaseosa, a través de una oxidación parcial (Pérez, Borge y Agudelo, 2010). En el proceso se emplea un agente gasificante (aire, oxígeno, hidrógeno y/o vapor de agua) a temperaturas entre 800 °C y 1000 °C (García-Fernández, 2011), dando lugar a una gran cantidad de reacciones en serie y en paralelo, tanto heterogéneas sólido-gas como en fase gas, en extensión variable, dependiendo del tipo de contacto y de las condiciones de operación, para producir una mezcla gaseosa compuesta por H_2 , CO , CO_2 , H_2S , NH_3 y CH_4 , y productos no deseados como alquitranes y hollín. Existe gran variedad de gasificadores y para su

elección se toma en cuenta aspectos como 1) las características químicas, físicas y morfológicas de la biomasa; 2) el agente gasificante a emplear, y 3) la calidad final requerida para el gas.

Pirólisis

Proceso de degradación térmica de diferentes materiales líquidos y sólidos (derivados del petróleo y la biomasa), bajo atmósfera inerte en un rango de temperaturas entre 200 °C y 500 °C (Monroy-Peña, 2013). En la pirólisis se produce alquitrán, una mezcla de gases compuesta principalmente de CO₂, CO, CH₄, H₂, hidrocarburos ligeros, agua y un residuo sólido rico en carbono y cenizas. La mayor o menor producción de este último depende de las condiciones de temperatura y tiempo en las cuales se realice la pirólisis. Este proceso requiere una fuente externa de calor para alcanzar la entalpía de pirólisis, la cual puede variar para cada tipo de materia prima (Daugaard y Brown, 2003).

Licuefacción

Proceso que convierte materiales de origen fósil o biológico en bioaceites, que luego pueden ser refinados para obtener combustibles de uso final. Un tipo de licuefacción que recientemente ha ganado interés es la licuefacción hidrotérmica (LHT) de biomasa lignocelulósica, donde el material, en presencia de agua, se calienta a temperaturas entre 250 °C y 450 °C y presiones entre 70 y 350 bares, con tiempos de residencia entre 5 y 60 min, en presencia de un catalizador que ayuda a la remoción de heteroátomos como oxígeno, nitrógeno o azufre, lo que ayuda a mejorar el rendimiento y la composición del bioaceite (Perkins, Batalha, Kumar, Bhaskar y Konarova, 2019).

Dado que el proceso se lleva a cabo en condiciones cercanas al punto crítico del agua, esta puede actuar como solvente. Así, durante la LHT, la materia orgánica sufre inicialmente reacciones de hidrólisis, deshidratación y descarboxilación para formar compuestos intermedios solubles en agua, seguidas por reacciones de polimerización que dan lugar a compuestos insolubles en agua, como bioaceites y biochar (Perkins *et al.*, 2019).

Técnica y ambientalmente eficaz es considerar la biomasa como una materia prima idónea para la producción de energía y productos químicos, dado su carácter renovable y su amplia distribución. Este nuevo planteamiento se considera como biorrefinería (el cual se amplía más adelante), definida como la industria de refinación para la producción de energía, biocombustibles (bioetanol, biodiésel, biogás e hidrógeno), productos químicos



finos y básicos y biopolímeros y bioplásticos a partir de biomasa vegetal (Monroy-Peña, 2013). Bajo este concepto de procesos integralmente optimizados, cobran importancia todos los procesos termoquímicos descritos.

Procesos bioquímicos

Los procesos bioquímicos son llevados a cabo por microorganismos, donde las condiciones de operación, el tipo de biomasa empleada como sustrato y el tipo de microorganismo determinan el producto final obtenido, que puede ser un biocombustible líquido o gaseoso. Como característica común de estos procesos se resalta la fuerte influencia de las condiciones ambientales: la temperatura, el pH, la concentración de sustancias tóxicas e inhibidoras, el tiempo de retención, entre otros.

Los procesos bioquímicos para la conversión energética de biomasa más reconocidos son la fermentación alcohólica, que da como resultado etanol, y la digestión anaeróbica, cuyo producto final es el metano en diferentes porcentajes en el biogás. A continuación se presenta una breve descripción de estos procesos.

Fermentación alcohólica

Proceso biológico realizado con la intervención de microorganismos específicos como *Saccharomyces cerevisiae* y *Zymomonas mobilis*, que utilizan fuentes de carbono, como glucosa y otros azúcares fermentables, para su metabolismo, transformándolas en bioetanol, CO₂ y compuestos necesarios para el metabolismo microbiano. La producción de etanol de primera generación utiliza materias primas sacarinas que pueden ser directamente fermentadas por los microorganismos. Con biomasa lignocelulósicas como la mayoría de biomasa residual, es necesario un proceso de pretratamiento e hidrólisis para la ruptura de la estructura lignocelulósica (celulosa, hemicelulosa y lignina) para que las moléculas de β -glucosa de la celulosa y los polisacáridos de la hemicelulosa se transformen en azúcares fermentables, disponibles para los microorganismos de la fermentación alcohólica. El pretratamiento puede darse por métodos fisicoquímicos, biológicos o enzimáticos, o una integración de métodos, lo cual puede añadir complejidad al proceso.

Digestión anaerobia

Proceso biológico llevado a cabo por diversos tipos de bacterias que descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno molecular (O₂). El

producto energético de interés en este proceso es el biogás (una mezcla de CH_4 , CO_2 , H_2 , H_2S , entre otros), cuya composición depende directamente del tipo de sustrato y el proceso, como se aprecia en la tabla 7.3.

