

Evaluación de alternativas energéticas sostenibles por medio del aprovechamiento del tallo de la palma aceitera en procesos de gasificación y pirólisis

María Camila Martínez Muñoz, Jorge Andrés Vides Quintero

Trabajo de grado para optar al título de ingenieros mecánicos

Director

PhD. Yesid Javier Rueda Ordóñez

Codirector

Pablo Antonio Nieto Rangel

Ingeniero Mecánico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

### **Agradecimientos**

Para la realización de este proyecto, hemos tenido el privilegio de contar con el apoyo y la colaboración de diversas personas, a quienes queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento.

En primer lugar, agradecemos a nuestro director de proyecto, el Dr. Yesid Rueda, por su invaluable apoyo en el inicio de este camino hacia la investigación, su tiempo, paciencia y orientación, así como por la gestión de los recursos necesarios para el desarrollo del proyecto y nuestro crecimiento académico.

Asimismo, extendemos nuestro agradecimiento al Ing. Pablo Nieto, nuestro codirector, por su acompañamiento, orientación y dedicación para impulsar este proyecto.

De igual manera, agradecemos al Ing. Edinson Lizarazo por su orientación, enseñanzas, disposición y constante colaboración en el desarrollo de esta investigación.

Expresamos también nuestra gratitud al Centro de Investigación de la Palma Aceitera (CENIPALMA) por el suministro del tallo de la palma y por el préstamo de los servicios necesarios para su caracterización.

Finalmente, a nuestras familias y amigos, por su apoyo incondicional, comprensión y amor a lo largo de este proceso de investigación. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

**Tabla de contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	11
1. Objetivos .....	13
1.1 Objetivo general .....	13
1.2 Objetivos específicos .....	13
2. Marco teórico .....	14
2.1 Biomasa.....	14
2.1.2 Biomasa lignocelulósica .....	15
2.2 Poder calorífico .....	15
2.3 Termogravimetría .....	16
2.4 Descomposición térmica de biomosas .....	17
2.5 Análisis próximo .....	18
2.6 Análisis elemental.....	18
2.7 Proceso de pirólisis lenta .....	20
2.8 Proceso de gasificación.....	20
2.9 Biocarbón.....	22
3. Metodología .....	23
3.1 Selección y clasificación de la biomasa.....	23
3.2 Análisis elemental.....	24
3.3 Análisis próximo.....	24

EVALUACIÓN ENERGÉTICA A PARTIR DEL TALLO DE LA PALMA	4
3.3.1 Determinación del contenido de humedad.....	25
3.3.2 Determinación del Contenido de Cenizas.....	25
3.3.3 Determinación del Contenido de Materia Volátil.....	26
3.3.4 Determinación del Contenido de Carbono Fijo.....	27
3.4 Análisis de poder calorífico.....	27
3.5 Termogravimetría.....	28
3.6 Preparación de la muestra.....	29
3.6.1 Preparación proceso gasificación.....	29
3.7 Diseño de experimentos: Pirólisis.....	30
3.7.1 Caracterización del bioaceite.....	33
3.8 Gasificación.....	34
3.8.1 Pruebas preliminares.....	34
3.8.2 Diseño de experimentos.....	36
3.9 Caracterización de los biocarbones.....	40
4. Resultados y discusión.....	41
4.1 Análisis elemental de la biomasa.....	41
4.2 Análisis próximo de la biomasa.....	43
4.2.1 Determinación del contenido de humedad.....	43
4.2.2 Determinación del contenido de cenizas.....	44
4.2.3 Determinación del contenido de materia volátil.....	45

EVALUACIÓN ENERGÉTICA A PARTIR DEL TALLO DE LA PALMA	5
4.2.4 Contenido de carbono fijo.....	46
4.3 Poder calorífico de la biomasa.....	46
4.4 Termogravimetría (TGA).....	47
4.5 Pirólisis .....	50
4.5.1 Pruebas preliminares .....	50
4.5.2 Pruebas finales de pirólisis.....	53
4.5.3 Caracterización de la fracción líquida.....	57
4.5 Gasificación .....	58
4.5.1 Pruebas preliminares .....	58
4.5.2 Pruebas finales de gasificación .....	60
4.6 Caracterización de los biocarbones.....	63
4.6.1 Análisis elemental.....	63
4.6.2 Análisis próximo.....	65
4.6.3 Poder calorífico.....	68
4.7 Clasificación de biocarbones .....	69
4.7.1 Clasificación de biocarbones por rango.....	70
4.7.2 Relación H/C.....	72
5. Conclusiones.....	73
6. Recomendaciones .....	75
Referencias bibliográficas.....	77
Apéndices.....	87

