

# Aprovechamiento de la biomasa residual como fuente de energía renovable en Colombia: escenario de gasificación potencial

Harnessing Residual Biomass as a Renewable Energy Source in Colombia: A Potential Gasification Scenario

**CITACIÓN:** Pérez-Rodríguez, C. P., Ríos, L. A., Duarte-González, C. S., Montaña, A. & Marcía-Marroquín, C. (2023). Aprovechamiento de la biomasa residual como fuente de energía renovable en Colombia: escenario de gasificación potencial. *Palmas*, 44(1), 65-82.

Editores Académicos: Erol Kurt y José Manuel López-Guede.

Nota del editor: MDPI se mantiene neutral con respecto a las reclamaciones jurisdiccionales en los mapas publicados y las afiliaciones institucionales.

**PALABRAS CLAVE:** Biomasa, Potencial, Energía renovable, Gasificación.

**KEYWORDS:** Biomass, Potential, Renewable energy, Gasification.

\* Traducido del original Harnessing Residual Biomass as a Renewable Energy Source in Colombia: A Potential Gasification Scenario. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/su141912537>

Derechos de autor: © 2022 de los autores. Licenciado MDPI, Basilea, Suiza. Este documento es un artículo de acceso abierto bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## **PÉREZ RODRÍGUEZ, CLAUDIA PATRICIA**

Grupo Poscosecha de Productos Agrícolas, departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia. Autor para correspondencia [cpperezr@unal.edu.co](mailto:cpperezr@unal.edu.co)

## **RÍOS, LUIS ALBERTO**

Grupo Procesos Químicos Industriales, departamento de Ingeniería Química, Universidad de Antioquia, Calle 70 No. 52-21, Medellín 050010, Colombia

## **DUARTE GONZÁLEZ, CARMEN SOFÍA**

Grupo Poscosecha de Productos Agrícolas, departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia

## **MONTAÑA, ANDRÉS**

Grupo Poscosecha de Productos Agrícolas, departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia

## **GARCÍA MARROQUÍN, CATALINA**

Grupo Poscosecha de Productos Agrícolas, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia

## Resumen

Actualmente, el desarrollo de formas nuevas o más eficientes de producir bioenergía ha hecho que los gobiernos de todo el mundo asuman compromisos. Estos compromisos se convierten, a escala nacional, en políticas y estrategias gubernamentales que pretenden descarbonizar la

matriz energética de cada país. El primer paso para un desarrollo eficiente es la cuantificación y la caracterización del potencial energético de la biomasa disponible. Bajo este marco, este estudio establece el potencial energético de la biomasa residual producida por los procesos agrícolas, agroindustriales y forestales en Colombia, siendo la gasificación la tecnología de transformación seleccionada. Para ello, se analizaron datos de fuentes primarias y secundarias. Posteriormente, se priorizaron algunas biomásas en función de su disponibilidad y propiedades fisicoquímicas. Luego, se estimó el potencial energético teórico de la biomasa total producida en estos sectores productivos, utilizando sus propiedades fisicoquímicas. Se estimó el potencial técnico de bioenergía del país (204,8-235,3 PJ), considerando el nivel actual de biomasa no utilizada y evaluando los requisitos logísticos y de acondicionamiento del proceso de gasificación, teniendo en cuenta los picos y valles de producción en el país. Por lo tanto, si toda la biomasa se procesara en una planta de gasificación (22,2-24,0 % de eficiencia), como se propone en este estudio, entonces la capacidad instalada (si el factor de uso de la planta fuera de 85 %) oscilaría entre 1.696,7-2.111,3 MW. Los resultados de la presente investigación fueron validados por representantes de gremios, empresas y entidades gubernamentales.

## Abstract

Currently, developing new or more efficient ways of producing bioenergy has caused governments from around the world to formulate compromises. These compromises translate, on a national scale, into government policies and strategies that aim to decarbonize the energy matrix of each country. The first step for efficient development is the quantification and energy-potential characterization of the available biomass. Using this framework, this study establishes the energy potential of the residual biomass produced by agricultural, agro-industrial, and forestry processes in Colombia, with gasification being the selected transformation technology. For this purpose, data from primary and secondary sources were analyzed. Next, some biomasses were prioritized according to their availability and physicochemical properties. Then, the theoretical energy potential of the total biomass produced in these productive sectors was estimated by using its physicochemical properties. The technical biomass-energy potential of the country (204.8–235.3 PJ) was estimated by considering the current level of unused biomass and evaluating the logistics and conditioning requirements of the gasification process, while accounting for the peaks and off-peaks of production in the country. Thus, if all the biomasses were processed in a gasification plant (22.2–24.0% efficiency), as proposed in this study, then the installed capacity—if the plant-use factor was 85%—would range between 1696.7–2111.3 MW. The results of the present research were validated by representatives of unions, companies, and government entities.

## Introducción

Debido a su naturaleza renovable y su potencial como sustituto de los combustibles fósiles, la biomasa ha atraído y sigue atrayendo la atención de investigadores y empresas que buscan fuentes valiosas de energía [1]. Además, estos esfuerzos están alineados con el séptimo Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) propuesto por la ONU: “Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna” [2]. En efecto, el uso de la biomasa como fuente de energía renovable ha reducido las emisiones de CO<sub>2</sub> en la mayoría de los países que la han adoptado [3]. Según los

informes de la Agencia Internacional de la Energía, para 2019, las energías renovables representaban el 23,2 % de la generación eléctrica mundial, mientras que, para la energía generada por carbono, este valor fue del 37,8 %. Por lo tanto, la bioenergía es la cuarta fuente de energía más importante en todo el mundo, después del petróleo, el carbón y el gas natural [4]. En el caso de América Latina, en 2020 se generaron 85.014 GWh de bioenergía, lo que la convierte en la segunda fuente de energía más importante del continente, después del petróleo. Cabe señalar que esta la están utilizando en mayor medida en los países en desarrollo, aunque en la actualidad la mayor parte proceda de países desarrollados [5].

Una de las barreras para adoptar la biomasa como fuente de energía renovable son los costos logísticos asociados con su recolección, almacenamiento y transporte; sin embargo, tecnologías de densificación han sido estudiadas como una solución viable para reducir estos costos [6]. De hecho, el desarrollo de estas tecnologías, junto con las estrategias que actualmente están implementado los gobiernos, como los impuestos y bonos de carbono, están fomentando el uso de la biomasa [7].

Hoy en día, contamos con mucha información sobre el potencial energético de diferentes regiones del mundo. Por ejemplo, un estudio sobre bioenergía en Turquía estima que hay 73 MW potencialmente disponibles de esta fuente en el país. Cabe mencionar que la mayor parte de la biomasa producida en Turquía proviene de residuos forestales y de poda de cultivos, lo que hace que la combustión y la cogeneración sean las tecnologías de transformación más relevantes en ese contexto [8]. Del mismo modo, el potencial energético de la biomasa sólida (residuos agroindustriales y del campo) en Croacia oscila entre 12,18 y 51,14 PJ [9]. Por otro lado, en la región de Sabah en Malasia, el potencial de bioenergía anual de la palma de aceite (y otras fuentes de biomasa menores) fue de 267,18 PJ. Según el autor del estudio, si este potencial energético se convirtiera realmente, con un 25 % de eficiencia sería suficiente para abastecer 3,8 veces las demandas de energía de la región [10]. Finalmente, un estudio realizado en Brasil encontró que podrían producirse 9.947,12 GWh/año a través del biogás en el área de Paraná, donde los subproductos de cultivos como la caña de azúcar, la soya, el maíz y la yuca representan el 79,7 % del potencial energético y la biomasa generada por el ganado representa el 14,8 % de este potencial [11].

En el caso de Colombia, que goza de una geografía y una ubicación privilegiadas, la producción de cultivos a gran escala como la caña de azúcar y la palma de aceite, así como las múltiples temporadas de cosecha de diferentes cultivos a lo largo del año, generan un flujo constante de biomasa que podría aprovecharse para la producción de energía. Por ejemplo, en 2019, la producción agrícola total del país fue de 63,2 millones de toneladas, que se dividió así: caña de azúcar, 23 millones de toneladas; caña de panela, 11 millones; racimos de fruta de palma de aceite, 6,6 millones; plátano, 4,1 millones; banano, 2,1 millones; arroz, 1,9 millones; entre otros cultivos que no estuvieron tan ampliamente representados [12]. Además,

cabe señalar que la agricultura a pequeña escala, de granjas de 5 hectáreas o menos, representa el 60 % de la producción total del país [12]. El potencial bioenergético de Colombia, 400-750 PJ por año, se ha calculado utilizando los cultivos más grandes, los desechos animales, los residuos forestales y los residuos urbanos como las principales fuentes de biomasa al considerar la cogeneración y la biodigestión como las tecnologías de transformación [13-16]. Más específicamente, un estudio sobre el potencial de biogás mostró un total de 150,8 PJ de energía disponible en Colombia [17]. El potencial energético de la biomasa agrícola en particular se ha estimado en 331,65 PJ/año [13]. Para poner estos datos en perspectiva, Colombia consume alrededor de 1.336 PJ/año, que se distribuye entre los sectores de transporte (41,2 %), industrial (22,5 %), residencial (19,3 %) y público (17 %) [18]. Su generación de electricidad, que equivale a 16.994 GWh (230,4 PJ), actualmente se suministra principalmente por generación hidráulica (71,9 %) y térmica (26,7 %) [19].