Tabla 7.3
Composición aproximada del biogás en función del sustrato utilizado

Componente	Unidades	Lodos de depuradora	Residuos agrícolas	Rellenos sanitarios
CH_4	%	65-75	45-75	45-55
CO_2	%	20-35	25-55	25-30
H_2	%	trazas	0.5	0.00
CO	%	<0.2	<0.2	<0.2
N_2	%	3.4	0.01-5.00	10-25
O_2	%	0.5	0.01-2.00	1-5
H_2S	mg/m^3	<8000	10-30 000	>8000
MH_3	mg/m^3	trazas	0.01-2.50	trazas
Siloxanos	mg/m^3	<0.1-5.0	trazas	<0.1-5.0

Fuente: elaboración propia con base en Deublein y Steinhauser (2008, p. 51).

La digestión anaerobia, como proceso biológico, se ve fuertemente influenciada por factores ambientales como la temperatura, el pH, la disponibilidad de nutrientes en el medio y la presencia de sustancias tóxicas e inhibidoras como cationes y metales pesados, ácidos grasos volátiles, hidrógeno, nitrógeno amoniacal, sulfatos, sulfuros y fenoles, entre otros (Fernández, Vázquez y Martínez, 2002; Ortega, 2006; Santana y Fernandes, 2008; Siles, García-García, Martín y Martín, 2011). Estas sustancias alteran la cinética de degradación de la materia orgánica y la magnitud de dicho efecto depende de la naturaleza y concentración de la sustancia inhibitoria (Fernández *et al.*, 2002). Actualmente, la digestión anaeróbica es considerada como una tecnología madura en todo el mundo (Irena, 2015).

Criterios para la selección de un proceso de conversión energética de biomasa

Existen diversos tipos de biomasa residual, así como procesos disponibles para su transformación en energía. En teoría, todas las biomásas contienen carbono, nitrógeno, hidrógeno y otros elementos necesarios para posibilitar su conversión en energía o en biocombustibles, mediante cualquiera de los



procesos descritos; sin embargo, existen criterios básicos para determinar si un proceso es apropiado para una biomasa. A continuación se explican los más importantes.

Humedad

Es un parámetro que permite, de manera preliminar, determinar la conveniencia de un proceso de conversión para su aprovechamiento energético. Como se explicó en la sección “Procesos termoquímicos”, la humedad limita el uso de la biomasa en procesos termoquímicos como la combustión. Considerando esto, es conveniente evaluar para cada caso particular si la biomasa puede usarse como tal, o si las condiciones técnicas y económicas del proyecto permiten realizar un secado previo a la conversión térmica de la biomasa. En caso de que la ruta termoquímica no resulte viable, pueden explorarse rutas bioquímicas, las cuales no tienen restricción en cuanto a la humedad de la biomasa. En estos casos lo que interesa es su composición química, siendo este el segundo criterio a considerar para la selección de un proceso de conversión energética.

Composición química

La biomasa residual de origen vegetal se caracteriza por presentar en su composición tres macromoléculas orgánicas: celulosa, hemicelulosa y lignina. La celulosa es una cadena de azúcares simples de seis carbonos, específicamente glucosa; la hemicelulosa es una forma ramificada de cadenas de azúcares simples de cinco y seis carbonos, y la lignina, un polímero de naturaleza aromática con alto peso molecular que comprende un conjunto más diverso de moléculas. Esta diversidad estructural le confiere a la biomasa residual vegetal cierta facilidad o dificultad para ser utilizada en procesos bioquímicos, ya que solo la celulosa y la hemicelulosa pueden aportar sustratos para los microorganismos que participan en estos procesos.

Biomásas con bajo contenido de lignina pueden ser hidrolizadas y para aprovechar así los azúcares resultantes por vía fermentativa para la producción de etanol de segunda generación. En menor medida, estas biomásas también se pueden utilizar como fuente de carbono para procesos de digestión anaeróbica. Un alto contenido de lignina en la biomasa es un factor limitante para la aplicación de procesos de conversión bioquímicos como la fermentación alcohólica. Para las biomásas residuales pecuarias con humedad superior al 80%, el proceso bioenergético utilizado con más

frecuencia es la digestión anaeróbica; cuando se tienen biomásas pecuarias secas también se pueden aplicar procesos termoquímicos.

Estado de desarrollo tecnológico

Otro criterio importante para la selección de procesos de conversión es su estado de desarrollo. Se consideran tecnologías en: 1) fase de investigación y desarrollo básica y aplicada; 2) fase demostrativa; 3) fase comercial temprana, y 4) fase comercial. Hay tecnologías que se han utilizado durante siglos, como la combustión, pero hay otras que se encuentran en fase de investigación o en prototipos demostrativos, como la gasificación y licuefacción, y otras aún requieren más estudios para probar su aplicación directa y uso industrial (pirólisis). Resulta fundamental tener en cuenta este aspecto cuando se evalúen opciones de inversión en proyectos bioenergéticos.

Finalmente, puede afirmarse que la viabilidad técnica, económica y ambiental de un proceso de conversión de biomasa en bioenergía requiere evaluar los siguientes parámetros: 1) cuantificación, disponibilidad y conveniencia de uso de la biomasa residual, que permita garantizar suministros continuos y suficientes para el proceso, tomando en cuenta criterios como la seguridad y la calidad alimentaria, el rol de la biomasa en el ecosistema en el cual está inmersa y otros posibles usos de mayor valor agregado de la biomasa; 2) caracterización fisicoquímica de la biomasa residual, pues la composición de la biomasa determina el proceso de conversión energética a utilizar; 3) grado de dispersión y densidad aparente de la biomasa, que conduce a la forma de recolectarla, transportarla, manipularla y almacenarla, y también determinan la tecnología de conversión energética; 4) madurez y eficiencia de conversión de la tecnología de transformación de la biomasa hasta la obtención de productos finales, y 5) entorno legal, social y de mercado tanto para las materias primas como para los productos obtenidos en los procesos de conversión.

