

# Caracterización de biomasas lignocelulósicas y su procesamiento térmico: Estado y oportunidades en el Instituto Tecnológico de Costa Rica

Characterization of lignocellulosic biomasses and their thermal processing: Status and opportunities at the Instituto Tecnológico de Costa Rica

Allen Puente-Urbina<sup>1</sup>

---

Puente-Urbina, A. Caracterización de biomasas lignocelulósicas y su procesamiento térmico: estado y oportunidades en el Instituto Tecnológico de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35, especial Programa de Investigación en *Energías Limpias*. Julio, 2022. Pág. 119-128.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i7.6343>

<sup>1</sup> Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: [apuente@itcr.ac.cr](mailto:apuente@itcr.ac.cr)  
<https://orcid.org/0000-0001-5328-2142>

## Palabras clave

Biomásas lignocelulósicas; caracterización; conversión termoquímica; biorrefinería, bioenergía.

## Resumen

Las biomásas lignocelulósicas son materias primas con baja huella de carbono, útiles para la producción de energía, materiales y productos químicos, las cuales pueden provenir de diferentes fuentes, incluyendo actividades agroindustriales y plantaciones de rápido crecimiento. En Costa Rica, a pesar de que parte de las biomásas aprovechables se encuentran en uso, aún existe potencial. Algunas de las maneras en que pueden ser aprovechadas y proveer una amplia gama de productos es mediante procesamientos térmicos tales como combustión para obtener energía, torrefacción o carbonización para obtener combustibles sólidos, pirólisis para obtener (mayoritariamente) productos líquidos o gasificación para obtener gases que pueden ser usados como combustibles o procesados posteriormente para obtener productos químicos de alto valor. Para lograr una implementación práctica de dichos procesos, es necesario caracterizar adecuadamente los materiales de partida, así como conocer en detalle su comportamiento bajo condiciones específicas de procesamiento. Para ambos, el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) cuenta con capacidad instrumental y talento humano adecuados. Herramientas disponibles tales como métodos de caracterización fisicoquímicos mediante análisis químicos tradicionales, análisis instrumental (mediante técnicas de espectroscopia, microscopia, difracción y análisis térmicos, entre otras), así como capacidades en torrefacción, carbonización, pirólisis, gasificación y simulaciones computacionales, unidos con personal capacitado en diferentes campos, hacen de dicha institución un lugar adecuado para estudiar e impulsar tecnologías que pueden ser de interés general. En este trabajo, se analizan experiencias exitosas y oportunidades en el ITCR relacionadas con caracterización de biomásas lignocelulósicas y su procesamiento térmico.

## Keywords

Lignocellulosic biomasses; characterization; thermochemical conversion; biorefinery; bioenergy.

## Abstract

Lignocellulosic biomasses are feedstocks with low carbon footprints, useful for the production of energy, materials and chemicals, which can come from different sources, including agro-industrial activities and fast-growing plantations. In Costa Rica, despite the fact that part of the usable biomasses is already in use, there is still potential. Some of the ways in which they can be used and provide a wide range of products is through thermal processing via combustion to obtain energy, torrefaction or carbonization to obtain solid fuels, pyrolysis to obtain (predominantly) liquid products or gasification to obtain gases that can be used as fuels or further processed to obtain high-value chemicals. To achieve a practical implementation of these processes, it is necessary to adequately characterize the starting materials, as well as to know in detail their behavior under specific processing conditions. For both, the Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) has adequate instrumental capacity and expertise. Available tools such as physicochemical characterization methods using traditional chemical analyses, instrumental analyses (using spectroscopic, microscopic, diffractometric and thermal methods, among others) as well as capabilities in torrefaction, carbonization, pyrolysis, gasification and computational simulations, together with well-trained staff with different backgrounds, make this institution a suitable place to study and promote technologies that may be of general interest. In this work, successful experiences and opportunities at the ITCR related to the characterization of lignocellulosic biomasses and their thermal processing are analyzed.

