

PROPUESTA DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL AFRECHO GENERADO EN LA PRODUCCIÓN DE SAGÚ EN EL DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA^{1*}

Jair Fernando Ardila Gonzalez^{2*}, Ximena Vannesa Hurtado Serrano^{3*}, Yesica Natalia Mosquera Beltran^{4*}, Johanna Karina Solano Meza^{5*}, Zully Esmeralda Gómez Rosales^{6*}

ABSTRACT

This study aims to evaluate the energy potential of residual biomass, generated in the production of sago flour and give a technological proposal from its physicochemical and compositional characterization. For this it was necessary to collect samples on farms dedicated to the planting of the Achira plant (*Canna Edulis*, Ker) within the department of Cundinamarca. The mathematical model implemented by the Energy Mining Planning Unit (UPME) is applied to determine the energy potential of residual biomass, resulting in. The characterization presents that the percentage of humidity has a value of 6,33%, the percentage of ash of 3.68% and volatile solids corresponds to 80% by weight, these parameters are considerable for using thermochemical technologies, especially, direct combustion.

^{1*} Investigación finalizada. Propuesta de aprovechamiento energético del afrecho generado en la producción de sagú en el departamento de Cundinamarca, proyecto financiado por la Convocatoria Para el Fomento de la Investigación, Creación e Innovación Tomasina, Fodein.

^{2*} ^{3*} ^{4*} ^{5*} ^{6*} Universidad Santo Tomás - Facultad de Ingeniería - Programa de Ingeniería Ambiental - Bogotá, Colombia.

Keywords: Sago, Biomass, Energy use, Physicochemical parameters, Clean technologies, Direct combustion, Greenhouse gases.

RESUMEN

Este estudio tiene como objetivo evaluar el potencial energético de la biomasa residual, generada en la producción de harina de Sagú y dar una propuesta tecnológica a partir de su caracterización fisicoquímica y composicional. Para esto fue necesario recolectar muestras en fincas dedicadas a la siembra de la planta Achira (*Canna Edulis, Ker*) dentro del departamento de Cundinamarca. Se aplica el modelo matemático implementado por la Unidad de Planeación Minero Energético (UPME) para la determinación del potencial energético de la biomasa residual, dando como resultado $28,69 \frac{TJ}{año}$. La caracterización presenta que el porcentaje de humedad tiene un valor de 6,33%, el porcentaje de cenizas de un 3,68% y sólidos volátiles corresponde a un 80% en peso, estos parámetros son considerables para utilizar tecnologías termoquímicas, especialmente, la combustión directa.

Palabras clave: Sagú, Biomasa, Aprovechamiento energético, Parámetros fisicoquímicos, Tecnologías limpias, Combustión directa, Gases de efecto invernadero.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se presenta una problemática por la generación de residuos agroindustriales que se originan en algunas etapas de los procesos de producción, esto se da principalmente porque no se les da un adecuado procesamiento, lo cual ocasiona impactos ambientales [1]. Sin embargo, existen tecnologías de aprovechamiento

energético para biomasas residuales por medio de procesos bioquímicos y termoquímicos, la cual es una manera de reducir la dependencia de los combustibles convencionales desempeñando un papel importante en la transición energética hacia fuentes sostenibles y renovables [2].

Entre las tecnologías termoquímicas se encuentran la combustión directa la cual consiste en quemar un "combustible" en un dispositivo o sistema, sin intermediarios o conversiones adicionales de energía [3] y; la gasificación de biomasa, que opera para convertir los sólidos en gas de síntesis por medio de reactores cerrados [4]. Dentro de los bioprocesos se destacan las tecnologías de digestión anaerobia y compostaje que aprovechan las características bioquímicas de la biomasa residual húmeda para transformarla en productos aprovechables como el biogás y fertilizantes [5].

En Colombia, el departamento de Cundinamarca tiene una importante producción de sagú que supera las 1000 toneladas/año, siendo un sector que beneficia la economía local [6]. En muchos casos la producción de la harina de sagú se realiza de manera artesanal, especialmente en la extracción del almidón, es por esto que no cuenta con el manejo, tratamiento o aprovechamiento adecuado de los residuos generados, ya que no es de interés o de conocimiento el uso de los subproductos o residuos que se generan en la línea de producción. Tal es el caso del afrecho, el cual se origina como subproducto en la extracción del almidón dentro de las etapas de rayado y tamizado [7].