El concepto de biorrefinería

Como ya se expuso, en el mundo hay un creciente interés en dar un mejor uso a la biomasa residual como fuente de productos de valor agregado. Esto se convirtió en toda una tendencia, que en los años noventa dio lugar a la aparición del término “biorrefinería” (Sacramento-Rivero, Romero, Cortés-Rodríguez, Pech y Blanco-Rosete, 2010), concebida como una instalación



industrial que busca optimizar el uso de los recursos, minimizar los desechos y, por consiguiente, maximizar el rendimiento y los beneficios de los procesos productivos (Hackenberg, 2008).

Una biorrefinería puede definirse como la industria de refinación para la producción de productos con valor agregado: energía (calor, trabajo), biocombustibles, (bioetanol, biodiésel, biometano, hidrógeno) y sustancias químicas (insumos químicos, biopolímeros, bioplásticos) a partir de la biomasa (Cherubini *et al.*, 2009; Monroy-Peña, 2013), que pueden ser ofrecidos en el mercado (IEA, 2013). Las biorrefinerías integran procesos físicos, biológicos y químicos para transformar cualquier tipo de biomasa; esta integralidad es lo que permite viabilizar procesos que, por sí solos, serían técnica y económicamente inviables.

Adicionalmente, una biorrefinería puede concebirse como un sistema totalmente nuevo, o como un sistema anexo a un proceso industrial existente, este último escenario considerado generalmente como favorable, dado que se aprovecha parte de la estructura física y administrativa existente. En cualquier caso, el diseño e implementación de una biorrefinería requiere una estrategia clara para diversificar los productos, reducir el impacto ambiental y reducir los costos en los sistemas existentes, cuando sea el caso (García y García, 2013).

Clasificación

Las biorrefinerías pueden clasificarse bajo ciertos criterios como la materia prima utilizada (biomasa), el proceso de conversión energética, el tipo de plataforma y los productos finales obtenidos (Cherubini *et al.*, 2009). Las *materias primas* corresponden al tipo de biomasa a partir de la cual se obtienen los productos en las biorrefinerías. En la sección “Biomasa residual como fuente de energía” se presentó una clasificación de la biomasa para aprovechamiento energético; la clasificación bajo el criterio de *procesos de conversión* energética de biomasa en una biorrefinería, se puede abordar de acuerdo con lo presentado en la sección “Procesos de conversión bioenergética a partir de biomasa residual”.

Las *plataformas* representan los productos intermedios entre las materias primas y los productos finales, que se reconocen como los pilares de la clasificación de las biorrefinerías, ya que pueden ser obtenidos mediante diferentes procesos aplicados a diferentes biomasa. Las plataformas más reconocidas actualmente son:

- Biogás. Es una mezcla principalmente de metano y dióxido de carbono, se obtiene en el proceso de digestión anaerobia.
- Syngas. Es una mezcla compuesta, principalmente, de monóxido de carbono e hidrógeno que se obtiene a partir de la gasificación de biomasa.
- Hidrógeno. Un producto de diferentes procesos: reacción de intercambio agua-gas, reformado de vapor, electrólisis del agua y fermentación.
- Azúcares C_6 . Son compuestos que siguen la fórmula general $C_6H_{12}O_6$, como glucosa, fructosa y galactosa. Se obtienen en la hidrólisis de la sacarosa, el almidón, la celulosa y la hemicelulosa.
- Azúcares C_5 . Son compuestos que siguen la fórmula general $C_5H_{10}O_5$, como xilosa, arabinosa, entre otros. Se obtienen principalmente de la hidrólisis de hemicelulosa.
- Lignina. Es un compuesto complejo formado a partir del fenil-propano $C_9H_{10}O_2(OCH_3)_n$, obtenido en el procesamiento de materiales lignocelulósicos.
- Bioaceites. Son mezclas complejas de compuestos de diversos pesos moleculares, obtenidos en el proceso de pirólisis.
- Aceites. Corresponden a los triglicéridos, que se obtienen a partir de cultivos oleaginosos, algas y residuos aceitosos.
- Jugos orgánicos. Son mezclas de diferentes químicos, correspondientes a la fase líquida del extracto obtenido en el prensado de biomasa húmedas, como algunas especies de pasto.
- Electricidad y calor. Puede ser usada para suplir los requerimientos de la misma biorrefinería o vendida a la red.

Por último, la clasificación según los *productos* de las biorrefinerías se puede dar básicamente por la obtención de tres productos, individuales o combinados: 1) energía, expresada en forma de calor y electricidad; 2) productos energéticos, que incluyen los biocombustibles (bioetanol, biodiésel, biometano, hidrógeno, biocombustibles sintéticos), y 3) productos no energéticos, que incluyen: químicos finos (aminoácidos, ácidos orgánicos y extractos utilizados en la industria alimentaria, química o farmacéutica), alimento para animales y biopolímeros, entre otros. En la tabla 7.4 se



muestran algunos ejemplos de biorrefinerías, clasificadas según la materia prima y la tecnología de conversión.

Tabla 7.4

Ejemplos de clasificación de biorrefinerías según materia prima y la tecnología utilizada

Criterio	Biorrefinería	Biomasa utilizada	Tecnologías utilizadas
Según la materia prima utilizada	Biorrefinería verde	Biomasa húmeda: pastos y cultivos verdes.	Pretratamiento, prensado, fraccionado, separación y digestión.
	Biorrefinería de cultivo completo	Cultivos completos incluida la paja de cereales (trigo, centeno, maíz).	Molienda seca o húmeda, conversión bioquímica.
	Biorrefinería lignocelulósica	Madera, residuos agrícolas, cultivos energéticos y residuos municipales.	Pretratamiento, hidrólisis química y enzimática, fermentación, separación.
	Biorrefinería marina	Biomasa acuática: microalgas y macroalgas.	Extracción y separación.
Según el tipo de tecnología	Biorrefinería biológica	Todo tipo de biomasa.	Pretratamiento, hidrólisis química y enzimática, fermentación/ digestión anaerobia, separación.
	Biorrefinería termoquímica	Todo tipo de biomasa.	Conversión termoquímica, torrefacción, pirólisis, gasificación, separación, síntesis catalítica.