## Introducción

Las sociedades actuales cuentan con demandas energéticas importantes, las cuales se satisfacen mayoritariamente con materias primas no renovables (petróleo, gas natural y carbón) [1]. Estas son responsables de la mayor parte de las emisiones generadas que causan un desbalance atmosférico y cuentan con implicaciones a nivel global, lo cual ha hecho que se busquen alternativas de menor impacto [2, 3].

Según reflejan datos de la Secretaría de Planificación del Subsector Energía para el periodo 2012-2019 para Costa Rica, en general se ha presentado un aumento sostenido en las demandas energéticas (únicamente disminuyendo ligeramente en el año 2019). Para el último año reportado (2019), el país tuvo un consumo final total de 175 621 TJ, siendo 12,1 % energía primaria (proveniente de fuentes naturales) y 87,9 % energía secundaria (producto de transformación de fuentes de energía primaria) [4]. Dentro de estas, los derivados de petróleo representan el 63,7 % [4]. Tal situación, unido a que dichos combustibles fósiles no son producidos localmente, trae implicaciones ambientales y económicas importantes para nuestro país.

La producción de energías renovables ha tomado fuerza en las últimas décadas [1]. Una materia prima atractiva para tal fin son las biomásas. Estas son materiales orgánicos no fosilizados y biodegradables provenientes de plantas, animales y microorganismos [5]. Pueden ser materiales vírgenes (incluyendo acuáticas y terrestres) o residuales (incluyendo residuos municipales, agrícolas, forestales e industriales) [6]. En regiones donde se producen (o pueden ser producidas) cantidades considerables de biomásas de procesos agrícolas o agroindustriales, estas representan importantes materias primas aprovechables [7, 8]. Dichas biomásas, así como ocurre para otras biomásas vegetales, se generan a partir de procesos de fotosíntesis, en los cuales, tomando dióxido de carbono atmosférico, agua y luz solar, se producen carbohidratos, los cuales constituyen bloques de construcción de la biomasa [6]. Un procesamiento posterior de dichos materiales permite obtener energía almacenada, liberando dióxido de carbono, el cual cíclicamente puede utilizarse para producir más biomasa [9].

En nuestro país, para el año de referencia 2015, se reportó que se tiene un potencial de oferta de biomasa de  $6 \times 10^6$  toneladas de biomasa seca equivalente por año [10]. Esto representa un potencial energético bruto sobre el poder calórico superior (base seca) de 98 013 TJ/año, donde el potencial energético bruto disponible es de 37 808 TJ/año [10].

Con tal de aprovechar el potencial de las biomásas que se tiene en Costa Rica, estas pueden ser procesadas de diferentes maneras, lo cual se encuentra alineado con estrategias nacionales [11, 12]. Dentro de dichas formas de procesamiento destacan los tratamientos térmicos tales como combustión, torrefacción, carbonización, pirólisis y gasificación, las cuales pueden aplicarse dependiendo las condiciones de operación y los productos deseados [6].

Para lograr una implementación adecuada de los diferentes procesamientos térmicos disponibles, es necesario caracterizar apropiadamente los materiales de partida, así como conocer su comportamiento bajo condiciones específicas de procesamiento. Para ambos, el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) cuenta con capacidad instrumental y talento humano que ha desarrollado con el paso del tiempo. En este trabajo, se analizan las capacidades y oportunidades del ITCR relacionadas con caracterización de biomásas lignocelulósicas y su procesamiento térmico.

## Biomásas lignocelulósicas

Para aprovechar biomásas lignocelulósicas por medio de conversión termoquímica, es importante considerar características fisicoquímicas. A continuación, se presentan generalidades de dichos materiales, métodos de caracterización relevantes, así como diferentes formas de procesamiento térmico.