Los productores de sagú le dan aprovechamiento al afrecho como abono orgánico, ya que tiene la capacidad de mejorar las propiedades estructurales del suelo y así mismo aumenta el crecimiento de la planta, aunque la eficacia del afrecho como abono puede variar ya sea por las prácticas de cultivo o la forma que lo elaboran [8], [9]. De igual forma,

el afrecho es usado para otros fines como la alimentación animal por su fuente de fibra o incluso en la industria de la celulosa y el papel [10].

El afrecho se podría considerar como fuente de energía renovable por sus propiedades de biomasa residual, de esta manera, la caracterización en laboratorio y aplicación de modelos matemáticos desempeñan un papel importante al permitir comprender y aprovechar el potencial energético. Los modelos matemáticos son herramientas utilizados para estimar la cantidad de energía que se puede obtener de biomasa, contribuyendo así a la transición energética a pequeña escala de las zonas de donde se generan estos residuos [11] [12].

El objetivo del presente trabajo de investigación fue hacer una propuesta de aprovechamiento energético, del residuo orgánico sagú, para el estudio se tuvo en cuenta las características fisicoquímicas del residuo y así mismo se utilizó un modelo matemático, planteado por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), para la determinación del potencial energético del afrecho.

1 MATERIALES Y METODOS

1.1 Materia prima

La muestra de biomasa residual de sagú, se obtuvo de fincas dedicadas a la siembra de la planta Achira en el departamento de Cundinamarca, Colombia, ya que es uno de los principales productores de harina de sagú a nivel nacional. La muestra se trituró para

reducir su tamaño de partícula y luego fue almacenada en bolsas resellables para su conservación.

1.2 Análisis elemental y poder calorífico

Los parámetros y métodos que se tuvieron en cuenta para el análisis elemental y poder calorífico del afrecho de sagú se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros y métodos de medición

Parámetro	Método
Poder Calorífico	ASTM E711-06
Nitrógeno	ASTM D537316
Carbono	ASTM D537316
Azufre	ASTM D537316
Hidrógeno	ASTM D537316

Fuente: Laboratorio de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes

1.3 Porcentaje de Cenizas, Humedad y Sólidos

Los ensayos realizados para determinar el porcentaje de contenido de cenizas, humedad y de sólidos totales, fijos y volátiles se llevaron a cabo en el laboratorio de química de la Universidad Santo Tomás, siguiendo los estándares establecidos por la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales, por sus siglas en inglés ASTM. La determinación de cada parámetro se realizó por gravimetría, en ensayos por triplicado,

utilizando una balanza analítica electrónica y se calculó el promedio con la desviación estándar para cada prueba.

Se determinó el porcentaje de contenido cenizas siguiendo la norma ASTM D3174-12, en esta prueba se aplicó 1,000g de muestra y se utilizó la ecuación (1) para su determinación.

$$\% \text{ de ceniza} = \frac{F-G}{B-G} * 100 \quad (1)$$

Donde: F es la masa del crisol con las cenizas en (g), G es la masa del crisol en (g) y B es la masa del crisol con la muestra seca en (g).

Para el porcentaje de humedad se siguió la norma ASTM D31173-11, en este caso se agregaron 5,00 g de muestra a cada uno de los crisoles y se utilizó la ecuación (2):

$$\% \text{ de humedad} = \frac{(B-A)-(C-A)}{B-A} * 100 \quad (2)$$

Donde: A es la masa del crisol seca en (g), B es la masa del crisol con la muestra húmeda en (g) y C es la masa del crisol con la muestra seca en (g).

Para los sólidos totales, fijos y volátiles se siguió la norma NREL/TP-510-42621, en las pruebas se tuvo en cuenta muestras entre 2,99 a 3,00 g. Para la determinación de sólidos totales se utilizó la ecuación (3):

$$ST = \frac{W \text{ crisol a } 105^{\circ} C - W \text{ crisol vacío}}{W \text{ de la muestra}} * 100 \quad (3)$$

Donde: ST son sólidos totales, $W \text{ crisol a } 105^{\circ} C$ es el peso de los crisoles con muestra después de ser expuestos a dicha temperatura, $W \text{ crisol vacío}$ es el peso de los crisoles a temperatura ambiente y $W \text{ de la muestra}$ es el peso de la muestra. Los sólidos fijos se determinaron mediante la ecuación (4)

$$SF = \frac{W \text{ crisol a } 550^{\circ} C - W \text{ crisol vacio}}{W \text{ de la muestra}} * 100 \quad (4)$$

Donde: SF son sólidos totales, $W \text{ crisol a } 550^{\circ} C$ es el peso de los crisoles con muestra después de ser expuestos a dicha temperatura, $W \text{ crisol vacio}$ es el peso de los crisoles a temperatura ambiente y $W \text{ de la muestra}$ es el peso de la muestra. Y los sólidos volátiles se calcularon con la ecuación (5):

$$SV = ST - SF \quad (5)$$

Donde: SV son sólidos volátiles, ST sólidos totales y SF sólidos fijos.