Fuente: adaptación de Cárdenas (2012, p. 17).

Consideraciones económicas y ambientales

En el ámbito económico, las biorrefinerías pueden tener un impacto considerable dado que el incremento de este tipo de industrias favorecerá la transición de una economía basada en el petróleo (petroeconomía) hacia una economía basada en recursos renovables (bioeconomía), la cual se fundamenta en la oferta de bioproductos, biocombustibles y bioenergía al mercado (Kamm, Gruber y Kamm, 2010; Sacramento-Rivero *et al.*, 2010).

La disponibilidad de tecnología es un aspecto fundamental para el desarrollo de las biorrefinerías. Dado que las tecnologías de conversión energética no están disponibles en todo el mundo, es necesaria su importación, lo que incrementa los costos y la huella de carbono del proceso global. Un ejemplo de esta situación se presenta en Colombia, donde no existe la mayoría de estas tecnologías, por lo cual se crearon estímulos como la Ley 1715 de 2014 (MinMinas, 2014) que establece la exención de impuestos en la importación de maquinaria para la producción de bioenergía.

Por lo tanto, sería estratégico que las tecnologías de biorrefinación fuesen desarrolladas y adaptadas de acuerdo con los recursos locales, permitiendo una solución sostenible ante la sobreexplotación y el uso ineficiente que la humanidad da actualmente a los recursos naturales. Este tipo de proyectos son impulsados por referentes importantes en el ámbito mundial como la Sociedad Iberoamericana para el Desarrollo de las Biorrefinerías, el Laboratorio Nacional de Energías Renovables y la Agencia Internacional de la Energía.

Experiencias relevantes del Grupo de Investigación en Eficiencia Energética y Energías Alternativas (GEAL) en bioenergía

En el área de aprovechamiento energético de biomasa residual, el GEAL ha adelantado diversos estudios que se pueden enmarcar en cinco ejes de trabajo:

Inventario y caracterización de biomasa residual de la región

La biomasa residual ha sido identificada como una oportunidad estratégica para el desarrollo energético e industrial en el valle geográfico del río Cauca. Sin embargo, para aprovechar comercialmente estos recursos, es necesario



superar barreras como su alta dispersión geográfica, variedad composicional e incertidumbre sobre su disponibilidad real en el tiempo.

Por lo anterior, empresarios de la región en asocio con la Cámara de Comercio de Cali desarrollaron el proyecto “Nuevos modelos de negocio para las empresas de la iniciativa Clúster de Bioenergía del valle geográfico del río Cauca”, cuyo primer componente consistió en la elaboración de un inventario de biomásas residuales disponibles en la región, el cual fue desarrollado por el GEAL mediante el subproyecto “Identificación y Caracterización de la Biomasa Residual en el Valle del Cauca para Aprovechamiento Energético”.

Este trabajo, ejecutado entre noviembre de 2015 y julio de 2016, permitió obtener información relevante y actualizada para determinar oportunidades de negocios bioenergéticos en la región de estudio, específicamente para tres biomásas seleccionadas: 1) residuos de cosecha de caña de azúcar, 2) residuos forestales y 3) residuos avícolas, encontrando que la producción anual supera las 950 000, 52 000 y 870 000 t/año, respectivamente. Toda esta biomasa fue, además, georreferenciada en el área de estudio y se realizó una caracterización fisicoquímica exhaustiva con parámetros de interés energético.

Obtención de biodiésel a partir de biomásas residuales oleaginosas

Entre 2009-2010 se desarrolló el proyecto “Estudio del manejo de los residuos pecuarios de la industria pesquera en Buenaventura y su zona de influencia, con el propósito de proponer procesos eficientes en sistema de producción más limpia” (2009-2010), donde se realizó la cuantificación y caracterización de la biomasa residual generada en este sector. Dentro de las alternativas propuestas se evaluó la producción de biodiésel a partir de las estearinas, un residuo generado en la producción de harina de pescado (Vélez-Peña, 2009). Se estimó que la producción de estearinas alcanza cerca de 75 t/año, con un contenido de aceite promedio del 83%, y la producción de biodiésel a partir de estas tiene un potencial promedio de 0.56 L de biodiésel/L de aceite, para diferentes relaciones molares aceite/metanol y diferentes concentraciones de catalizador NaOH. Los resultados son equiparables a otros estudios como el de Naranjo y Jiménez (2016).

Como resultado del proyecto de manejo de residuos pesqueros, se publicó el libro *Agroindustria pesquera en el Pacífico colombiano: gestión de*

residuos pecuarios en sistema de producción más limpia (Rodríguez, Hleap, Estrada, Clavijo y Perea, 2011).

Otro proyecto relacionado con el aprovechamiento de fuentes oleaginosas fue “Etanólisis de aceites usados provenientes de restaurantes utilizando biocatalizadores nativos de origen vegetal y animal”, desarrollado entre el 2009 y el 2010. Este proyecto dio lugar a cuatro trabajos de grado de Ingeniería Agroindustrial (Latorre, 2010; Luna, 2010; Rodríguez, 2010; Romero, 2010), y a la publicación de la cartilla *Fuentes alternativas de energía n.º 4: Agroindustria de los Biocombustibles* (Rodríguez et al., 2010).