### Generalidades sobre biomásas lignocelulósicas

Las biomásas lignocelulósicas cuentan con tres componentes principales, los cuales forman parte de las paredes celulares de células vegetales. Estos son la celulosa, la hemicelulosa y la lignina [13]. La celulosa es un polisacárido que consiste en cadenas largas de azúcares de seis carbonos de tipo D-glucosa unidas mediante enlaces glicosídicos  $\beta$ -1,4' [14, 15]. Cuenta con enlaces de hidrógeno intermoleculares e intramoleculares, los cuales hacen que las cadenas se organicen de forma paralela, formando una estructura supramolecular altamente ordenada que le provee estabilidad térmica y bioquímica [14]. La hemicelulosa es un polímero compuesto de azúcares de cinco y seis carbonos tales como D-xilosa, L-arabinosa, D-glucosa, D-manosa y D-galactosa, las cuales se unen mediante enlaces glicosídicos formando polímeros más ramificados que en la celulosa [14]. La lignina es un polímero compuesto principalmente por tres unidades fenilpropanoides, a saber, *p*-hidroxifenil (H), guaiacil (G) y siringil (S), derivadas del acoplamiento combinatorio oxidativo de los monolignoles alcohol *p*-cumarílico, alcohol coniferílico y alcohol sinapílico [16]. Las biomásas lignocelulósicas también tienen otros componentes minoritarios no ligados celularmente llamados extractivos (moléculas relativamente pequeñas que pueden ser extraídas con diferentes disolventes), los cuales son metabolitos [17]. Otra pequeña parte está compuesta de minerales inorgánicos, comúnmente cuantificados como cenizas tras la descomposición del resto del material [13]. Finalmente, las biomásas lignocelulósicas cuentan con humedad. Esta es particularmente importante ya que puede afectar de gran manera su eficiencia de aprovechamiento, al influir desde su transporte y almacenamiento, hasta el balance energético de todo el procesamiento térmico y los productos resultantes [6, 18, 19].

### Caracterización de biomásas lignocelulósicas

Diferentes métodos de procesamiento térmico requieren conocer características específicas de las biomásas lignocelulósicas usadas como materiales de partida. Sin embargo, es común llevar a cabo ciertos métodos que permiten conocer características básicas de las mismas. Dentro de estos destacan los análisis proximal y elemental [9]. El análisis proximal permite obtener composición general, incluyendo determinaciones de humedad, cenizas, materia volátil (porción de material que puede liberarse por calentamiento a alta temperatura) y carbono fijo remanente luego de calentamiento [9]. Por su parte, el análisis elemental incluye la composición elemental en términos de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno, misma que se reporta junto con el contenido de cenizas, las cuales pueden analizarse posteriormente para tener información detallada sobre otros como composición mineral y química [13, 20]. Adicionalmente, el análisis del contenido energético también puede resultar de interés. Este puede ser indicado mediante el poder calorífico, el cual representa calor desprendido durante una combustión completa de la biomasa de interés. Tal poder calorífico puede ser determinado incluyendo el calor liberado de la condensación del vapor de agua generado (siendo este el poder calorífico superior o poder calorífico bruto), o bien, considerando que el vapor de agua generado no condensa (por lo que no hay un aporte adicional de calor por condensación del vapor de agua y se le llama poder calorífico inferior o poder calorífico neto) [6]. Características adicionales que pueden resultar valiosas son los contenidos de celulosa, hemicelulosa, lignina, extraíbles en diferentes disolventes, entre otras [21].

Otras características fisicoquímicas de las biomásas lignocelulósicas pueden obtenerse mediante técnicas de microscopía, difracción, espectroscopia y análisis térmicos [22]. Diferentes tipos de microscopía (incluyendo microscopías óptica, de barrido electrónico y de transmisión electrónica) permiten obtener información morfológica y de las microestructuras de los materiales, las cuales pueden estar acopladas a otros métodos de análisis, por ejemplo, como el caso de microscopios electrónicos que poseen implementos de espectroscopia de rayos X de energía dispersiva que proveen información elemental [23]. Análisis difractométricos, como en el caso de difracción de rayos X de polvos, permiten obtener información sobre la cristalinidad relativa (a la cual contribuye el ordenamiento de las cadenas de celulosa) y posibles componentes minerales [20, 24]. Análisis espectroscópicos usando espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier permiten obtener información cualitativa y cuantitativa sobre la estructura y composición [25]. Análisis térmicos incluyen técnicas termogravimétricas y calorimétricas. Las técnicas termogravimétricas permiten obtener información sobre la composición de las biomásas analizadas, características físicas tal como la facilidad con la que fluidos difunden en el seno del material analizado y las cinéticas de los eventos que se desarrollan en el transcurso del análisis, todo bajo estricto control de las condiciones (incluyendo el tipo de atmósfera y el perfil térmico empleados) [26-30]. Adicionalmente, pueden acoplarse a otros sistemas de análisis para analizar los gases desprendidos (por ejemplo, espectrómetros infrarrojos o de masas), o bien, realizarse de manera simultánea con métodos calorimétricos que proveen información flujos de calor en los procesos, y con eso, tener información tal como cambios de fase [30-32].