La gasificación, un proceso eficiente de conversión termoquímica utilizado para transformar diferentes materiales en un gas combustible (*syngas*), puede utilizarse para aprovechar el potencial bioenergético antes mencionado y para diversificar las fuentes de energía del país. De hecho, a través de una combinación de procesos superpuestos como la pirólisis, el secado y la oxidación parcial, la gasificación es mucho más eficiente que los procesos actuales de conversión de energía, como la combustión directa de desechos agrícolas, que el país utiliza a pequeña escala [20, 21]. El principal producto obtenido de la gasificación es el gas de síntesis que, a su vez, puede utilizarse como biocombustible para generar calor o electricidad [21]. Además, cuando el aire es el agente gasificante, el gas de síntesis tiene un poder calorífico inferior (PCI) promedio que es mucho menor que el del gas natural (aproximadamente una sexta parte de este) [22], pero todavía se puede utilizar en motores de combustión interna.

Hoy en día, la biomasa leñosa es uno de los materiales más estudiados para la conversión de bioenergía, dada su composición química y bajo contenido de humedad, lo que proporciona una buena eficiencia de gasificación [23-25]. Para Colombia esto no es diferente. De hecho, al estudiar el potencial bioenergético del país, se identifica un subtipo de biomasa leñosa que debería estudiarse más a fondo: el espinillo (*Ulex europeaus*). Esta es una especie de planta arbustiva introducida desde Europa que actualmente

se clasifica como invasora. Además de ser una amenaza para las especies endémicas, es altamente inflamable y se propaga muy fácilmente a sus alrededores [26, 27]. En 2019, un área de 386.931 ha se vio afectada por el espinillo, y un área de 1.717.815 ha en las regiones de Cundinamarca y Boyacá se encuentra en riesgo de ser afectada en el futuro [26, 28]. Por lo tanto, aprovechar esta planta como fuente de energía ayudaría simultáneamente a la disposición de estas biomásas mientras se genera bioenergía.

El estudio calcula el potencial energético de gasificación del espinillo y otras biomásas en Colombia. Este, enfoca la utilización de la biomasa generada en el campo y la industria como residuos, junto con un análisis de la producción de los principales productos agroindustriales y forestales del país; cabe destacar que las fluctuaciones en la cantidad de producto producido por año se explicaron al considerar los valores pico y valle durante un periodo de cinco años. Los materiales de biomasa seleccionados para este estudio se eligieron considerando su disponibilidad y si podían ser gasificados eficientemente. La gasificación fue elegida como una tecnología adecuada para convertir eficientemente la biomasa en un gas combustible porque es fácil de manejar y se puede utilizar para producir electricidad si un motor de combustión interna convencional es acoplado a un generador eléctrico. Los resultados de este estudio muestran que el potencial energético calculado para la biomasa de Colombia podría satisfacer una gran parte de la demanda eléctrica del país usando biomásas como estípites de palma de aceite, hojas de palma de aceite, madera de café y espinillo, que a menudo son recursos infravalorados.

## Materiales y métodos

El presente estudio tiene tres propósitos principales: (1) evaluar el potencial de las biomásas que no tiene un uso definido actual o cuyo valor para los procesos de producción de energía se ha pasado por alto; (2) ofrecer resultados confiables que puedan validarse mediante conversaciones con representantes de gremios, empresas y agencias gubernamentales relacionadas con los procesos de generación de biomasa; y (3) enmarcar las biomásas elegidas como fuentes de valor, específicamente cuando se transforman a través de la gasificación.

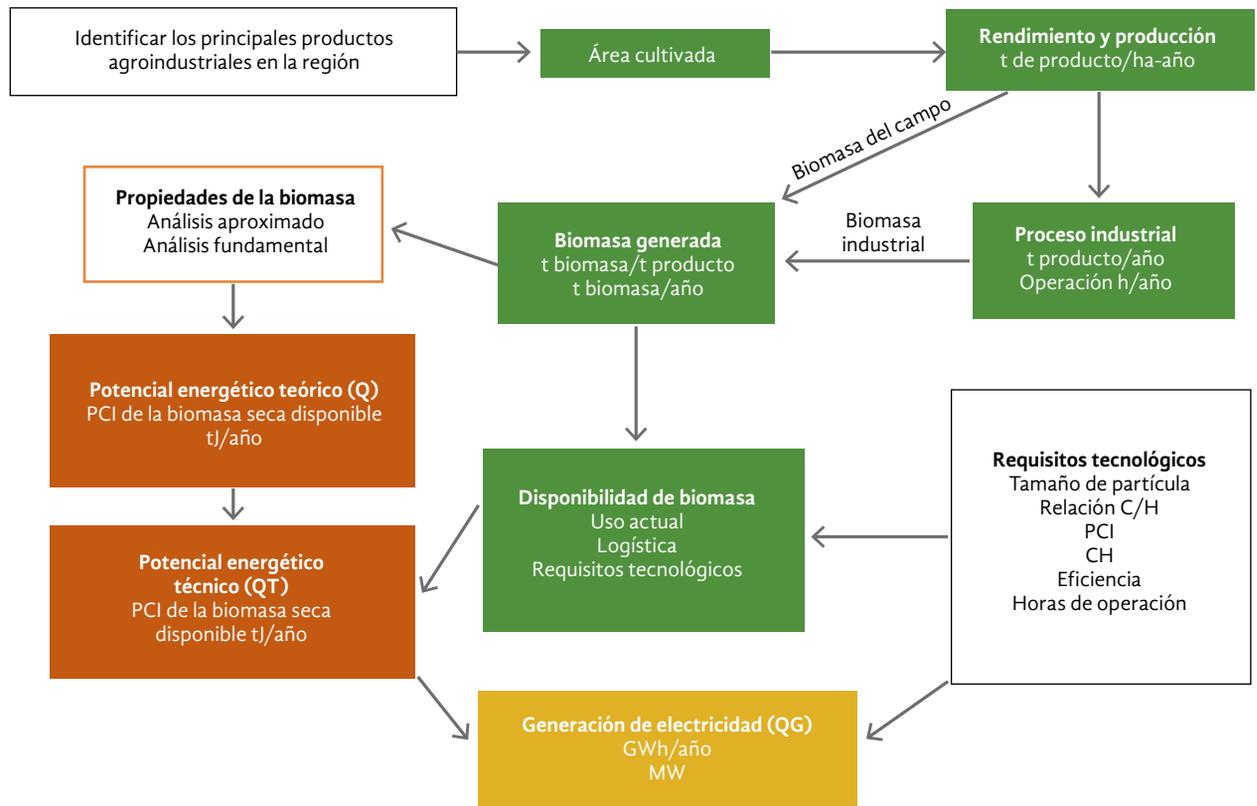
El primer paso para estimar el potencial energético en esta área requirió estudiar la biomasa más co-

mún generada en Colombia (es decir, enfocarse en los principales productos agrícolas del país (aceite de palma, caña de azúcar, plátano y banano)). Posteriormente, se midieron propiedades tales como el contenido de humedad (CH) y el poder calorífico inferior (PCI) de cada biomasa para excluir aquellas que estuvieran por fuera del intervalo utilizable recomendado para la gasificación [19]. También se estudiaron los cultivos que obtienen productos particularmente valiosos y generan una alta proporción de residuos con respecto al producto final, como el café y el cacao. Además, se consideraron los residuos forestales como una posible fuente de biomasa. Sin embargo, cabe señalar que el estudio se centró exclusivamente en la madera en bruto industrial procesada en aserraderos, que representa solo 27 % de la biomasa generada por el sector forestal [29]. La razón de esta elección fue que, además de ser mucho más difícil y costosa de recolectar, la biomasa forestal restante no se puede gasificar de forma tan eficiente como la de madera en bruto. Finalmente, se evaluó el potencial energético del espinillo, una especie invasora con una rápida tasa de expansión que actualmente amenaza la biodiversidad local [26].