En el 2015 se ejecutaron dos proyectos con estudiantes de intercambio procedentes de Brasil, en los cuales se evaluaron metodologías para la obtención de biodiésel a partir de:

- Borra de café (BC) (Rodríguez, 2015). Se realizó la investigación iniciando con el acopio y adecuación de la BC, proveniente de las cafeterías de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira. Se extrajo, mediante lixiviación con etanol, el aceite de BC con rendimientos de 0.07 a 1.0 kg aceite/kg BC. La etapa de transesterificación tuvo rendimientos entre el 49% y el 65% para diferentes relaciones molares aceite/alcohol y diferentes concentraciones de catalizador. El biodiésel obtenido en todos los casos cumplió con los parámetros normativos de densidad entre 850-900 kg/m³, e índice de acidez 0.5 mg KOH/g.
- Aceites usados de fritura (AFU) (Cruz de Oliveira, 2015). Aceite proveniente de una panadería local en la ciudad de Palmira. Se realizó pretratamiento y adecuación, con rendimiento del 81.4% utilizando grandes cantidades de agua, solución de NaOH y energía para secado. El rendimiento en la transesterificación varió ampliamente entre el 40% y el 80% para varias relaciones molares y concentraciones de catalizador KOH.

Estos proyectos aportaron información útil para conocer la viabilidad en el aprovechamiento de biomasa residual local.

Evaluación del potencial de producción de biogás (metano) a partir de residuos pecuarios y agroindustriales

En el 2015 se evaluó el potencial de valorización energética de vinazas procedentes de la industria azucarera, empleando pretratamientos oxidativos como paso previo a la digestión anaerobia, en la tesis de maestría de Clavijo



(2015). Se determinó que los pretratamientos con ozono pueden incrementar el potencial de producción de metano ($\text{ml CH}_4 \text{ CNTP/g DQO}$) a partir de vinaza, y que esta alternativa representa una oportunidad para la disminución del consumo energético y las emisiones de CO_2 en la industria azucarera.

También se han realizado, a través de trabajos grado, caracterizaciones de residuos de la producción avícola y porcina (Muñoz, 2016), así como de los residuos de plazas de mercado (Martínez, 2016) y cafeterías (Mejía, 2016) para estimar el potencial de producción de biogás, como alternativa de obtención de energía renovable.

Apoyo a cursos de pregrado y posgrado

En algunas asignaturas de pregrado y posgrado se han ido alimentando los temas de discusión en bioenergía y sostenibilidad en el uso de diferentes tecnologías de transformación de biomasa. El GEAL soporta las asignaturas de pregrado: 1) Balance de masa y energía, 2) Energía y ambiente y 3) Agroindustria de los biocombustibles; y asignaturas de posgrado: 4) Energía, desarrollo y ambiente, 5) Agroindustria de los biocombustibles avanzados y 6) Fuentes alternas. También se publicó el libro *Energía y ambiente* (Rodríguez, González, Rojas y Palacios, 2013).

Participación en la línea de investigación de la RECIEE Diagnósticos tecnológicos integrales, con proyectos de implementación de SGIE en nueve empresas del Valle del Cauca

Entre el 2014 y el 2018 se desarrolló el programa de consolidación de la RECIEE con enfoque de integración con la industria y con los diferentes actores y usuarios de energía. El GEAL caracterizó nueve empresas del sector productivo del Valle del Cauca: dos empresas de alimentos, dos empresas de bioenergía, una empresa de transformación de recursos forestales y dos empresas del sector café. Se desarrollaron estrategias y mecanismos para implementar el Sistema de Gestión de la Energía (SGE), con el fin de incrementar la eficiencia energética, la productividad y la competitividad de las industrias, teniendo como lineamiento la norma ISO 50001. Se realizó el curso de educación continuada “Actualización en eficiencia energética y potencial de energías no convencionales en la industria” (RECIEE, 2018).

El carácter integrador del programa entre Universidad-Empresa-Estado promueve la transferencia de experiencias, sostenibilidad e impacto del estado de uso de la energía en la industria a nivel regional y nacional.

Por último, se tiene que un resultado importante del programa de consolidación de la RECIEE es la firma del convenio marco en el 2018, a través del cual se establece su funcionamiento. En este convenio intervienen 21 universidades colombianas, entidades como la Corporación Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico del Sector Eléctrico (Cidet), Energía Eficiente S. A., la Corporación Ambiental Empresarial (Caem), y aliados estratégicos como la Asociación Nacional de Industriales (Andi), la Asociación Nacional de Empresas de Servicios Públicos y Comunicaciones (Andesco), el Instituto Nacional de Normalización Técnica (Icontec), la Cámara de Comercio de Bogotá (CCB), el Programa de Transformación Productiva (PTP) y la Agencia Internacional para el Desarrollo de los Estados Unidos (USAID).

Referencias

- Altieri, M. A. y Farrell, J. (1984). Traditional farming systems of south-central Chile, with special emphasis on agroforestry. *Agroforestry Systems*, 2, 3-18. doi: 10.1007/bf02345352
- Arvizu, D., Bruckner, T., Chum, H., Edenhofer, O., Estefen, S., Faaij, A., ... y Zwickel, T. (2011). Technical Summary. En O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer y C. von Stechow (eds.), *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation* (pp. 27-158). Cambridge, UK-USA: Cambridge University Press. Recuperado de <https://bit.ly/3mAw4V>
- BioFuture Platform. (2017). *Scaling up the low carbon bioeconomy: an urgent and vital challenge*. Recuperado de <https://bit.ly/31XYGUM>
- Bracmort, K. (2016). *The Renewable Fuel Standard (RFS): In brief*. Recuperado de <https://bit.ly/3s4KzYq>
- Canalis, P., Royo, J., Sebastián, F., Pascual, J. y Tapia, R. (2003). La co-combustión: una alternativa para la utilización de la biomasa residual. *InfoPower*, (58), 11-14.
- Cárdenas, R. (2012). *Biorefinerías para la producción de biocombustibles de segunda generación* (Tesis de doctorado). Universitat Politècnica de València, Valencia. Recuperado de <https://bit.ly/31XYYuQ>