1.4 Determinación de aprovechamiento energético del afrecho de sagú

La propuesta de aprovechamiento energético del afrecho de sagú se realizó comparando las tecnologías de procesos termoquímicos y bioquímicos, esto se ejecutó a partir de una búsqueda bibliográfica. Se tuvieron en cuenta, cuatro tecnologías para analizar su viabilidad respecto a la caracterización del afrecho, las cuales son: gasificación, combustión directa, digestión anaerobia y compostaje.

1.5 Modelo matemático de evaluación de potencial energético

El potencial energético del afrecho de sagú se estimó por medio de un modelo matemático propuesto por la UPME para biomasas residuales del sector agrícola. El modelo utilizado tiene la siguiente forma (ecuación (6)) [13]:

$$PE = (M_{rs}) * (E) \quad (6)$$

Donde: PE es el potencial energético en (TJ/año), M_{rs} es la masa del residuo seco en (t/año) y E es la energía del residuo por unidad de masa en (TJ/t). La variable de la masa del residuo seco se calculó usando la ecuación (7) [13].

$$M_{rs} = A * R_c * M_{rg} * Y_{rs} \quad (7)$$

Donde: A es el área cultivada en (ha/año), R_c es el rendimiento del cultivo en (t producto principal/ha sembrada), M_{rg} es la masa de residuo generada del cultivo (t de residuo/t de producto principal) y Y_{rs} es la fracción de residuo seco en (t residuo seco/ t de residuo húmedo). Para obtener la masa total de residuo seco se hizo uso de la ecuación (8) esto para cultivo energético [13].

$$M_{rs} = \alpha * A * R_c * \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m M_{rgki} * Y_{rski} \quad (8)$$

Donde: α es la constante de la conversión de unidades igual a $1 * 10^{-6}$. De la ecuación (8) el subíndice k referencia la clasificación si la biomasa residual es agrícola y/o de cosecha y el subíndice i son los tipos de biomasa residual, es decir, si es residuo de cosecha puede ser de tipo raquis o vástago, o si el residuo de agroindustrial es de tipo rechazó [13].

El potencial energético de la biomasa residual se obtiene de la ecuación (9) en relación de las ecuaciones (6) y (8), correspondientes al poder energético y a la masa de residuo seco [13].

$$PE_{BRA} = \alpha * A * R_c * \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m M_{rgki} * Y_{rski} * PCI_{ki} \quad (9)$$

Donde: PCI es el poder calorífico inferior del residuo en (TJ/t) [11].

2 RESULTADOS

2.1 Análisis de composición y poder calorífico de la biomasa

La caracterización composicional del afrecho de sagú en base seca es mostrada en la tabla 2. Los valores fueron generados de acuerdo a los métodos de caracterización estandarizados referenciados en la metodología.

Tabla 2. Caracterización del afrecho de sagú

Parámetro	Unidad	Resultado
Poder calorífico	MJ/kg	14,97
Nitrógeno	%	0,45
Carbono	%	37,2
Azufre	%	0,13
Hidrógeno	%	4,09
Humedad	%	6,33 ± 0,73
Cenizas	%	3,68 ± 0,39
Sólidos totales	%	87,57 ± 0,23
Sólidos fijos	%	7,44 ± 0,20
Sólidos volátiles	%	80,12 ± 0,38

Fuente: Elaboración propia

2.2 Aprovechamiento energético de la biomasa

Los datos técnicos para la selección o implementación de las tecnologías para aprovechamiento energético fueron obtenidos de literatura disponible en estudios de instituciones gubernamentales nacionales e internacionales, como la Organización de las

Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Ministerio de Energías de Chile. Estos se compararon con la caracterización del afrecho de sagú, con el propósito de seleccionar la tecnología de mayor aplicabilidad. La comparación se muestra en la tabla 3. En esta, las características técnicas que son cumplidas por el afrecho de sagú son resaltadas en verde, entre tanto, las que no, se resaltan en rojo.