Al identificar las biomásas relevantes para este estudio, se aplicó la metodología presentada en la Figura 1. En primer lugar, se tuvo que encontrar más información sobre las biomásas elegidas. Los datos de producción y rendimiento utilizados se tomaron de bases de datos nacionales [12]. Con el fin de tener en cuenta las posibles fluctuaciones de la producción a lo largo del tiempo, se analizaron los datos de producción durante cinco años (Apéndice A). Se eligió trabajar con los del periodo 2015-2019 porque, en Colombia, en 2014 se comenzó a recolectar una cantidad creciente de información precisa en esta área después de que se realizó el tercer Censo Nacional Agropecuario. Así, al analizar los datos en un periodo de tiempo significativo, se pudo estimar el potencial energético mínimo y máximo para cada biomasa, lo que, a su vez, permitió proponer diferentes escenarios posibles para implementar la gasificación.

La información sobre la relación residuo/producto final de cada biomasa provino de una revisión de las estadísticas gubernamentales y los informes oficiales de los gremios para cada producto. Los usos actuales, la logística y la dispersión espacial de cada biomasa vinieron de informes oficiales y trabajos de investigación nacionales e internacionales. Las pro-

**Figura 1.** Metodología del potencial energético de la biomasa



propiedades fisicoquímicas de cada biomasa se tomaron de fuentes locales cuando estaban disponibles y de la investigación internacional cuando era necesario. Finalmente, se midió el PCI y el CH de troncos y hojas de palma de aceite siguiendo las normas ASTM D3172 y ASTM D5142. Todos los datos recopilados se discutieron con representantes colombianos de las cadenas de producción generadoras de biomasa, quienes confirmaron su validez para cada una de ellas. Posteriormente, se estimó el potencial energético de cada una, lo que obligó a determinar sus usos actuales y las prácticas de eliminación. Esto se logró a través de revisiones adicionales de la literatura, entrevistas con líderes gremiales y expertos en productos, y trabajo de campo; así, se estimó la disponibilidad de cada biomasa, lo que permitió determinar el potencial energético tanto teórico como técnico.

Finalmente, para estimar la cantidad potencial de electricidad que se podría generar a través de la gasificación en Colombia, se propuso una hipotética planta de gasificación con un factor de uso de 85 %

(7.446 h por año). El factor de eficiencia de gasificación utilizado en este cálculo se basó en la cantidad de gas de síntesis generado por cada biomasa, así como su PCI, por lo tanto, la eficiencia promedio de conversión de biomasa en energía se estableció entre el 60-65 % [30], siguiendo estudios de gasificación previos. La eficiencia de convertir el gas de síntesis en electricidad se determinó, a su vez, en un 37 % (si se utiliza un motor de combustión interna en el proceso) [31].

### Cálculos matemáticos

En la siguiente sección se presentan las ecuaciones utilizadas para calcular el potencial energético teórico y técnico, así como el potencial energético de gasificación de cada biomasa.

Para calcular la cantidad de biomasa producida (B) de una región, debe tenerse en cuenta su producción principal anual de biomasa (P) y su relación residuo/

producto final (R) [Ecuación (1)]. El subíndice  $i$  representa el producto de referencia y  $j$  representa el tipo de biomasa generada en su producción.

Ecuación 1

$$B_{ij} = P_i \cdot R_j$$

Para el caso específico del espinillo, las áreas afectadas (a) reportadas por la CAR fueron el punto de partida. Luego, se estimó su factor de producción (F) (según lo recomendado por las entidades públicas encargadas de administrar los territorios afectados por esta especie) como la cantidad de biomasa sobre el suelo por unidad de área. Además, para la Ecuación 2 se contabilizó un periodo de renovación (PR) (es decir, el tiempo necesario para que las plantas alcancen una altura promedio de 1,5-2 m).

Ecuación 2

$$B_{\text{espinillo}} = \frac{a \cdot F}{RP}$$

Para calcular el potencial energético teórico (Q) de cada biomasa, se tuvieron en cuenta tanto B como sus propiedades fisicoquímicas particulares. Sin embargo, cabe señalar que solo la materia seca es relevante para los cálculos de potencial energético, por lo que fue necesario incluir el PCI y el CH en la Ecuación 3.

Ecuación 3

$$Q_{ij} = B_{ij} \cdot (1 - CH_j) \cdot PCI_j$$

El factor de disponibilidad (A) de una biomasa dada es crucial para estimar su potencial energético técnico (QT) (Ecuación 4). La mayoría de las biomásas generadas en el campo tienen un A de 0,5, ya que se recomienda que al menos la mitad del residuo de biomasa de un cultivo se deje en el campo para proteger la calidad del suelo y preservar sus niveles de humedad y materia orgánica.

Ecuación 4

$$QT_{ij} = Q_{ij} \cdot A$$

A continuación, se calculó su potencial de gasificación (QG) en función de las horas anuales de operación de la planta de generación (H), la eficiencia de gasificación (E) y la eficiencia del motor-generator (n) (Ecuación 5).

Ecuación 5

$$QG_{ij} = QT_{ij} \cdot H \cdot E \cdot n$$

Por último, para calcular el potencial energético total de una región concreta hay que sumar todos los potenciales energéticos mencionados (Ecuación 6).

Ecuación 6

$$\bar{Q} = \sum Q_{ij}; \bar{QT} = \sum QT_{ij}; \bar{QG} = \sum QG_{ij}$$

## Resultados

La Tabla 1 relaciona cada biomasa con la industria que la produce y/o el producto que la genera. Además, se muestra la relación de residuo a producto final y la producción máxima y mínima de cada producto de referencia.

Las propiedades fisicoquímicas de cada biomasa, que luego se utilizaron para calcular su potencial energético, se presentan en la Tabla 2.

El potencial teórico de cada biomasa se calculó usando las Ecuaciones 1-3. El potencial técnico de cada biomasa se calculó usando la Ecuación 4 (es decir, multiplicando el potencial teórico de cada biomasa por su factor de disponibilidad). El potencial de gasificación de cada biomasa se calculó con la Ecuación 5 (es decir, incluyendo las horas de operación de la planta de gasificación y la eficiencia del proceso de gasificación). El potencial energético total de Colombia se calculó utilizando la Ecuación 6. Los principales resultados se muestran en la Tabla 3. Además, la cantidad de biomasa disponible (AB), que se obtuvo multiplicando la Ecuación 1 por A, se presenta para relacionar los datos de potencial energético de cada biomasa con su producción y disponibilidad anuales. Cabe señalar que los datos se presentan como rangos, dado que se decidió tener en cuenta las fluctuaciones en la producción de biomasa al considerar las temporadas de producción pico y llano. Además, para tener en cuenta las posibles variaciones durante el proceso de gasificación, se calculó el potencial energético de gasificación de cada biomasa con un rango de eficiencia del 60-65 %. En la Tabla 3 QG presenta un intervalo de potencial de gasificación para cada biomasa. El extremo inferior del rango indica la energía potencial que podría producirse en una situación en la que la biomasa disponible y la eficiencia de gasificación

**Tabla 1.** Cantidades de producto de referencia y relaciones de residuo a producto final de cada biomasa generada.

Industria	Producto de referencia	P (kt/Año)	Biomasa	R (t br/t producto)
Palma de aceite <sup>a</sup>	Racimos de fruta fresca	5.612,3-7.172,8	Racimos de fruta vacíos	0,23
			Almendra de palma	0,06
			Fibra del mesocarpio	0,12
			Troncos de palma de aceite	0,51
			Hojas de palma de aceite	1,08
Caña de azúcar <sup>b</sup>	Azúcar en bruto	2.118,5-2.371,2	Puntas y hojas	2,4
			Bagazo de caña de azúcar	2,5
Caña de azúcar (p) <sup>c</sup>	Panela	1.098,2-1.183,4	Puntas y hojas (p)	3,7
			Bagazo de caña de azúcar (p)	2,5
Café <sup>d</sup>	Café verde	813,4-885,1	Cáscaras de café	0,38
			Madera de café	0,34
Arroz <sup>e</sup>	Arroz con cáscara verde	1.988,2-2.591,7	Cáscara de arroz	0,23
			Paja de arroz	1,43
Cacao <sup>f</sup>	Granos de cacao secos	54,8-60,5	Vainas de cacao	8
			Cáscaras de cacao	0,12
Banano <sup>g</sup>	Banano fresco	1.997,4-2.238,3	Pinzote de banano	1
			Seudotallo de banano	5
Plátano <sup>g</sup>	Plátano fresco	3.542,4-4.805,6	Pinzote de plátano	1
			Seudotallo de plátano	5
Coco <sup>h</sup>	Coco fresco	122,8-153,8	Exocarpio de coco	0,18
			Endocarpio de coco	0,12
			Fibra de coco	0,12
Silvicultura <sup>i</sup>	Madera de aserradero en bruto	536,5-883,7	Residuos de silvicultura	0,38
			Residuos de aserradero	0,34
Especies invasoras <sup>j</sup>	Espinillo	4.546,4	Biomasa de espinillo	1