- Cherubini, F., Jungmeier, G., Wellisch, M., Willke, T., Skiadas, I., van Ree, R. y de Jong, E. (2009). Toward a common classification approach for biorefinery systems. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 3(5), 534-546. doi: 10.1002/bbb.172
- Cherubini, F., Peters, G. P., Berntsen, T., Strømman, A. H. y Hertwich, E. (2011). CO₂ emissions from biomass combustion for bioenergy: atmospheric decay and contribution to global warming. *GCB Bioenergy*, 3(5), 413-426. doi: 10.1111/j.1757-1707.2011.01102.x
- Chu, S. y Majumdar, A. (2012). Opportunities and challenges for a sustainable energy future. *Nature*, 488, 294-303. doi: 10.1038/nature11475
- Ciria, M. P. C. (2007, 1º de enero). *Energía de la biomasa y biocarburantes. Producción de biomasa de cultivos energéticos*. Recuperado de <https://bit.ly/2Rpad1>
- Clavijo, J. (2015). *Evaluación del proceso de digestión anaeróbica de vinaza pretratada con procesos avanzados de oxidación como alternativa energética de implementación tecnológica en un proceso de producción de etanol a partir de caña de azúcar* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira. Recuperado de <https://bit.ly/3s4dJHg>
- Congreso de Colombia. (2001, 19 de septiembre). Ley 693 de 2001. Por la cual se dictan normas sobre el uso de alcoholes carburantes, se crean estímulos para su producción, comercialización y consumo, y se dictan otras disposiciones. *Diario Oficial* n.º 44564. Recuperado de <https://bit.ly/2OQWf37>
- Congreso de Colombia. (2001, 3 de octubre). Ley 697 de 2001. Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones. *Diario Oficial* n.º 44573. Recuperado de <https://bit.ly/3bmHhth>
- Congreso de Colombia. (2004, 31 de diciembre). Ley 939 de 2004. Por medio de la cual se subsanan los vicios de procedimiento en que incurrió en el trámite de la Ley 818 de 2003 y se estimula la producción y comercialización de biocombustibles de origen vegetal o animal para uso en Motores diésel y se dictan otras disposiciones. *Diario Oficial* n.º 45778. Recuperado de <https://bit.ly/3sFdItl>
- Correa, D. F., Beyer, H. L., Possingham, H. P., Thomas-Hall, S. R. y Schenk, P. M. (2017, julio). Biodiversity impacts of bioenergy production: Microalgae vs. first generation biofuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 1131-1146. doi: 10.1016/j.rser.2017.02.068
- Cremonez, P. A., Feroldi, M., Feiden, A., Teleken, J. G., Gris, D., Dieter, J., de Rossi, E. y Antonelli, J. (2015, marzo). Current scenario and prospects of use of

- liquid biofuels in South America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 352-362. doi: 10.1016/j.rser.2014.11.064
- Cruz de Oliveira, M. (2015). *Determinación de una metodología para la obtención de biodiesel a partir de aceite de fritura usado (AFU)* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira, Instituto Federal de Investigación de Rondonia (IFRO), Brasil. Inédito.
- Dahunsi, O. S. y Enyinnaya, M. (2019). The bioenergy potentials of lignocelluloses. En I. H. Al-Bahadly (ed.), *Energy Conversion - Current Technologies and Future Trends* (pp. 94-104). Londres: IntechOpen.
- Daugaard, D. E. y Brown, R. C. (2003). Enthalpy for pyrolysis for several types of biomass. *Energy & Fuels*, 17(4), 934-939. doi: 10.1021/ef020260x
- Deublein, D. y Steinhauser, A. (eds.). (2008). *Biogas from waste and renewable resource*. Weinheim, Alemania: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.
- Escalante, H., Orduz, J., Zapata, H., Cardona, M. y Duarte, M. (2011). *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. Bucaramanga: Ediciones Universidad Industrial de Santander.
- Faaij, A. (2018). *Securing sustainable resource availability of biomass for energy applications in Europe; review of recent literature*. Recuperado de <https://bit.ly/3t5Xv1z>
- Fargione, J. E., Plevin, R. J. y Hill, J. D. (2010). The Ecological Impact of Biofuels. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 41, 351-377. doi: 10.1146/annurev-ecolsys-102209-144720
- Fernández, G., Vázquez, E. y Martínez, P. (2002). Inhibidores del proceso anaerobio: compuestos utilizados en porcicultura. *Ingeniería*, 6(3), 67-71.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2011). ¿Qué es bioenergía sostenible? Recuperado de <http://www.fao.org/energy/bioenergy/es/>
- García, M. y García, J. (2013). Nuevos conceptos para biorrefinerías de aceite de palma. *Revista Palmas*, 34(Número especial, tomo II), 66-84.
- García-Fernández, L. F. (2011). *Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá. Recuperado de <https://bit.ly/322a16o>
- Giwa, A. (2017). Comparative cradle-to-grave life cycle assessment of biogas production from marine algae and cattle manure biorefineries. *Bioresource Technology*, 244(Parte 2), 1470-1479. doi: 10.1016/j.biortech.2017.05.143
- Gliessman, S. R. (1983). Allelopathic interactions in crop-weed mixtures. *Journal of Chemical Ecology*, 9, 991-999. doi: 10.1007/bf00982206
- González, M. (2011). *Introducción a la agroecología*. Valencia: S. E. de Agricultura Ecológica.