### Procesamientos térmicos de biomásas lignocelulósicas

Distintas maneras pueden ser empleadas para aprovechar biomásas lignocelulósicas para fines energéticos. Estas se llevan a cabo en condiciones diferentes, generando diversos tipos de productos. Mediante combustión, se llevan a cabo procesos de oxidación (en aire), los cuales permiten obtener energía térmica [33]. En la gasificación, los materiales de partida se calientan a temperaturas típicamente mayores a 800 °C en presencia de un agente gasificante como aire, oxígeno, dióxido de carbono, entre otros, para obtener gases ricos en monóxido de carbono e hidrógeno (conocido como gas de síntesis o *syngas*), los cuales pueden ser transformados para generar electricidad o productos químicos como combustibles [34]. Otras formas de procesamiento como la torrefacción, carbonización o pirólisis se llevan a cabo en atmósferas no oxidantes y parámetros de proceso como rapidez de calentamiento, tiempo y temperaturas finales definen los productos. La torrefacción y la carbonización están estrechamente relacionadas, siendo la primera una forma de procesamiento que se lleva a cabo a temperaturas relativamente más bajas y que busca convertir la biomasa lignocelulósica en un combustible sólido de mejor calidad, con menor humedad y mayor contenido de carbono, mientras que la segunda se lleva a temperaturas más altas y busca producir carbón [35]. Por su lado, la pirólisis se lleva a cabo a temperaturas más altas, con rapidez de calentamiento mayores y busca preferentemente la generación de productos líquidos [36].

### Caracterización de biomásas lignocelulósicas y su procesamiento térmico: Experiencias y oportunidades en el Instituto Tecnológico de Costa Rica

Para lograr una implementación práctica de procesos que permitan el aprovechamiento biomásas lignocelulósicas para fines energéticos, es necesario caracterizar adecuadamente las materias primas y su comportamiento bajo condiciones específicas de procesamiento. A continuación, se presentan algunos ejemplos de experiencias y oportunidades en el ITCR.

## Experiencias en el Instituto Tecnológico de Costa Rica

Una caracterización exhaustiva y el estudio de biomásas lignocelulósicas en condiciones de pirólisis mediante termogravimetría, ha sido uno de los ejes fundamentales que han permitido analizar diferentes tipos de materiales con potencial para ser aprovechados por medio de tratamientos térmicos para fines energéticos. Principalmente para biomásas forestales, se han desarrollado caracterizaciones fisicoquímicas detalladas, así como también se han determinado aspectos como la influencia de la composición química en el comportamiento bajo condiciones de pirólisis, su estabilidad térmica y características de procesos de descomposición que ocurren, lo cual permite conocer sobre la idoneidad de materias primas específicas así como sobre condiciones de procesamiento adecuadas [37-40]. De manera semejante se ha abordado el estudio de procesos de torrefacción [41-43]. Sin embargo, para este caso los estudios se encuentran ampliados al incluir calorimetría de barrido diferencial para estudiar los flujos de calor en los procesos, así como características fisicoquímicas y mecánicas de productos obtenidos a mayor escala y también peletizados [43-45]. Por su parte, estudios de carbonización de biomásas lignocelulósicas han sido llevados a cabo mediante desarrollos metodológicos guiados principalmente por las propiedades de los productos [46-48], pero otros también se han apoyado de ensayos termogravimétricos [48]. Finalmente, otra forma de procesamiento térmico como lo es gasificación ha sido abordada tanto de manera experimental, teórica y usando simulaciones de proceso [49-51].