<sup>a</sup> Los datos de producción de palma de aceite se tomaron del Anuario Estadístico [32]; las proporciones de residuos de biomasa con respecto al producto de referencia se tomaron de la literatura local [33, 34]. <sup>b</sup> Los datos de producción de caña de azúcar se tomaron de [35]; sus proporciones de residuos con respecto al producto de referencia se obtuvieron directamente de Cenicaña. Se consideró una relación de azúcar a caña de azúcar de 10 %. <sup>c</sup> Los datos de producción de panela se tomaron de [36]; sus relaciones residuo/producto de referencia y disponibilidad se obtuvieron directamente de Fedepanela, sobre la base de un estudio anterior [13]. <sup>d</sup> Los datos de producción de café se tomaron de [37]; sus ratios residuo/producto de referencia se tomaron de estudios publicados por Cenicafé [24, 38]. <sup>e</sup> Los datos de producción de arroz se tomaron de [12]; sus ratios residuo/producto de referencia se tomaron de [39, 40]. <sup>f</sup> Los datos de producción de cacao se tomaron de [41]; sus ratios residuo/producto de referencia se obtuvieron de [42]. <sup>g</sup> Los datos de producción de banano y plátano se tomaron de los informes de la organización de productores de plátanos [41,43]; sus ratios residuo/producto de referencia se obtuvieron de [13, 16]. <sup>h</sup> Los datos de producción de coco se tomaron de [41]; sus ratios residuo/producto de referencia se obtuvieron de [44, 45]. <sup>i</sup> Los datos de producción de madera fueron tomados de [29]; sus ratios residuo/producto de referencia se obtuvieron de [13, 17]. Se determinó que la biomasa del espinillo que puede obtenerse por hectárea era de 23,48 t, después de los informes de certificación de eliminación final de WELTNEU. Se estimó que el periodo de renovación para el espinillo (es decir, el tiempo que tarda en alcanzar una altura de 2 m) era de 2 años.

**Tabla 2.** Propiedades fisicoquímicas y factores de disponibilidad de diferentes biomásas.

Biomasa	CH [%]	PCI [MJ/kg]	A [Disponible t/t]
Racimos de fruta vacíos <sup>a</sup>	66	15,7	0,83
Cáscara de la almendra de palma <sup>a</sup>	12	19,1	0,05
Fibra del mesocarpio <sup>a</sup>	38	17,42	0,12
Troncos de palma de aceite <sup>a</sup>	50	12,33	0,5
Hojas de palma de aceite <sup>a</sup>	45	20,09	0,5
Puntas y hojas <sup>b</sup>	30	16,9	0,5
Bagazo de caña de azúcar <sup>b</sup>	50	17,93	0
Puntas y hojas (p) <sup>b</sup>	30	16,9	0,5
Bagazo de caña de azúcar (p) <sup>b</sup>	50	17,93	0
Residuos de silvicultura <sup>c</sup>	40	19,3	0,2
Residuos del aserradero <sup>c</sup>	13	19	0,2
Espinillo <sup>d</sup>	45	19,04	1
Cáscaras de café <sup>e</sup>	10	18,3	0
Madera de café <sup>e</sup>	13	17,4	0,5
Cáscara de arroz <sup>f</sup>	13,1	18,4	0
Paja de arroz <sup>f</sup>	11,7	14,9	0,5
Vainas de cacao <sup>g</sup>	85	15,5	1
Cáscaras de cacao <sup>g</sup>	6,7	17,3	1
Raquis de banano <sup>h</sup>	91	7,6	0,5
Seudotallo de banano <sup>h</sup>	93	9,91	0,5
Raquis de plátano <sup>h</sup>	91	7,57	0,5
Seudotallo de plátano <sup>h</sup>	93	8,5	0,5
Exocarpio de coco <sup>i</sup>	85	14,7	0,5
Endocarpio de coco <sup>i</sup>	10,5	19,1	1
Fibra de coco <sup>i</sup>	13,5	16,7	0

<sup>a</sup> Las propiedades fisicoquímicas de estos residuos industriales se tomaron de [33]; los autores de este estudio midieron el PCI y el CH de troncos y hojas de palma de aceite. El factor de disponibilidad de las biomásas de palma de aceite se tomó de [46]. <sup>b</sup> Las propiedades fisicoquímicas de estos residuos industriales se tomaron de [47, 48]. Su factor de disponibilidad se obtuvo directamente de representantes y organizaciones gremiales (Cenicaña y Fedepanela). <sup>c</sup> Las propiedades fisicoquímicas de estos residuos industriales se tomaron de [16, 17, 49]. Su factor de disponibilidad se obtuvo de representantes gremiales y de la empresa, y se confirmó además en el campo (Fedemadera, Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia). <sup>d</sup> Las propiedades fisicoquímicas del espinillo se tomaron de [27, 50]. Su factor de disponibilidad es igual a 1 debido a la naturaleza de la biomasa y a la forma en que se elimina. <sup>e</sup> Las propiedades fisicoquímicas de estos residuos industriales se tomaron de [24, 38, 49]. Su factor de disponibilidad se estimó de conformidad con las recomendaciones formuladas por representantes de Cenicafé. <sup>f</sup> Las propiedades fisicoquímicas de estos residuos industriales se tomaron de [40, 51]. Su factor de disponibilidad se estimó de acuerdo con las recomendaciones formuladas por los representantes de la industria. <sup>g</sup> Las propiedades fisicoquímicas de estos residuos industriales se tomaron de [42, 52]. <sup>h</sup> Las propiedades fisicoquímicas de estos residuos industriales se tomaron de [13]. Su factor de disponibilidad se estimó de acuerdo con las recomendaciones formuladas por los representantes de la industria. Las propiedades fisicoquímicas de estos residuos industriales se tomaron de [44,45].

**Tabla 3.** Total de biomasa producida, su cantidad disponible y su potencial energético.

Biomasa	PB [kt/Año]	AB [kt/Año]	Q [TJ/año]	QT [TJ/Año]	QG [MW]
Racimos de fruta vacíos	1.290,8-1.649,7	1.071,4-1.369,3	6.890,4-8.806,3	5.719,0-7.309,2	47,4-65,6
Cáscara de la almendra de palma	336,7-430,4	16,8-21,5	5.659,9-7.233,6	283,0-361,7	2,3-3,2
Fibra del mesocarpio	673,5-860,7	80,8-103,3	7.273,8-9.296,3	872,9-1.115,6	7,2-10,0
Troncos de palma de aceite	2.862,3-3.658,1	1.431,1-1.829,1	17.645,8-22.552,3	8.822,9-11.276,1	73,1-101,2
Hojas de palma de aceite	6.061,2-7.746,6	3.030,6-3.873,3	66.973,8-85.595,9	33.486,9-42.798,0	277,3-384,0
Puntas y hojas	5.084,4-5.690,9	2.542,2-2.845,4	60.149,0-67.323,0	30.074,5-33.661,5	249,1-302,0
Bagazo de caña de azúcar	5.296,3-5.928,0	0,0	47.481,3-53.144,5	0,0	0,0
Puntas y hojas (p)	4.063,4-4.378,5	2.031,7-2.189,2	48.069,6-51.797,4	24.034,8-25.898,7	199,1-232,4
Bagazo de caña de azúcar	2.745,5-2.958,4	0,0	24.613,5-26.522,3	0,0	0,0
Residuos de silvicultura	203,9-335,8	40,8-67,2	2.361,0-3.888,5	472,2-777,7	3,9-7,0
Residuos del aserradero	182,4-300,4	36,5-60,1	3.015,5-4.966,4	603,1-993,3	5,0-8,9
Espinillo	4.546,4	4.546,4	47.610,3	47.610,3	394,3-427,2
Cáscaras de café	187,1-203,6	0,0	3.081,3-3.352,9	0,0	0,0
Madera de café	2.928,3-3.186,4	1.464,2-1.593,2	44.328,8-48.236,2	22.164,4-24.118,1	183,6-216,4
Cáscara de arroz	357,9-466,5	0,0	5.722,2-7.459,1	0,0	0,0
Paja de arroz	2.843,1-3.706,1	1.421,6-1.853,0	37.405,9-48.759,6	18.702,9-24.379,8	154,9-218,7
Vainas de cacao	438,4-484,3	438,4-484,3	1.019,2-1.126,0	1.019,2-1.126,0	8,4-10,1
Cáscaras de cacao	6,6-7,3	6,6-7,3	106,1-117,3	106,1-117,3	0,9-1,1
Raquis de banano	1.997,4-2.238,3	998,7-1.119,2	1.366,2-1.531,0	683,1-765,5	5,7-6,9
Seudotallo de banano	9.987,0-11.191,6	4.993,5-5.595,8	6.927,9-7.763,6	3.464,0-3.881,8	28,7-34,8
Raquis de plátano	3.542,4-4.805,6	1.771,2-2.402,8	2.413,4-3.274,1	1.206,7-1.637,0	10,0-14,7
Seudotallo de plátano	17.711,8-24.028,1	8.855,9-12.014,1	10.538,5-14.296,7	5.269,2-7.148,4	43,6-64,1
Exocarpio de coco	22,1-27,7	11,0-13,8	48,7-61,1	24,4-30,5	0,2-0,3
Endocarpio de coco	14,7-18,5	14,7-18,5	251,8-315,6	251,8-315,6	2,1-2,8
Fibra de coco	14,7-18,5	0,0	212,8-266,7	0,0	0,0
Total	73.398,2-88.866,4	34.804,1-42.006,7	451.166,8-525.296,4	204.871,5-235.321,9	1.696,7-2.111,3

estaban en su punto más bajo; el extremo superior del rango presenta el mismo rango de potencial energético en una situación en la que la biomasa disponible y la eficiencia de gasificación estaban en su punto más alto.