- González-Salazar, M. A., Venturini, M., Poganietz, W.-R., Finkenrath, M., L. V. y Leal, M. R. (2017, junio). Combining an accelerated deployment of bioenergy and land use strategies: Review and insights for a post-conflict scenario in Colombia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 159-177. doi: 10.1016/j.rser.2017.01.082
- Grupo de Investigación en Eficiencia Energética y Energías Alternativas (GEAL). (2016). *Identificación y priorización de biomasas residuales para aprovechamiento energético en el valle geográfico del río Cauca y sus alternativas de procesamiento*. Palmira: Universidad Nacional de Colombia.
- Gulyurtlu, I., Bordalo, C., Penha, E. y Cabrita, I. (1995). Co-combustion of coals with straw in a fluidised bed combustor. *The Institute of Energy's Second International Conference on Combustion & Emissions Control* (pp. 137-147). doi: 10.1016/b978-0-902597-49-5.50016-0
- Guo, M., Song, W. y Buhain, J. (2015, febrero). Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 712-725. doi: 10.1016/j.rser.2014.10.013
- Hackenberg, N. (2008). Biocombustibles de segunda generación. *Revista Virtual REDESMA*, 2(2), 49-61.
- Harvey, C. y Heikkinen, N. (2018). Congress says biomass is carbon-neutral, but scientists disagree. *EGENews*. Recuperado de <https://bit.ly/39YwdCG>
- Havlík, P., Schneider, U., Schmid, E., Böttcher, H., Fritz, S., Skalský, R., ... y Obersteiner, M. (2011). Global land-use implications of first and second generation biofuel targets. *Energy Policy*, 39(10), 5690-5702. doi: 10.1016/j.enpol.2010.03.030
- Ho, D. P., Ngo, H. H. y Guo, W. (2014). A mini review on renewable sources for biofuel. *Bioresource Technology*, 169, 742-749. doi: 10.1016/j.biortech.2014.07.022
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (Idae). (2007). *Biomasa: Cultivos energéticos*. Madrid: autor.
- International Energy Agency (IEA). (2013, 15 de agosto). *IEA Bioenergy Task 42 Biorefinery*. Recuperado de <https://task42.ieabioenergy.com/>
- International Energy Agency (IEA). (2018). *Key World Energy Statistics 2018*. Recuperado de <https://bit.ly/3gt8xdG>
- International Renewable Energy Agency (Irena). (2015). *Biomass for heat and power: Technology brief*. Recuperado de <https://bit.ly/3wGUneE>
- Kamm, B., Gruber, P. R. y Kamm, M. (2010). *Biorefineries - Industrial Processes and Products: Status Quo and Future Directions*. Weinheim, Alemania: Wiley-VCH.

- Kartha, S. (2006). Los efectos medioambientales de la bioenergía. En P. Hazell y R. K. Pachauri (eds.), *Bioenergía y agricultura: promesas y retos* (pp. 9-10). Washington D.C.: International Food Policy Research Institute (IFPRI). Recuperado de <https://bit.ly/2QJFoAj>
- Latorre, D. (2010). *Etanolisis de aceites usados de restaurantes utilizando biocatalizadores nativos de origen vegetal inmovilizados en quitosano* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira. Inédito.
- Luna, J. (2010). *Etanolisis de aceite de fritura usado utilizando lipasas pancreáticas de pollo (CPL) inmovilizadas en colágeno* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira. Inédito.
- Lupp, G., Steinhäuser, R., Bastian, O. y Syrbe, R.-U. (2015). Impacts of increasing bioenergy use on ecosystem services on nature and society exemplified in the German district of Görlitz. *Biomass and Bioenergy*, 83, 131-140. doi: 10.1016/j.biombioe.2015.09.006
- Marten, G. G. (1986). *Traditional agriculture in Southeast Asia: A human ecology perspective*. Boulder, EE. UU.: Westview Press.
- Martínez, J. (2016). *Metodologías para el aprovechamiento energético de los residuos sólidos orgánicos en la plaza central de mercado de la ciudad de Palmira* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira. Inédito.
- Mejía, J. (2016). *Determinación de sostenibilidad técnico-ambiental para la producción de biodiésel en la Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira usando biomasa residual alimentaria como fuente no convencional de energía* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira. Inédito.
- Ministerio de Minas y Energía (MinMinas). (2014, 13 de mayo). *Ley 1715 de 2014. Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional*. Recuperado de <https://bit.ly/3fXUGf6>
- Monroy-Peña, C. A. (2013). *Modelación cinética de pirólisis de biomasa* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá. Recuperado de <https://bit.ly/39Wbq2y>
- Muñoz, S. (2016). *Metodologías para el aprovechamiento de la biomasa residual avícola y porcícola por digestión anaerobia en la Granja Mario González Aranda de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira. Inédita.
- Naik, S. N., Goud, V. V., Rout, P. K. y Dalai, A. K. (2010). Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 578-597. doi: 10.1016/j.rser.2009.10.003