Tal como se menciona anteriormente, el aprovechamiento de diferentes biomásas forestales ha sido ampliamente estudiado en el Instituto Tecnológico de Costa Rica. Moya y Tenorio (2013) analizaron las especies de maderas de rápido crecimiento de plantaciones de Costa Rica *Alnus acuminata*, *Acacia mangium*, *Bombacopsis quinata*, *Cupressus lusitanica*, *Gmelina arborea*, *Swietenia macrophylla*, *Tectona grandis*, *Terminalia Amazonia*, *Terminalia oblonga* y *Vochysia guatemalensis* mediante determinaciones relevantes para conocer sus potenciales energéticos [37]. Estas incluyeron análisis de humedad, gravedad específica, densidad en estado verde, composición (análisis de carbono, nitrógeno, cenizas, lignina, celulosa y extractivos en diferentes disolventes), poder calorífico superior e inferior e índice de valor de combustible [37]. Los autores determinaron que *Cupressus lusitánica* es la especie que presenta mayor potencial energético [37]. Las mismas especies fueron estudiadas por Tenorio y Moya (2013) mediante análisis termogravimétricos, logrando determinar la estabilidad térmica de tales maderas y la relación de los diferentes parámetros obtenidos con la composición química [38]. Las muestras de *Tectona grandis*, *Swietenia macrophylla* y *Cupressus lusitánica* presentaron las menores estabilidades térmicas con etapas de descomposición bien establecidas, lo cual sugiere que tales especies son las más adecuadas para procesos de combustión [38]. En un reporte posterior de Moya y colaboradores (2017), se amplió la información de especies de madera de rápido crecimiento de Costa Rica usando análisis termogravimétricos, mediante el estudio de las especies *Cupressus lusitánica*, *Dipterix panamensis*, *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Vochysia ferruginea* [40]. Dicho reporte contiene información valiosa sobre los procesos de descomposición que ocurren al tratar tales maderas en condiciones de pirólisis lenta en términos de temperaturas, rapidez y masas residuales, así como la relación de estas con características químicas de los materiales estudiados [40]. Por otro lado, utilizando análisis termogravimétricos junto con análisis de calorimetría de barrido diferencial, se han estudiado en detalle procesos de torrefacción de maderas de rápido crecimiento [41-43]. Con estos, Moya y colaboradores (2018) determinaron que *Vochysia ferruginea* y *Gmelina arborea* presentan comportamientos similares, mientras que *Cupressus lusitánica*, *Dipterix panamensis*, y *Tectona grandis* muestran comportamientos similares [42]. Además, los autores describen en detalle los procesos ensayados, lo cual es de ayuda para establecer y controlar procesos de torrefacción a mayor escala [42]. Más aún, para esas cinco especies de madera (*Vochysia*



*ferruginea*, *Gmelina arborea*, *Cupressus lusitánica*, *Dipterix panamensis*, y *Tectona grandis*) y también haciendo uso de análisis térmicos, Gaitán-Álvarez y colaboradores (2018) obtuvieron que las condiciones óptimas de torrefacción se encuentran en temperaturas de 200 °C y 225 °C usando 8, 10 y 12 minutos, para torrefacción leve y media [43]. Tales resultados son importantes para describir características de materiales obtenidos a mayores escalas usando métodos de torrefacción semejantes [44].

## Oportunidades en el Instituto Tecnológico de Costa Rica

Haciendo uso de métodos instrumentales no explotados, podría profundizarse en la composición química de las biomásas lignocelulósicas (por ejemplo, utilizando métodos espectroscópicos y cromatográficos, podría mejorarse la caracterización de carbohidratos, ligninas y extractivos). Estas resultarían valiosas no sólo para relacionarlas con formas de procesamientos térmicos, sino que también amplía el entendimiento en busca de un aprovechamiento de este tipo de materiales mediante otras rutas, como lo pueden ser rutas químicas o biológicas. Además, mediante análisis en línea de los productos gaseosos obtenidos durante análisis termogravimétricos, podría fortalecerse aún más esta valiosa herramienta. Por otro lado, en miras a implementaciones prácticas, resulta importante ampliar las capacidades en cuanto a simulación, para así optimizar los procesos de una manera más eficiente. Dichas simulaciones deben ser validadas mediante ensayos experimentales a escalas adecuadas, los cuales además deben complementarse con análisis para juzgar la calidad de los productos obtenidos.