En el primer escenario (es decir, baja producción y eficiencia), el potencial energético técnico calculado fue de 451,2 PJ/año, el potencial energético técnico total fue de 204,8 pJ/año y, finalmente, el potencial de gasificación total fue de 1.696,7 MW de electricidad. En el segundo escenario (es decir, alta producción y eficiencia), el potencial energético calculado era de 525,3 pJ/año, el potencial energético técnico total era de 235,3 PJ/año y, por último, el potencial total de gasificación era de 2.111,3 MW de electricidad. Además, en un escenario de baja producción y alta eficiencia, el potencial total de gasificación sería de 1.948,9 MW, mientras que, en un escenario de alta producción y baja eficiencia, este potencial sería de 1.831,1 MW. A continuación, sin embargo, nos centraremos en los 2 primeros escenarios, ya que nos permiten establecer el rango de potencial energético más amplio posible para las biomásas evaluadas.

La principal diferencia entre el potencial energético teórico y el técnico en ambos escenarios se atribuye al factor de disponibilidad de cada biomasa. Trabajar con factores de disponibilidad estrictos garantiza que no habrá usos contradictorios para cada biomasa producida (por ejemplo, los residuos necesarios para proteger y enriquecer el suelo de un campo no se utilizarán para la producción de energía). La Figura 2 presenta una visión general del potencial energético técnico estimado para el país.

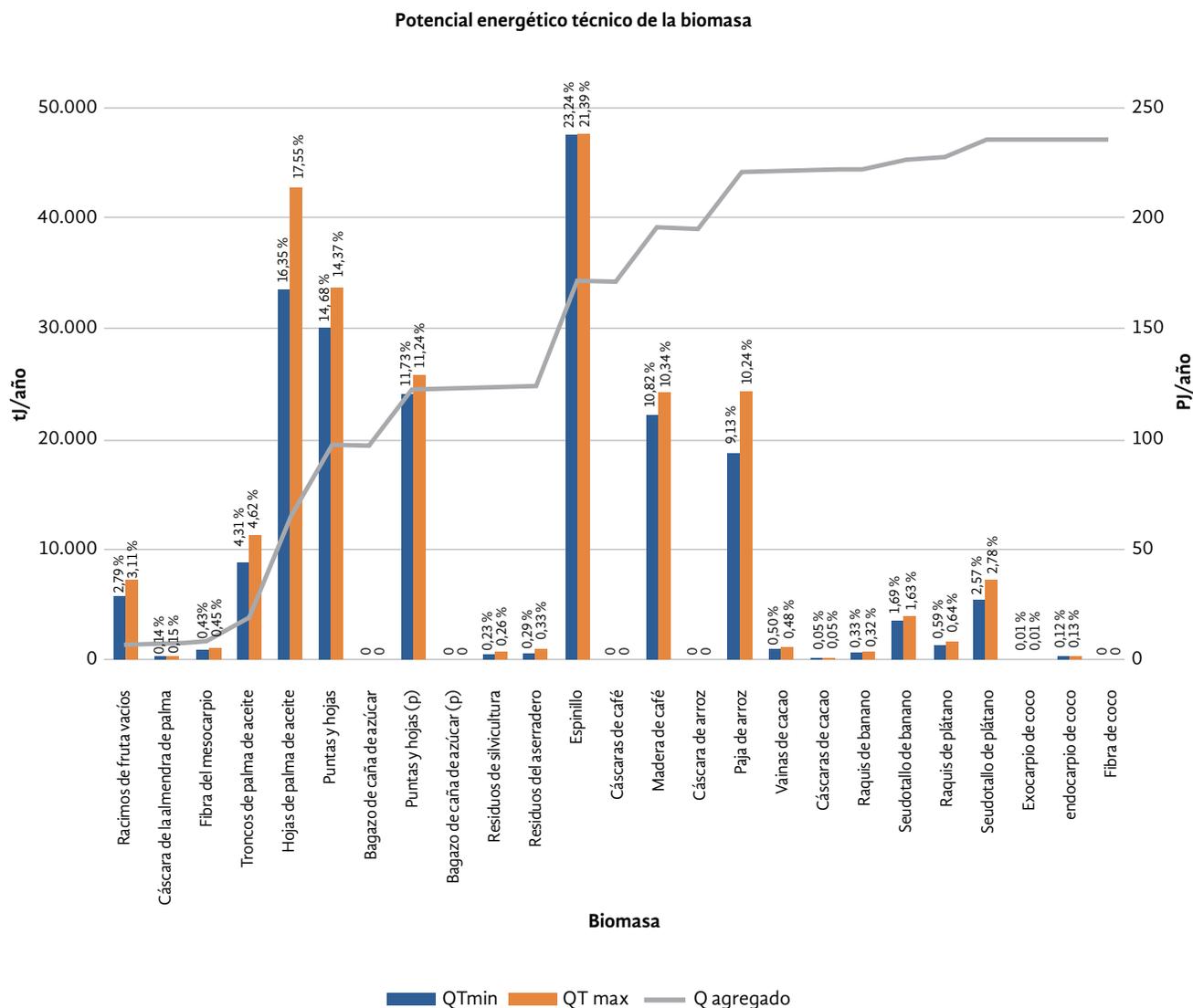
Por lo tanto, en general, el espinillo resultó tener el mayor potencial energético técnico en ambos escenarios (20,23-23,23 %), seguido de las hojas de palma de aceite (16,34-18,18 %), las puntas y hojas de caña de azúcar (14,30-14,67 %), las puntas y hojas de caña de azúcar (p) (11,00-11,73 %), la madera de café (10,25-10,85 %) y los estípites de palma de aceite (4,30-4,79 %). Cabe señalar que las biomásas con un potencial energético igual a 0, como el bagazo de la caña de azúcar y las cáscaras de café, también tenían un factor de disponibilidad de 0. Esto se debe a que ya se están transformando en energía, aunque no en plantas de gasificación. Dado que el consumo de energía de Colombia se encuentra en alrededor de 1.336 PJ/año y el potencial energético técnico total del país se estimó en 204,9-235,3 PJ/año, el 15,3-17,6 % de esta demanda de energía podría ser

abastecida por biomasa si hubiera una técnica de transformación cuya eficiencia fuera del 100 %. Por otro lado, si se eligiera la gasificación como la técnica de transformación para convertir todas las biomásas disponibles en energía, se podría suministrar 3,69-4,24 % de la demanda total de energía del país, ya que el potencial total de gasificación de estas biomásas es de 1.696,7-2.111,3 MW (49,3-56,6 PJ/año). Cabe señalar que el espinillo por sí solo podría abastecer el 3,6 % de la demanda nacional de energía si pudiera convertirse en energía con un 100 % de eficiencia. Sin embargo, siendo realistas, si la gasificación fuera la técnica de transformación elegida, esta especie invasora sería capaz de abastecer el 0,88 % de esa demanda, dado que su potencial de gasificación es de 427,2 MW (11,5 PJ/año). Además, el potencial energético total de gasificación calculado en este estudio para cada escenario, que fue de 12.633,7-15.720,8 GWh (1.696,7-2.111,3 MW), podría suministrar 74,34-92,51 % de los 16.994 GWh de la electricidad consumida en el país.

El potencial energético de gasificación del espinillo solo podría abastecer el 17,28-18,72 % de la demanda eléctrica nacional, ya que equivale a 2.935,97-3.180,63 GWh (394,3-427,2 MW).