Tabla 3. Tecnologías y datos técnicos

Tecnología	Datos técnicos	Caracterización del afrecho sagú
Gasificación	La humedad debe estar entre 10 y 20 % [14].	6,33%
	Material volátil es lo mismo al porcentaje de material orgánico que puede reaccionar durante el proceso termoquímico [14].	80,12 %
Digestión anaerobia	Relación Carbono-Nitrógeno (C:N) 20 :1 [15].	82,6 : 1
	Sólidos totales 10 - 20 % [15]	87,57%
Compostaje	Humedad debe estar entre un 45 - 60 % [16]	6,33%
	Relación Carbono-Nitrógeno (C:N) 15:1 - 35:1 [16]	82,6 : 1
Combustión directa	Poder calorífico de 12 - 18 MJ/kg [17]	14,97 MJ/kg
	Cenizas entre 3 - 12 % [17]	3,68 %
	Sólidos volátiles entre 72 - 78 % [17]	80,12%

Fuente: Elaboración propia

La tecnología con mayor cumplimiento de parámetros técnicos es la combustión directa, en la que el poder calorífico y las cenizas están en el rango sugerido y los sólidos volátiles tienen un porcentaje mínimo de diferencia del 2,12%.

El uso de las otras tecnologías requerirá de análisis más profundos y posibles aplicaciones en configuraciones con otros residuos que suplan las necesidades y garanticen las condiciones de los procesos termoquímico y bioquímicos, por ejemplo, el déficit de humedad, como en el caso de la gasificación.

2.3 Potencial energético del residuo

Los datos necesarios para el desarrollo del modelo matemático son mostrados en la tabla 4, los cuales fueron obtenidos de bases de datos de entes gubernamentales, estudios institucionales y literatura disponible relacionados al departamento de Cundinamarca.

Tabla 4. Datos de cultivo y producción de sagú en Cundinamarca

Producción [18] (t/año)	Área [18] (ha/año)	Rendimiento [18] (t producto principal/ha sembrada)	Residuo (t residuo/t producto principal)	Masa de residuo [19] (t/año)	Fracción de residuo seco (t residuo seco/ t de residuo húmedo)
2208,80	634,40	3,80	0,75	1656,60	1,06

Fuente: Elaboración propia

Se tuvo en cuenta el poder calorífico ($0,01497 \frac{TJ}{t}$) de la caracterización de la biomasa para poder calcular el potencial energético del afrecho de sagú. Se utilizaron las ecuaciones (6) y (7) mencionadas anteriormente.

$$M_{rs} = 634,4 * 3,8 * 0,75 * 1,06$$

$$M_{rs} = 1916,52 \frac{t}{año}$$

$$PE_{afrecho\ de\ sagú} = 1916,52 * 0,01497 = 28,69 \frac{TJ}{año}$$

3 DISCUSIÓN Y/O ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En los valores obtenidos de la caracterización del afrecho de sagú presentados en la tabla 1, se evidencia que la muestra analizada contiene un porcentaje de humedad del 6,33%, el cual no se encuentra dentro del rango de datos técnicos establecidos en la tabla 3 para este parámetro, de igual manera se puede considerar como un valor ideal en procesos de tecnologías termoquímicas, ofreciendo una alternativa para el uso del residuo en los procesos propios de la producción de la harina del tubérculo [20]. Cuando los métodos de extracción generan afrechos con mayores porcentajes de humedad, el secado natural podría ser implementado, para evitar que el contenido de agua en las biomásas afecte negativamente la eficiencia y el rendimiento de los procesos termoquímicos, lo que a su vez puede afectar la calidad del producto final y la formación de subproductos no deseados [21].

El contenido de sólidos volátiles está relacionado con la velocidad que puede reaccionar el combustible para convertirse en gas, por lo tanto, el afrecho presenta un 80% de peso en relación a este parámetro, favoreciendo las condiciones del proceso de conversión, esto porque proporciona una mayor cantidad de gases y contribuye a la generación de calor [22]. Sin embargo, altos contenidos de sólidos volátiles pueden generar afectaciones a procesos de aprovechamiento energético, dando lugar a problemas de formación de subproductos, reducción de poder calorífico y repercutir en el valor energético total de la biomasa y reducir la eficiencia de la conversión en sistemas de

generación de energía [23]. Esto se puede abordar de varias maneras, una de ellas es mezclar biomásas de mejor calidad, ya que esto ayudará a equilibrar la composición de las materias primas necesarias para los procesos termoquímicos y bioquímicos; otra de ellas es la optimización de parámetros operativos, implicando ajustar y controlar variables claves dentro de un proceso como la velocidad de alimentación para lograr un funcionamiento más efectivo [24].