## Conclusiones

El Instituto Tecnológico de Costa Rica cuenta con capacidades que le han permitido desarrollar experiencias importantes relacionadas con caracterización de biomásas lignocelulósicas y su procesamiento térmico. Ejemplo de esto es el amplio estudio que se ha dado a biomásas forestales de rápido crecimiento para determinar características importantes para su aprovechamiento con fines energéticos como lo son la determinación de potenciales energéticos, perfiles de descomposición térmica, optimización de procesos térmicos, entre otros. Dichas las experiencias generadas hasta este momento resultan vitales para impulsar tecnologías que permitan aprovechar biomásas lignocelulósicas para fines energéticos y sirven de base para seguir desarrollándose.

## Agradecimientos

El autor agradece el apoyo del Instituto Tecnológico de Costa Rica, en particular de la Escuela de Química, la Escuela de Ingeniería Forestal, la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, el Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC), el Laboratorio Institucional de Microscopía y la Vicerrectoría de Investigación y Extensión.

## Referencias

- [1] BP, "Statistical Review of World Energy 2020," BP, 2020.
- [2] IPCC, "Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," IPCC, 2014.
- [3] IEA, "World Energy Outlook 2020," IEA, 2020.
- [4] SEPSE, "Balance Energético Nacional," Secretaría de Planificación del Subsector Energía (SEPSE), 2012-2019.
- [5] UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change, 2005.
- [6] P. Basu, *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. Academic Press, 2010.