El potencial energético teórico estimado para la mayoría de las biomásas agrícolas es similar a los valores reportados en estudios previos [13-15], sin embargo, en el caso de la caña de azúcar, el café, el arroz, el banano y el plátano hubo algunas ligeras variaciones que se atribuyeron a los diferentes valores de CH y PCI, utilizados en el presente estudio. Además de los cambios mencionados en las propiedades fisicoquímicas, se incluyó una nueva variable en la estimación del potencial energético de la industria del aceite de palma. Es así como se consideró el potencial energético de los residuos de campo (es decir, estípites y hojas de palma de aceite), lo que causó variaciones significativas entre los valores de potencial energético final obtenidos para esta industria, que, en comparación con estudios anteriores, se centró en la biomasa que podría obtenerse del procesamiento industrial del fruto. El potencial energético forestal estimado en este estudio también resultó ser diferente al recogido en trabajos anteriores [13,16], muy probablemente como consecuencia de los límites que se aplicaron a la investigación, que se centran en la madera en bruto procesada en aserraderos.

**Figura 2.** Máximo (naranja) y mínimo (azul) potencial energético técnico de la biomasa colombiana y valor agregado del potencial energético técnico (gris).



## Discusión

Este estudio presentó el potencial energético de la biomasa colombiana, teniendo en cuenta las posibles variaciones en la producción agrícola y forestal, lo que afecta directamente la disponibilidad de la misma. Además, se consideraron las posibles variaciones de eficiencia en el proceso de gasificación. Es importante señalar que se establecieron los escenarios centrándose en los valores de las propiedades que son

más susceptibles a las fluctuaciones. La producción de biomasa y la eficiencia de la gasificación pueden variar por muchas razones, mientras que las propiedades fisicoquímicas y las relaciones de residuo a producto final de cada biomasa permanecen bastante estables a medida que pasa el tiempo.

Colombia es un país con gran potencial para generar energía a partir de biomasa debido a la alta producción de esta última en varias industrias. Además,

debido a su naturaleza leñosa, alto PCI y producción centralizada, algunas de estas biomásas son particularmente aptas para la conversión en energía a través de la gasificación. De hecho, los residuos de estas industrias pueden utilizarse para satisfacer sus propias demandas de energía o para producir electricidad que se venderá en el mercado. Incluso en industrias en las que ya se aplican ampliamente otros métodos de transformación, como la combustión en la industria de la caña de azúcar, la investigación sobre la gasificación podría seguir siendo fructífera. Ciertamente, las puntas y hojas de la caña de azúcar no se utilizan convencionalmente como recurso energético viable; por ello, presentar como alternativa una tecnología más eficiente, como la gasificación, puede aumentar su valor y el interés de la industria.

Por otro lado, el potencial energético estimado para biomásas producidas a menor escala, como las vainas de cacao, es comparable al potencial de residuos generados a escalas mucho mayores, como los que se dan en las industrias de la caña de azúcar y el aceite de palma; por lo tanto, aprovechar el potencial energético de los residuos a pequeña escala puede permitir a los agricultores abastecer sus propias necesidades energéticas. También pueden ser un motor para la sustitución de los combustibles fósiles. Teniendo esto en cuenta, y considerando los costos relativamente elevados asociados a la instalación y explotación de plantas de gasificación, es crucial encontrar formas de garantizar la rentabilidad de esta práctica para hacerla más accesible. De hecho, la aplicación de estrategias como la creación de asociaciones de productores agrícolas, la instalación de plantas regionales y los incentivos fiscales establecidos por el gobierno pueden ayudar a que la gasificación encuentre su lugar como tecnología de generación de energía sostenible en Colombia.

Del mismo modo, el potencial energético estimado para el espinillo es comparable al de algunas biomásas generadas en la agroindustria a gran escala. Por lo tanto, este material podría revalorizarse y convertirse en una fuente temporal o permanente de bioenergía. Es evidente que replantar parcialmente una especie invasora como fuente de biomasa para la generación de energía podría interferir en su erradicación definitiva; sin embargo, aprovechar el potencial energético de tales especies exige, como mínimo, regular su propagación, lo que atacaría algunos de los problemas ecológicos que está causando en la actualidad, aunque no conduzca a una solución

completa. Además, el resultado exacto de la combinación de incentivos económicos y la necesidad de resolver problemas ecológicos no siempre es sencillo. De hecho, existen varios escenarios imaginables que podrían tener lugar si se llevara a cabo la gasificación del espinillo.

Teniendo esto en cuenta, se presentan dos posibilidades, una que prioriza la sostenibilidad económica y otra que privilegia las preocupaciones ecológicas. La primera requiere recolectar la totalidad de la biomasa de espinillo disponible en las regiones afectadas y su posterior transformación en energía. Posteriormente, estas zonas podrían ser objeto de un seguimiento minucioso para garantizar la erradicación completa de la especie invasora. En este caso, los beneficios de vender la energía producida serían limitados, ya que el suministro de biomasa no se regeneraría constantemente. Esto tal vez significaría que la venta de bioenergía no sería suficiente para recuperar las inversiones iniciales; sin embargo, las plantas de gasificación establecidas para este propósito podrían reutilizarse para convertir otros tipos de biomasa una vez que se erradique el espinillo. Además, el beneficio ecológico que esto produciría es invaluable. El segundo escenario consiste en recolectar regularmente una parte de la biomasa de espinillo disponible para convertirla en energía; en consecuencia, se controlaría la propagación de las especies invasoras al tiempo que se garantizaría un suministro constante de biomasa y sostenibilidad económica a largo plazo. Además, a pesar del daño que causa, el espinillo ha demostrado ser capaz de proporcionar algunos servicios ecosistémicos, como la prevención de la erosión y la retención de la humedad del suelo. De hecho, a pesar de que los servicios antes mencionados, a menudo son menos significativos que los proporcionados por los biomasas nativos, trabajar con una cantidad limitada de espinillo puede ser muy útil en algunos ecosistemas donde el agua es escasa y el suelo es bajo en nutrientes [26]. En entornos controlados, estos servicios podrían aprovecharse adecuadamente al tiempo que se mantienen los daños al mínimo.

Además, las biomásas generadas en el campo tienen el mayor potencial energético cuando se considera su disponibilidad y la escala a la que se producen; sin embargo, aprovechar al máximo este potencial tiene algunos desafíos asociados con el transporte, la recolección y su almacenamiento. Pero, como muestra este estudio, sus potenciales de energía

pueden hacer que valga la pena afrontar tales desafíos y encontrar soluciones, como la densificación; dichas tecnologías aumentarían la rentabilidad de su gasificación. Además, este potencial puede subir aún más en el futuro debido a la optimización de la eficiencia de la gasificación, o un aumento en la producción de biomasa. El factor de disponibilidad de las biomásas generadas en el campo se estableció en 50 %, ya que el suelo requiere que una parte de esa biomasa sea mantillo para mantenerse saludable; sin embargo, este número proviene de observaciones no sistemáticas de los agricultores y tal vez podría hacerse más preciso para cada biomasa en cada caso particular. Al verificar los requisitos del suelo de la granja y cultivo, solo se podría dejar en el suelo la cantidad absolutamente necesaria de biomasa, lo que aumentaría su factor de disponibilidad para la gasificación y permitiría a los agricultores extraer más valor de ella.

Además, los gremios y centros de investigación pueden utilizar los resultados de este estudio como un trampolín para aprovechar el potencial de los materiales a menudo pasados por alto. El desarrollo de planes y conocimientos que promuevan la implementación de tecnologías de transformación de biomasa puede resultar útil en un futuro próximo. Aunque este análisis se centró en la gasificación como una tecnología de producción de energía viable, aquí el potencial técnico encontrado para cada una de las biomásas evaluadas se puede aprovechar mediante el uso de otras tecnologías para producir electricidad o calor.

La crisis climática mundial, que probablemente se intensificará en los próximos años, también hace que la investigación sobre la gasificación y otros métodos de transformación de la biomasa sea una necesidad. Incluso si las plantas hidroeléctricas son, a largo plazo, una alternativa de bajo costo para producir energía renovable, estas son vulnerables a eventos como las sequías. Hoy en día, la generación de electricidad en Colombia depende casi por completo de la energía hidroeléctrica, por lo que sería prudente comenzar a diversificar las fuentes para mitigar los efectos negativos de los fenómenos climáticos futuros. Aunque la bioenergía también es vulnerable a las sequías, ni con la misma intensidad ni en la misma medida que la energía hidroeléctrica. Esto significa que la producción de bioenergía no necesariamente colapsaría o se vería afectada de manera importante si ocurriera lo mismo con las centrales hidroeléctricas de una región (lo contrario, por supuesto, también es cier-

to). Además, los cultivos a gran escala, como la caña de azúcar, muestran picos de producción durante los periodos secos en el país [53]. Lo más probable es que la energía suministrada sea insuficiente para compensar la escasez que produciría una planta hidroeléctrica que falla; sin embargo, es sensato diversificar las fuentes para reducir el impacto que tales eventos pueden causar con respecto a la disponibilidad de energía.