- Nakada, S., Saygin, D. y Gielen, D. (2014). *Global bioenergy: supply and demand projections. A working paper for REMAP 2030*. Recuperado de <https://bit.ly/3zBaTP0>
- Naranjo, L. M. P. y Jiménez, C. A. S. (2016). Aprovechamiento de las vísceras de pescado como fuente de energía para minimizar el problema de contaminación ambiental del sector piscícola. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 7(2). Recuperado de <https://bit.ly/3mxlBjj>
- Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) y Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2016). OECD-FAO Agricultural Outlook 2016-2025 [Data set]. *OECD-FAO Agricultural Outlook 2016-2025*. doi: 10.1787/19991142
- Organización Internacional de Normalización (OIM). (2014). *Solid biofuels. Fuel specifications and classes - Part 1: General requirements (iso 17225-1)*. doi: 10.3403/30259559
- Ortega, N. M. (2006). *Phosphorus precipitation in anaerobic digestion process*. Boca Raton, FL: Dissertation.com.
- Pérez, J., Borge, D. y Agudelo, J. (2010). Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teórico-experimentales. *Revista Facultad de Ingeniería-Universidad de Antioquia*, (52), 95-107.
- Perkins, G., Batalha, N., Kumar, A., Bhaskar, T. y Konarova, M. (2019, noviembre). Recent advances in liquefaction technologies for production of liquid hydrocarbon fuels from biomass and carbonaceous wastes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109400. doi: 10.1016/j.rser.2019.109400
- Presidencia de la República de Colombia. (2008, 22 de julio). Decreto 2688 de 2008. Por el cual se modifica el decreto Reglamentario 3683 del 19 de diciembre de 2003. *Diario Oficial* n.º 47 058. Recuperado de <https://bit.ly/3atOY1w>
- Qin, Z., Zhuang, Q. y Chen, M. (2012). Impacts of land use change due to biofuel crops on carbon balance, bioenergy production, and agricultural yield, in the conterminous United States. *GCB Bioenergy*, 4(3), 277-288. doi: 10.1111/j.1757-1707.2011.01129.x
- Red Colombiana de Conocimiento en eficiencia Energética (RECIEE). (2018). *Programa de consolidación de la Red Colombiana de Conocimiento en Eficiencia Energética, RECIEE. 2014-2018 Memorias y resultados*. Recuperado de <https://bit.ly/3uD-NoRT>
- Red Colombiana de Conocimiento en Eficiencia Energética (RECIEE). (2019). *Boletín RECIEE n.º 14. Trabajo en red para fomentar la eficiencia, gestión energética y las FNCE en Colombia en el ámbito I+D+i*. Recuperado de <https://bit.ly/3mwg9NE>
- Red Mexicana de Bioenergía (Rembio). (2011). *La bioenergía en México: situación actual y perspectivas*. Recuperado de <https://bit.ly/31YrEDR>

- REN21. (2019). *Renewables 2019 Global Status Report*. París: REN21 Secretariat.
- Rodríguez, M. (2015). *Determinación de una metodología para la obtención de biodiésel a partir de borra de café* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira, Instituto Federal de Investigación de Rondonia (IFRO), Brasil. Inédito.
- Rodríguez, J. (2010). *Etanolisis de aceite de fritura usado proveniente de restaurantes utilizando lipasas pancreáticas de pollo (biocatalizadores de origen animal) inmovilizadas en quitosano* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira. Inédita.
- Rodríguez, J., González, L., Rojas, A. y Palacios, J. (2013). *Energía y ambiente*. Palmira: Universidad Nacional de Colombia.
- Rodríguez, J., Hleap, I., Estrada, F., Clavijo, J. y Perea, N. (2011). *Agroindustria pesquera en el Pacífico colombiano: gestión de residuos pecuarios en sistema de producción más limpia* (vol. 1). Palmira: Litotámara S. A.
- Rodríguez, J., Rojas, A., Romero, J., Luna, J., Rodríguez, J. y Latorre, D. (2010). *Fuentes alternas de energía No. 4: Agroindustria de los biocombustibles*. Palmira: Compucopiamos.
- Romero, J. (2010). *Etanolisis de aceites usados de restaurantes utilizando biocatalizadores nativos de origen vegetal inmovilizados en colágeno* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira. Inédita.
- Rulli, M. C., Bellomi, D., Cazzoli, A., De Carolis, G. y D'Odorico, P. (2016). The water-land-food nexus of first-generation biofuels. *Scientific Reports*, 6, 22521. doi: 10.1038/srep22521
- Sacramento-Rivero, J. C., Romero, G., Cortés-Rodríguez, E., Pech, E. y Blanco-Rosete, S. (2010). Diagnóstico del desarrollo de biorrefinerías en México. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 9(3), 261-283.
- Santana, V. S. y Fernandes, N. R. (2008, abril-junio). Photocatalytic degradation of the vinasse under solar radiation. *Catalysis Today*, 133-135, 606-610. doi: 10.1016/j.cattod.2007.12.131
- Saxena, S. C. y Dewan, S. S. (1996). Co-combustion and fluidized-bed incineration of cellulose pellets. *Energy*, 21(10), 889-897. doi: 10.1016/0360-5442(96)00039-4
- Siles, J. A., García-García, I., Martín, A. y Martín, M. A. (2011). Integrated ozonation and biomethanization treatments of vinasse derived from ethanol manufacturing. *Journal of Hazardous Materials*, 188(1-3), 247-253. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.01.096
- Slade, R., Bauen, A. y Gross, R. (2014). The global bioenergy resource. *Nature Climate Change*, (2), 99-105. doi: 10.1038/nclimate2097



- Spliethoff, H. y Hein, K. R. G. (1998). Effect of co-combustion of biomass on emissions in pulverized fuel furnaces. *Fuel Processing Technology*, 54(1-3), 189-205. doi: 10.1016/s0378-3820(97)00069-6
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2016). *Calculadora de los Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC)*. Recuperado de <https://bit.ly/3g3Kulz>
- Valade, A., Luyssaert, S., Vallet, P., Djomo, S. N., Van Der Kellen, I. J. y Bellassen, V. (2018). Carbon costs and benefits of France's biomass energy production targets. *Carbon Balance and Management*, 13(1), 26. doi: 10.1186/s13021-018-0113-5
- Van Loo, S. y Hoppejan, J. (eds.). (2008). *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Londres: Earthscan.
- Vélez-Peña. (2009). Vélez-Peña, R. (2009). *Estudio de factibilidad técnico ambiental de la producción de biodiésel a partir de lípidos residuales de la industria pesquera en Buenaventura* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira. Inédito.
- World Bioenergy Association (WBA). (2019). *Global bioenergy statistics 2019*. Recuperado de <https://bit.ly/3gtJbfg>