- [7] D. Arias-Aguilar, "Dendroenergía como un nuevo vector energético: hacia una economía baja en carbono," *Revista Energía*, vol. 68-2018, pp. 18-31, 2018.
- [8] R. D. Silva-Martínez, A. Sanches-Pereira, W. Ortiz, M. F. Gómez Galindo, and S. T. Coelho, "The state-of-the-art of organic waste to energy in Latin America and the Caribbean: Challenges and opportunities," *Renewable Energy*, vol. 156, pp. 509-525, 2020.
- [9] P. McKendry, "Energy production from biomass (part 1): overview of biomass," *Bioresource Technology*, vol. 83, no. 1, pp. 37-46, 2002.
- [10] L. R. Chacón, O. Coto, and O. M. Flores, "Actualización de la encuesta de biomasa como insumo para su incorporación en la matriz energética de Costa Rica," EMA Energía Medio Ambiente y Desarrollo S.A., 2018.
- [11] MICITT, "Estrategia Nacional de Bioeconomía Costa Rica 2020-2030," Ministerio de Ciencia, Tecnología y Telecomunicaciones (MICITT), 2020.
- [12] SEPSE, "VII Plan Nacional de Energía 2015-2030," Secretaría de Planificación del Subsector Energía (SEPSE), 2020.
- [13] S. V. Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen, and C. G. Vassileva, "An overview of the chemical composition of biomass," *Fuel*, vol. 89, no. 5, pp. 913-933, 2010.
- [14] W. De Jong and J. R. Van Ommen, Eds. *Biomass as a Sustainable Energy Source for the Future: Fundamentals of Conversion Processes*. John Wiley & Sons, 2014.
- [15] R. Brown, Ed. *Thermochemical Processing of Biomass: Conversion into Fuels, Chemicals and Power*. John Wiley & Sons, 2019.
- [16] J. Ralph, C. Lapierre, and W. Boerjan, "Lignin structure and its engineering," *Current Opinion in Biotechnology*, vol. 56, pp. 240-249, 2019.
- [17] R. P. Overend, T. A. Milne, and L. K. Mudge, Eds. *Fundamentals of Thermochemical Biomass Conversion*. Elsevier Applied Science Publishers, 1985.
- [18] D. L. Karlen, Ed. *Cellulosic Energy Cropping Systems*. John Wiley & Sons, 2014.
- [19] J. B. Holm-Nielsen and E. A. Ehimen, Eds. *Biomass Supply Chains for Bioenergy and Biorefining*. Elsevier and Woodhead Publishing, 2016.
- [20] S. V. Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen, and C. G. Vassileva, "An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification," *Fuel*, vol. 105, pp. 40-76, 2013.
- [21] J. Cai *et al.*, "Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 309-322, 2017.
- [22] J. Yan *et al.*, "Characterizing Variability in Lignocellulosic Biomass: A Review," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 8, no. 22, pp. 8059-8085, 2020.
- [23] S. Vaz Jr, Ed. *Analytical Techniques and Methods for Biomass*. Springer, 2016.
- [24] D. Harris and S. DeBolt, "Relative Crystallinity of Plant Biomass: Studies on Assembly, Adaptation and Acclimation," *PLOS ONE*, vol. 3, no. 8, p. e2897, 2008.
- [25] F. Xu, J. Yu, T. Tesso, F. Dowell, and D. Wang, "Qualitative and quantitative analysis of lignocellulosic biomass using infrared techniques: A mini-review," *Applied Energy*, vol. 104, pp. 801-809, 2013.
- [26] R. García, C. Pizarro, A. G. Lavín, and J. L. Bueno, "Biomass proximate analysis using thermogravimetry," *Bioresource Technology*, vol. 139, pp. 1-4, 2013.
- [27] J. F. Saldarriaga, R. Aguado, A. Pablos, M. Amutio, M. Olazar, and J. Bilbao, "Fast characterization of biomass fuels by thermogravimetric analysis (TGA)," *Fuel*, vol. 140, pp. 744-751, 2015.
- [28] A. Anca-Couce *et al.*, "Biomass pyrolysis TGA assessment with an international round robin," *Fuel*, vol. 276, p. 118002, 2020.
- [29] A. Puente-Urbina, J. P. Morales-Aymerich, Y. S. Kim, and J. F. Mata-Segreda, "Drying kinetics and assessment of relative energy cost for drying of woody biomasses," *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*, vol. 2016, p. 701233, 2016.
- [30] O. O. Olatunji, S. A. Akinlabi, M. P. Mashinini, S. O. Fatoba, and O. O. Ajayi, "Thermo-gravimetric characterization of biomass properties: A review," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 433, p. 012175, 2018.