Finalmente, cabe mencionar que la precisión de los datos recopilados sobre la producción de biomasa y las propiedades fisicoquímicas de la biomasa es evidencia de los resultados fructíferos de los investigadores académicos, asociaciones gremiales y agencias gubernamentales que colaboran entre sí. Superar las relaciones desarticuladas entre la academia, el gobierno y las diversas industrias productivas de un país será crucial para el desarrollo y la implementación real de tecnologías que puedan contribuir a los esfuerzos actuales para combatir el cambio climático y al mismo tiempo aumentar la eficiencia de la producción industrial. Se pueden aplicar metodologías similares a cualquier región para ayudarla a avanzar hacia un suministro de energía más soberano y sostenible.

## Conclusiones

El potencial energético de gasificación de varias biomásas actualmente no utilizadas en Colombia es significativo. De hecho, los datos muestran que 92,51 % de la demanda de electricidad del país podría satisfacerse, así como hasta 17,6 % de sus demandas totales de energía. Dado que la diversificación de las estrategias de producción de energía de un país lo hace más resistente a los efectos negativos del cambio climático, también es aconsejable implementar la gasificación. Además, el uso de esta tecnología requiere de materiales que de otro modo se descartarían, lo que puede ayudar a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Por lo tanto, una implementación ambientalmente consciente de la gasificación podría ayudar a los países a cumplir sus compromisos de los ODS. Por estas razones, analizar la idoneidad de implementar la gasificación en diferentes regiones del mundo y optimizar sus condiciones operativas y logísticas, parece ser un camino sensato para futuras investigaciones sobre bioenergía.

**Aportes de los autores:** conceptualización, C. P. P.-R., C. S. D. G. y A. M.; análisis formal, C. P. P.-R., C. S. D. G. y A. M.; investigación, C. P. P.-R., L. A. R.,

C. S. D. G., A. M. y C. G.-M.; metodología, C. P. P.-R., C. S. D. G. y A. M.; administración de proyectos, C. P. P.-R. y C. G.-M.; recursos, C. S. D. G. y C. G.-M.; escritura, C. S. D. G. y A. M.; escritura, revisión y edición, C. P. P.-R., L. A. R., C. S. D. G., A. M. y C. G.-M. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

**Financiación:** la investigación y los costos de procesamiento de artículos fueron financiados por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia (Minciencias), a través del Patrimonio Autónomo Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, Fondo Francisco José de Caldas, número de subvención [80740-507-2020].

**Declaración de la Junta de Revisión Institucional:** no aplica.

**Declaración de consentimiento informado:** no aplica.

**Declaración de disponibilidad de datos:** no aplica.

**Reconocimientos:** los autores agradecen el apoyo del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia que financió el proyecto “Aprovechamiento del potencial energético de residuos agrícolas disponibles en Colombia para generar electricidad, a través de procesos termoquímicos de gasificación”, ganador de la Convocatoria “Conectando Conocimiento 852-2019”. También agradecen a la Universidad Nacional de Colombia como a la Universidad de Antioquia que hicieron posible el desarrollo de esta investigación. Se agradece especialmente a todos los representantes gremiales, agencias gubernamentales, expertos y miembros de la compañía que contribuyeron con información y experiencia al proyecto.

**Conflicto de intereses:** los autores declaran que no hay conflicto de intereses.

#### Apéndice A. Datos de producción agrícola y forestal (kt)

Producto de referencia	2015	2016	2017	2018	2019	$\mu$	$\sigma$	Mín	Máx	cv
Palma de aceite	6.291,2	5.612,3	6.646,9	7.007,3	7.172,8	6.546,1	623,0	5.612,3	7.172,8	0,10
Caña de azúcar	2.371,2	2.118,5	2.233,8	2.335,4	2.204,0	2.252,6	102,0	2.118,5	2.371,2	0,05
Caña de azúcar (p)	1.168,3	1.101,3	1.166,6	1.183,4	1.098,2	1.143,6	40,5	1.098,2	1.183,4	0,04
Silvicultura	569,2 *	575,5	536,5	883,7	751,1	663,2	149,1	536,5	883,7	0,22
Café	850,5	823,9	851,6	813,4	885,1	844,9	28,0	813,4	885,1	0,03
Arroz	1.988,2	2.526,2	2.591,7	2.486,7	2.536,9	2.425,9	247,6	1.988,2	2.591,7	0,10
Cacao	54,8	56,8	60,5	56,9	59,7	57,7	2,4	54,8	60,5	0,04
Banano	1.997,4	2.001,5	2.120,7	2.125,2	2.238,3	2.096,6	100,5	1.997,4	2.238,3	0,05
Plátano	3.542,4	3.909,0	4.111,7	4.430,2	4.805,6	4.159,8	483,9	3.542,4	4.805,6	0,12
Coco	130,0	122,8	127,2	145,3	153,8	135,8	13,2	122,8	153,8	0,10

\* Datos de 2020.

## Referencias

1. Quaschnig, V. *Renewable Energy and Climate Change*; John Wiley & Sons, Ltd.: Hoboken, NJ, USA, 2019.

2. UN. *The 2030 Agenda and the Sustainable Development Goals an Opportunity for Latin America and the Caribbean Thank You for Your Interest in This ECLAC Publication*; UN: San Francisco, CA, USA, 2018; ISBN 9789211220117.
3. Liu, Z.; Saydaliev, H.; Lan, J.; Ali, S.; Anser, M. Assessing the Effectiveness of Biomass Energy in Mitigating CO<sub>2</sub> Emissions: Evidence from Top-10 Biomass Energy Consumer Countries. *Renew. Energy* 2022, 191, 842-851. [CrossRef]
4. IEA. World Energy Balances. Disponible en línea: 1486495650 (consultado el 8 de agosto de 2002).
5. Pelkmans, L. *IEA Bioenergy Countries' Report-Update 2018: Bioenergy Policies and Status of Implementation*; IEA: París, Francia, 2018.
6. Albashabsheh, N.T.; Heier Stamm, J.L. Optimization of Lignocellulosic Biomass-to-Biofuel Supply Chains with Mobile Pelletting. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* 2019, 122, 545-562. [CrossRef]
7. Calero, D.; Chambi, C.; Majano, A. M.; Ubico, D.; Zevallos, P. *Hacia un Desarrollo Resiliente y Bajo en Emisiones en Latinoamérica y el Caribe-Reporte LEDSenLAC 2019*; Libélula: Toronto, ON, Canadá, 2019; ISBN 978-612-47127-1-5.
8. Toklu, E. Biomass Energy Potential and Utilization in Turkey. *Renew. Energy* 2017, 107, 235-244. [CrossRef]
9. Bilandzija, N.; Voca, N.; Jelcic, B.; Jurisic, V.; Matin, A.; Grubor, M.; Kricka, T. Evaluation of Croatian Agricultural Solid Biomass Energy Potential. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 93, 225-230. [CrossRef]
10. Suzuki, K.; Tsuji, N.; Shirai, Y.; Hassan, M. A.; Osaki, M. Evaluation of Biomass Energy Potential towards Achieving Sustainability in Biomass Energy Utilization in Sabah, Malaysia. *Biomass Bioenergy* 2017, 97, 149-154. [CrossRef]
11. Ferreira, L. R. A.; Otto, R. B.; Silva, F. P.; De Souza, S. N. M.; De Souza, S. S.; Ando Junior, O. H. Review of the Energy Potential of the Residual Biomass for the Distributed Generation in Brazil. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 94, 440-455. [CrossRef]
12. DANE. *Encuesta Nacional Agropecuaria 2019*; DANE: Maple Grove, MN, USA, 2020.
13. Escalante, H.; Orduz, J.; Zapata, H.; Cardona, M.; Duarte, M. *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. Reporte preparado para la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia*; la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME): Bogotá, Colombia, 2011; ISBN 9789588504599.
14. Gutiérrez, A. S.; Eras, J. J. C.; Hens, L.; Vandecasteele, C. The Energy Potential of Agriculture, Agroindustrial, Livestock, and Slaughterhouse Biomass Wastes through Direct Combustion and Anaerobic Digestion. The Case of Colombia. *J. Clean. Prod.* 2020, 269, 122317. [CrossRef]