En cuanto al contenido de cenizas del afrecho de sagú se encuentra como un valor aceptable para que la biomasa sea utilizada como combustible para las tecnologías de aprovechamiento energético, ya que bajos contenidos de cenizas en biomásas residuales facilitan los procesos de conversión bioquímica y termoquímica, garantizando productos de mayor calidad y minimizando la formación de subproductos no deseados [25]. Por lo tanto, bajos contenidos de cenizas en la biomasa son beneficiosos para la combustión directa, ya que mejoran la eficiencia, reducen problemas de operación y mantenimiento, disminuyen las emisiones y contribuyen a una operación más limpia y eficaz del sistema del proceso [26].

El análisis elemental no aporta mayor información sobre la viabilidad de utilizar gasificación o combustión directa, pero están relacionados directamente con los productos de los procesos. La relación C:N es un indicador para procesos de digestión anaerobia y compostaje, por lo tanto, debe haber una relación C:N relativamente estable entre los valores de 20 y 30 partes de carbono por cada parte de nitrógeno [27], el desequilibrio en esta relación es considerada un problema de operación de mantener óptimas condiciones el funcionamiento de dichos procesos, esto porque los microorganismos involucrados requieren el carbono como fuente de energía y del

nitrógeno para el crecimiento y desarrollo de las comunidades; el desequilibrio puede entonces generar productos no deseados, cambiar las condiciones del ambiente y disminuir la producción de los gases con potencial energético [28]. Una posible solución, cuando no se cumple con el parámetro de relación C:N, como es el caso del afrecho de sagú, es implementar mezclas con otras biomásas residuales (vegetales o animales), con el fin de favorecer las condiciones y eficiencias dentro de los procesos [29].

De la tabla 3, se puede inferir que el afrecho de sagú es adecuado para ser utilizado como combustible en procesos de combustión directa, ya que cuenta con las características acordes a los datos técnicos necesarios para su implementación de esta. Además, en comparación de las otras tecnologías es relativamente sencilla de implementar, haciendo que sea mucho más atractiva como fuente de energía confiable que puede proporcionar calor de manera constante, esto porque la combustión directa no requiere equipos adicionales como gasificadores, es decir, es fácil de operar, por lo tanto, su inversión inicial y de mantenimiento será menor [30]. En Colombia, se puede aprovechar en mayor medida el potencial bioenergético de biomásas con contenidos inferiores del 50% de humedad en procesos de combustión directa, es por eso que puede verse como una posible propuesta para reemplazar combustibles convencionales como gas natural y carbón en la generación de energía [31].

La combustión directa como proceso termoquímico también produce impactos ambientales como emisiones de gases de efecto invernadero, uso de recursos naturales y los subproductos generados como la escoria y cenizas volantes [32]. Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), en Colombia este proceso contribuye a las emisiones generadas por el sector de la energía como fugitivas con un

valor de 7,8 MTon de dióxido de carbono (CO_2) [33]. Para ello, existen formas de mitigar estos impactos utilizando sistemas de filtración de partículas y control de emisiones para reducir los contaminantes, aunque sus costos deberán considerarse dentro de las propuestas técnicas para la implementación de sistemas térmicos en la producción de la harina de sagú. Por otra parte, los subproductos son utilizados en diversas aplicaciones como la fabricación de materiales de construcción o en remediación ambiental, dándole un enfoque de economía circular y la valorización de residuos que, pueden mejorar la sostenibilidad y eficiencia de los procesos de combustión directa [34].

El potencial energético del afrecho de sagú es de $28,69 \frac{TJ}{año}$, es decir, $7,97 \frac{Gwh}{año}$ siendo inferior a otras biomasas residuales presentes en el departamento de Cundinamarca, como el bagazo de caña que tiene un potencial energético de $2646 \frac{Gwh}{año}$ [35], esto debido a que la achira es un cultivo anual, haciendo que la extracción de almidón utilizado para la producción de harina de sagú sea mínima, por lo tanto el afrecho no se genera en las mismas cantidades que otras biomasas residuales. El calor generado por la combustión directa a partir de la alimentación de la biomasa como materia prima se puede utilizar dentro del proceso de secado del almidón para la producción de la harina de sagú, esto con el fin de ayudar económicamente a los pequeños empresarios de la región dedicados a esta actividad.