- [31] H. C. Ong, W.-H. Chen, Y. Singh, Y. Y. Gan, C.-Y. Chen, and P. L. Show, "A state-of-the-art review on thermochemical conversion of biomass for biofuel production: A TG-FTIR approach," *Energy Conversion and Management*, vol. 209, p. 112634, 2020.
- [32] M. Radojević, B. Janković, D. Stojiljković, V. Jovanović, I. Čeković, and N. Manić, "Improved TGA-MS measurements for evolved gas analysis (EGA) during pyrolysis process of various biomass feedstocks. Syngas energy balance determination," *Thermochimica Acta*, vol. 699, p. 178912, 2021.
- [33] A. Demirbas, "Combustion of Biomass," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 29, no. 6, pp. 549-561, 2007.
- [34] P. McKendry, "Energy production from biomass (part 3): gasification technologies," *Bioresource Technology*, vol. 83, no. 1, pp. 55-63, 2002.
- [35] M. Verma, S. Godbout, S. K. Brar, O. Solomatnikova, S. P. Lemay, and J. P. Larouche, "Biofuels Production from Biomass by Thermochemical Conversion Technologies," *International Journal of Chemical Engineering*, vol. 2012, p. 542426, 2012.
- [36] A. Demirbas and G. Arin, "An Overview of Biomass Pyrolysis," *Energy Sources*, vol. 24, no. 5, pp. 471-482, 2002.
- [37] R. Moya and C. Tenorio, "Fuelwood characteristics and its relation with extractives and chemical properties of ten fast-growth species in Costa Rica," *Biomass and Bioenergy*, vol. 56, pp. 14-21, 2013.
- [38] C. Tenorio and R. Moya, "Thermogravimetric characteristics, its relation with extractives and chemical properties and combustion characteristics of ten fast-growth species in Costa Rica," *Thermochimica Acta*, vol. 563, pp. 12-21, 2013.
- [39] A. Puente-Urbina, "Determination of useful parameters to decide the suitability of a biomass to be used as raw material for thermochemical processes," presented at the American Chemical Society National Meeting & Exposition, Denver, 2015.
- [40] R. Moya, A. Rodriguez-Zuniga, and A. Puente-Urbina, "Thermogravimetric and devolatilisation analysis for five plantation species: Effect of extractives, ash compositions, chemical compositions and energy parameters," *Thermochimica Acta*, vol. 647, pp. 36-46, 2017.
- [41] A. Puente-Urbina, R. Moya, J. Gaitan-Alvarez, and A. Rodriguez-Zuniga, "Torrefaction analysis of woody biomasses from fast-growing plantations of Costa Rica," presented at the European Biomass Conference & Exhibition, Stockholm, 2017.
- [42] R. Moya, A. Rodriguez-Zuniga, A. Puente-Urbina, and J. Gaitan-Alvarez, "Study of light, middle and severe torrefaction and effects of extractives and chemical compositions on torrefaction process by thermogravimetric analysis in five fast-growing plantations of Costa Rica," *Energy*, vol. 149, pp. 1-10, 2018.
- [43] J. Gaitan-Alvarez, R. Moya, A. Puente-Urbina, and A. Rodriguez-Zuniga, "Thermogravimetric, devolatilization rate, and differential scanning calorimetry analyses of biomass of tropical plantation species of Costa Rica torrefied at different temperatures and times," *Energies*, vol. 11, no. 4, p. 26, 2018, Art. no. 696.
- [44] J. Gaitan-Alvarez, R. Moya, A. Rodriguez-Zuniga, and A. Puente-Urbina, "Characterization of torrefied biomass of five reforestation species (*Cupressus lusitanica*, *Dipteryx panamensis*, *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, and *Vochysia ferruginea*) in Costa Rica," *Bioresources*, vol. 12, no. 4, pp. 7566-7589, 2017.
- [45] J. Gaitan-Alvarez, R. Moya, A. Puente-Urbina, and A. Rodriguez-Zuniga, "Physical and compression properties of pellets manufactured with the biomass of five woody tropical species of Costa Rica torrefied at different temperatures and times," *Energies*, vol. 10, no. 8, p. 17, 2017, Art. no. 1205.
- [46] J. Quesada-Kimzey, "Carbonize it? Simple test method to see whether carbonization is a good valorization choice for a material," presented at the American Chemical Society National Meeting & Exposition, San Diego, 2016.
- [47] J. F. Quesada-Kimzey, P. Zuniga, and T. Gmelch, "Continuous laboratory scale hydrothermal reactor for biomassic materials with high water contents," presented at the American Chemical Society National Meeting & Exposition, San Diego, 2016.
- [48] A. M. Brenes, M. Gudino, J. Castro, J. Rodriguez, and A. Puente-Urbina, "Determination of suitable parameters to produce activated carbons from Costa Rican residual woody biomasses," presented at the American Chemical Society National Meeting & Exposition, San Diego, 2016.
- [49] C. Torres, M. Chaves, L. Urbina, and R. Moya, "Evaluación de la incidencia de pellets y astillas de madera en el desempeño de un gasificador tipo "downdraft"," *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 15, pp. 25-36, 2018.

- [50] J. A. Castillo-Benavides, G. Richmond-Navarro, F. Rojas-Pérez, and E. Zamora-Picado, "Revisión de los sistemas de gasificación de biomasa para la generación de energía en Costa Rica de 1982 a 2014," *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 31, no. 4, pp. 3-14, 2018.
- [51] A. Caballero-Chavarria *et al.*, "Simulación de gasificación de biomasa enriquecida con hidrocarburos," *Tecnología En Marcha*, vol. 32, no. 4, pp. 60-68, 2019.