15. González-Salazar, M. A.; Morini, M.; Pinelli, M.; Spina, P. R.; Venturini, M.; Finkenrath, M.; Poganietz, W. R. Methodology for Estimating Biomass Energy Potential and Its Application to Colombia. *Appl. Energy* 2014, 136, 781-796. [CrossRef]
16. Unidad de Planeación Minero Energética UPME. *Actualización y revisión de los balances energéticos nacionales de Colombia 1975-2009 Informe Final*; UPME: Bogotá, Colombia, 2011; Volumen 3.
17. UPME, UNAL *Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento*; UPME: Bogotá, Colombia, 2018.
18. UPME. *Unidad de Planeación Minero Energética Plan Energético Nacional 2020-2050*; UPME: Bogotá, Colombia, 2015.
19. UPME Balance Energético Colombiano-BECO. Demanda y eficiencia energética. Recuperado de <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/BECOEnergetico.aspx> (consultado el 12 de agosto de 2022).
20. Bain, R. L.; Broer, K. *Gasification*; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2011; ISBN 9780470721117.
21. Sikarwar, V. S.; Zhao, M. *Biomass Gasification*; Elsevier: Ámsterdam, Países Bajos, 2017; Volumen 3, ISBN 9780128046777.
22. IDEA. *Biomasa: Gasificación*; IDAE: Madrid, España, 2007; ISBN 978-84-96680-20-3.
23. de Oliveira, J. L.; da Silva, J. N.; Martins, M. A.; Pereira, E. G.; da Conceição Trindade Bezerra e Oliveira, M. Gasification of Waste from Coffee and Eucalyptus Production as an Alternative Source of Bioenergy in Brazil. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 2018, 27, 159-166. [CrossRef]
24. Tascón, C. E. O.; Uribe, J. R. S.; Valencia, N. R. Evaluación de un gasificador de flujo descendente utilizando astillas de madera de café. *Cenicafé* 2017, 68, 61-75.
25. Martínez, I.; Callén, M. S.; Grasa, G.; López, J. M.; Murillo, R. Sorption-Enhanced Gasification (SEG) of Agroforestry Residues: Influence of Feedstock and Main Operating Variables on Product Gas Quality. *Fuel Process. Technol.* 2022, 226, 107074. [CrossRef]
26. Cataño, J. B.; Contreras-Rodríguez, S. M.; Malambo-Duarte, N.; Cárdenas, A. M.; Ocampo, R.; Perdomo, D. R.; Rojas, J. *Plan de Prevención, Manejo y Control de las Especies de Retamo Espinoso (Ulex europaeus) y Retamo Liso (Genista monspessulana) En la Jurisdicción CAR*; CAR, Ed.; CAR: Bogotá, Colombia, 2019; ISBN 9789585480230.
27. Rojas, D. *Estudio de las Características del retamo espinoso (Ulex europaeus) localizado en los cerros orientales de la ciudad de Bogotá para su aprovechamiento como medida de minimización del impacto ambiental causado por su presencia*; Universidad Nacional Abierta y a Distancia: Bogotá, Colombia, 2020; Volumen 53.
28. Goyes, M. F. M.; Rubio, J.; Ocampo, R.; Cataño, J. I. B. *Catálogo de especies invasoras del territorio CAR*; Pontificia Universidad Javeriana, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca-CAR: Bogotá, Colombia, 2015.

29. Fedemaderas. *Boletín Estadístico 2020*; Fedemaderas: Bogotá, Colombia, 2020.
30. Lee, S. Y.; Sankaran, R.; Chew, K. W.; Tan, C. H.; Krishnamoorthy, R.; Chu, D.-T.; Show, P.-L. Waste to Bioenergy: A Review on the Recent Conversion Technologies. *BMC Energy* 2019, 1, 4. [CrossRef]
31. Clarke-Energy Synthesis Gas/Syngas. Recuperado de <https://www.clarke-energy.com/applications/synthesis-gas-syngas/> (consultado el 8 de abril de 2022).
32. Fedepalma. *Anuario Estadístico 2019*; Fedepalma: Bogotá, Colombia, 2019.
33. García, J.; Yáñez, E.; Rodríguez, N.; Núñez, J. A. G.; Loh, S. K.; Ramírez-Contreras, N. E.; Arévalo, S. A.; García-Núñez, J. A.; Van Dam, J. Subproductos de la Palma de Aceite como Materias Primas de Biomasa. *Rev. Palmas* 2017, 141, 149-156. [CrossRef]
34. García, J. A.; Yáñez, A. E. E.; Cárdenas, M. M. M. Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia. *Rev. Palmas* 2010, 31, 41-48.
35. Asocaña. *Producción 2000-2020*; Asocaña: Cali, Colombia, 2020.
36. Fedepanela. *Áreas, rendimiento y producción de caña panelera*; Fedepanela: Bogotá, Colombia, 2019.
37. FNC; SICA. *Precios área y producción de café*; FNC: Seúl, Corea, 2020.
38. Martínez, C. L. M.; Rocha, E. P. A.; Carneiro, A. D. C. O.; Gomes, F. J. B.; Batalha, L. A. R.; Vakkilainen, E.; Cardoso, M. Characterization of Residual Biomasses from the Coffee Production Chain and Assessment the Potential for Energy Purposes. *Biomass Bioenergy* 2019, 120, 68-76. [CrossRef]
39. Felfli, F. F.; Mesa, P. J. M.; Rocha, J. D.; Filippetto, D.; Luengo, C. A.; Pippo, W. A. Biomass Briquetting and its Perspectives in Brazil. *Biomass Bioenergy* 2011, 35, 236-242. [CrossRef]
40. Zhang, Y.; Wang, Q.; Li, B.; Li, H.; Zhao, W. Is There a General Relationship between the Exergy and HHV for Rice Residues? *Renew. Energy* 2018, 117, 37-45. [CrossRef]
41. MADR. *AGRONET. Estadísticas Agropecuarias*; MADR: Bucarest, Rumania, 2020.
42. Rojas, K. E.; García, M. C.; Cerón, I. X.; Ortiz, R. E.; Tarazona, M. P. Identification of Potential Maturity Indicators for Harvesting Cacao. *Heliyon* 2020, 6, e03416. [CrossRef]
43. Augura. *Coyuntura Bananera 2020*; Augura: Medellín, Colombia, 2020.
44. Mühlbauer, W.; Müller, J. Coconut. Cocos Nucifera L. En *Drying Atlas*, 1ra ed.; Elsevier: Amsterdam, Países Bajos; Woodhead Publishing: London, UK, 2020; pp. 143-150. [CrossRef]
45. AlNouss, A.; Parthasarathy, P.; Shahbaz, M.; Al-Ansari, T.; Mackey, H.; McKay, G. Techno-Economic and Sensitivity Analysis of Coconut Coir Pith-Biomass Gasification Using ASPEN PLUS. *Appl. Energy* 2020, 261, 114350. [CrossRef]

46. Núñez, J. A. G. Nuevos Conceptos para Biorrefinerías de Aceite de Palma. *Palmas* 2013, 34, 66-84.
47. de Souza Noel Simas Barbosa, L.; Hytönen, E.; Vainikka, P. Carbon Mass Balance in Sugarcane Biorefineries in Brazil for Evaluating Carbon Capture and Utilization Opportunities. *Biomass Bioenergy* 2017, 105, 351-363. [CrossRef]
48. Cardozo, E.; Erlich, C.; Alejo, L.; Fransson, T. H. Combustion of Agricultural Residues: An Experimental Study for Small-Scale Applications. *Fuel* 2014, 115, 778-787. [CrossRef]
49. Douglas Roque Lima, M.; Poliana Santos Patricio, E.; de Oliveira Barros Junior, U.; Reis de Assis, M.; Nogueira Xavier, C.; Bufalino, L.; Fernando Trugilho, P.; Ricardo Gherardi Hein, P.; de Paula Protásio, T. Logging Wastes from Sustainable Forest Management as Alternative Fuels for Thermochemical Conversion Systems in Brazilian Amazon. *Biomass Bioenergy* 2020, 140, 105660. [CrossRef]
50. 50. Núñez-Moreno, A.; Barbieri, G.; Gordillo, G. Analysis of the Feasibility of Generating Solid Biofuel from *Ulex Europaeus* Plants. *Rev. Fac. Ing.* 2020, 29, e10454. [CrossRef]
51. Biswas, B.; Pandey, N.; Bisht, Y.; Singh, R.; Kumar, J.; Bhaskar, T. Pyrolysis of Agricultural Biomass Residues: Comparative Study of Corn Cob, Wheat Straw, Rice Straw, and Rice Husk. *Bioresour. Technol.* 2017, 237, 57-63. [CrossRef] [PubMed]
52. Gil, M. V.; González-Vázquez, M. P.; García, R.; Rubiera, F.; Pevida, C. Assessing the Influence of Biomass Properties on the Gasification Process Using Multivariate Data Analysis. *Energy Convers. Manag.* 2019, 184, 649-660. [CrossRef]
53. Asocaña. *Más que azúcar, una fuente de energía renovable para el país-cogeneración*; Asocaña: Cali, Colombia, 2017.