4 CONCLUSIONES

Por medio de los resultados generados se pudo dar una propuesta de aprovechamiento de tipo energético utilizando como biomasa el afrecho de sagú; en este caso, la

tecnología más acorde a implementar es la combustión directa, ya que, al realizar y analizar los respectivos resultados de laboratorio, el afrecho cumple con las características apropiadas como es el poder calorífico y cenizas, las cuales se encuentran dentro de los rangos establecidos para llevar a cabo este tipo de tecnología. La combustión directa es una fuente de energía confiable que puede proporcionar calor y electricidad de manera constante y predecible, además económicamente es viable para poder implementar y es capaz de mejorar la eficiencia energética en comparación con otros sistemas de combustión.

El afrecho de sagú posee un potencial energético relativamente bajo, lo cual indica que no es posible generar altas cantidades de energía eléctrica, en este caso no se contempla reemplazar los combustibles fósiles para la generación de esta a gran escala, sino la implementación de la transferencia de calor a partir de la combustión directa en la línea de producción de harina de sagú.

Este trabajo, genera un aporte al estudio del aprovechamiento energético de las biomásas residuales generadas en procesos agroindustriales en el departamento de Cundinamarca, donde se encuentran residuos sin el manejo adecuado como el afrecho de sagú que por sus características composicionales es capaz brindar una ayuda a las comunidades rurales dándoles oportunidades técnicas y contribuir transición energética a pequeña escala.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo a la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Santo Tomás, así como a la convocatoria para el fomento de la investigación, creación e innovación Tomasina FODEIN, al grupo de investigación INAM-USTA y al macroproyecto “Evaluación de la viabilidad de integración de residuos agroindustriales lignocelulósicos en mezclas de residuos poliméricos a través de vigilancia tecnológica, caracterización fisicomecánica y análisis ambiental”.

REFERENCIAS

- [1] A. Vargas y L. Perez, “Revista Facultad de Ciencias Básicas use of agro-industrial waste in improving the quality of the environment”, vol. 14, no. 1, pp. 59–72, 2018, doi: 10.18359/rfcb.xxxx.
- [2] J. Pardo, Análisis de proyectos de aprovechamiento de residuos sólidos bajo el esquema de asociación público privada en Colombia. Caso de estudio: Nuevo esquema de aseo de Bogotá, 2014
- [3] S. Jiménez, “Combustión de biomasa.”
- [4] Unidad de Planeación Minero Energética UPME “Biomasa, fuente renovable de energía”.
- [5] E. Campos y X. Flota, “Procesos biológicos: La digestión anaerobia y el compostaje,” 2012, vol 1, p. 618
- [6] Gobernación de Cundinamarca , “ Estadísticas agropecuarias, Vol 28 “ 2018.

- [7] G. Rodríguez, H. García, J. Camacho y F. Arias, “Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. El Almidón de Achira o Sagú (*Canna edulis*, Ker).”, 2003.
- [8] Y. Bohórquez, M. Garzón, Iv. Pérez LeaL, S. Vasquez, y J. Vargas, “Characterization and potential use of the achira root (*Canna Edulis* Ker),” *Vía Innova*, vol. 4, no. 1, pp. 89–97, doi: 10.23850/2422068X.1184.
- [9] AGROSAVIA TV. Recomendaciones tecnológicas para el cultivo de achira o sagú y la extracción de su almidón. (6 de enero de 2021). Accedido el 14 de julio de 2023. [Video en línea]. Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=DIwwIM6LXEk>
- [10] L. Muñoz, “estudio económico preliminar de una planta para la producción de jarabe con alto contenido de maltosa a partir de sagú”, 2005.
- [11] M. A. Gonzalez-Salazar et al., “Methodology for estimating biomass energy potential and its application to Colombia,” *Appl Energy*, vol. 136, pp. 781–796, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.07.004.
- [12] J. M. Vargas-Moreno, A. J. Callejón-Ferre, J. Pérez-Alonso, and B. Velázquez-Martí, “A review of the mathematical models for predicting the heating value of biomass materials,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 5. pp. 3065–3083, Jun. 2012. doi: 10.1016/j.rser.2012.02.054.
- [13] Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia, “Modelos matemáticos para evaluar el potencial energético de la biomasa residual”.
- [14] BESEL, S.A. Departamento de Energía, “Energías renovables Biomasa Gasificación.”

- [15] MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, "Manual de biogás," 2011.
- [16] P. Román, M. M. Martínez, and A. Pantoja, "Manual de compostaje del agricultor experiencias en América Latina", Accessed: Jul. 12, 2023.
- [17] J. E. Carrasco García, "COMBUSTIÓN DIRECTA DE LA BIOMASA".
- [18] Gobernación de Cundinamarca, "Evaluaciones agropecuarias del departamento de Cundinamarca estadísticas de cultivos año 2021".
- [19] M. Rivier, M. A. Moreno, F. Alarcón, R. Ruiz, y D. Dufour, "Morfología de la planta y características de rendimiento y calidad de almidón de sagú," p. 251 p., 2001, Accessed: Jul. 12, 2023.
- [20] "Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites - Google Libros." (accessed Jul. 12, 2023).
- [21] X. Isern. "La humedad en la biomasa: herramientas de medida y control"
- [22] P. Prakash y K. N. Sheeba, "Prediction of pyrolysis and gasification characteristics of different biomass from their physico-chemical properties," vol. 38, no. 11, pp. 1530–1536, Jun. 2016, doi: 10.1080/15567036.2014.953713.
- [23] W. J. Oosterkamp, «Use of Volatile Solids from Biomass for Energy Production», en Bioenergy Research: Advances and Applications, Elsevier Inc., 2014, pp. 203-217. doi: 10.1016/B978-0-444-59561-4.00013-9.
- [24] K. M. Rahman, M. K. Harder, y R. Woodard, "Energy yield potentials from the anaerobic digestion of common animal manure in Bangladesh".

- [25] K. L. Kenney, W. A. Smith, G. L. Gresham, y T. L. Westover, "Understanding biomass feedstock variability," vol. 4, no. 1, pp. 111–127, Jan. 2014, doi: 10.4155/BFS.12.83
- [26] R. P. Overend, "renewable energy sources charged with energy from the sun and originated from earth-moon interaction-vol. i-direct combustion of biomass-direct combustion of biomass".
- [27] M. Ávila, R. Campos, L. Brenes, F. Jimenes, "Generación de biogás a partir del aprovechamiento de residuos sólidos biodegradables en el Tecnológico de Costa Rica, sede Cartago Biogas," *Tecnología en Marcha*, vol. 31, no. 2, pp. 159–170, 2018, doi: 10.18845/tm.v31i2.3633.
- [28] J. Mosquera, L. Varela, A. Santis, S. Villamizar, P. Acevedo, y I. Cabeza, "Improving anaerobic co-digestion of different residual biomass sources readily available in Colombia by process parameters optimization," *Biomass Bioenergy*, vol. 142, p. 105790, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.BIOMBIOE.2020.105790.
- [29] L. Gutierrez, L. Ochoa, "Determinación del potencial energético para la producción de biogás.", 2019.
- [30] M. Valix, S. Katyal, and W. H. Cheung, "Combustion of thermochemically torrefied sugar cane bagasse," *Bioresour Technol*, vol. 223, pp. 202–209, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2016.10.053.
- [31] A. Sagastume Gutiérrez, J. J. Cabello Eras, L. Hens, y C. Vandecasteele, "The energy potential of agriculture, agroindustrial, livestock, and slaughterhouse biomass

wastes through direct combustion and anaerobic digestion. The case of Colombia,” *J Clean Prod*, vol. 269, p. 122317, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.122317.

[32] M. Mandø, «Direct combustion of biomass», en *Biomass Combustion Science, Technology and Engineering*, Elsevier Inc., 2013, pp. 61-83. doi: 10.1533/9780857097439.2.61.

[33] IDEAM, “Inventario nacional y departamental de gases efecto invernadero-Colombia”.

[34] S. Xu, C. Zhou, H. Fang, W. Zhu, J. Shi, y G. Liu, “Characteristics of trace elements and potential environmental risks of the ash from agricultural straw direct combustion biomass power plant,” *Chemosphere*, vol. 333, p. 138989, Aug. 2023, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2023.138989.

[35] C. Serrato y V. Lesmes, “Metodología para el cálculo de energía extraída a partir de la biomasa en el departamento de Cundinamarca ”, 2016.