**Tabla de tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Niveles de parámetros de las pruebas finales</i> .....	36
Tabla 2 <i>Resultados del análisis elemental para el residuo del tallo de la palma aceitera</i> .....	41
Tabla 3 <i>Resumen de datos de la prueba de humedad</i> .....	43
Tabla 4 <i>Resumen de datos de la prueba de cenizas</i> .....	44
Tabla 5 <i>Resumen de datos de la prueba de contenido de materia volátil</i> .....	45
Tabla 6 <i>Poderes caloríficos superiores de algunas biomásas de referencia</i> .....	47
Tabla 7 <i>Pruebas preliminares de pirólisis</i> .....	51
Tabla 8 <i>Pruebas finales de pirólisis</i> .....	54
Tabla 9 <i>Duplicado de las pruebas de pirólisis</i> .....	54
Tabla 10 <i>Viscosidades de algunos líquidos de referencia</i> .....	57
Tabla 11 <i>Parámetros de pruebas preliminares de gasificación</i> .....	58
Tabla 12 <i>Parámetros de pruebas finales de gasificación</i> .....	60
Tabla 13 <i>Resultados de pruebas finales de gasificación</i> .....	62
Tabla 14 <i>Resultados del análisis elemental de los biocarbones de pirólisis y gasificación</i> .....	63
Tabla 15 <i>Resultados del análisis próximo de los biocarbones de pirólisis y gasificación</i> .....	66
Tabla 17 <i>Resumen clasificación de biocarbones</i> .....	70
Tabla 18 <i>Clasificación de carbones por rango</i> .....	70

**Tabla de figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Clasificación de la biomasa</i> .....	15
Figura 2 <i>Partes de la palma de aceite africana</i> .....	23
Figura 3 <i>Calorímetro 6200 Parr</i> .....	28
Figura 4 <i>Esquema de la preparación de la biomasa para el proceso de pirólisis</i> .....	30
Figura 5 <i>Esquema de reactor de pirólisis laboratorio de combustión UIS</i> .....	31
Figura 6 <i>Esquema metodológico de las pruebas finales de pirólisis</i> .....	32
Figura 7 <i>Tarros ámbar para bioaceite</i> .....	34
Figura 8 <i>Esquema del reactor de gasificación y sus componentes</i> .....	35
Figura 9 <i>Esquema metodológico de las pruebas finales de gasificación</i> .....	38
Figura 10 <i>Termogravimetrías del tallo de palma: a) 10 K/min; b) 20 K/min; c) 30 K/min</i> .....	47
Figura 11 <i>Termogravimetrías del raquis de palma y bagazo de caña</i> .....	48
Figura 12 <i>Termogravimetría del cuesco de palma</i> .....	49
Figura 13 <i>Fracción sólida de la prueba preliminar 1</i> .....	51
Figura 14 <i>Biocarbón completamente pirolizado</i> .....	52
Figura 15 <i>Influencia de la temperatura en la producción de biocarbón</i> .....	55
Figura 16 <i>Influencia de la tasa de calentamiento en el rendimiento de biocarbón</i> .....	55
Figura 17 <i>Esquema de la ubicación de la antorcha en el equipo de gasificación</i> .....	60

**Lista de apéndices**

	<b>Pág.</b>
<b>Apéndice A.</b> Bitácora de análisis próximo de biocarbones.....	87
<b>Apéndice B.</b> <i>Bitácora de pruebas de pirólisis</i> .....	89
<b>Apéndice C.</b> <i>Registro fotográfico del equipo y los implementos utilizados para las pruebas de pirólisis</i> .....	91
<b>Apéndice D.</b> <i>Registro fotográfico del sistema utilizado para gasificación</i> .....	93
<b>Apéndice E.</b> <i>Resultados enviados por el grupo QUIREMA de los diferentes análisis</i> .....	94
<b>Apéndice F.</b> Reporte de prueba de viscosidad .....	96

## Resumen

**Título:** Evaluación de alternativas energéticas sostenibles por medio del aprovechamiento del tallo de la palma aceitera en procesos de gasificación y pirólisis\*

**Autor (es):** María Camila Martínez Muñoz, Jorge Andrés Vides Quintero\*\*

**Palabras clave:** biocarbón, pirólisis lenta, gasificación, densidad energética.

**Descripción:** La palma aceitera (*Elaeis guineensis*) es uno de los principales cultivos en Colombia, posicionando al país como el cuarto productor mundial de aceite de palma y el primero en Latinoamérica. Su etapa productiva tiene una duración aproximada de 30 años y finaliza debido a las limitaciones impuestas por su altura. Una vez que la palma supera los 20 metros, debe ser cortada y retirada, ya que la maquinaria disponible no puede operar a esa distancia. Este proceso genera aproximadamente 240 kg de residuos agroindustriales por tonelada cosechada, siendo el tallo gran parte de estos desechos. Ante esta abundante oferta de materia prima, su tratamiento para la producción de biocarbón se presenta como una alternativa viable. Este estudio se centra en la valoración del biocarbón producido mediante pirólisis lenta y gasificación, comparando su composición, densidad energética y cantidad. Para alcanzar los objetivos propuestos, se realizó inicialmente una caracterización fisicoquímica de la biomasa. Posteriormente, se llevaron a cabo los procesos de pirólisis lenta y gasificación, priorizando el análisis de los productos sólidos generados. Los rendimientos obtenidos fueron similares, con valores de 49,92 % para gasificación y 50,27 % para pirólisis lenta. Sin embargo, un análisis detallado de la composición mediante análisis próximo y elemental, así como la evaluación de la densidad energética, reveló diferencias significativas entre los biocarbones. El biocarbón generado por gasificación presentó un mayor valor energético, posicionándose como la alternativa más viable desde el punto de vista energético. No obstante, este valor no es homogéneo en toda la fracción sólida. En contraste, el biocarbón producido mediante pirólisis lenta mostró una composición uniforme en toda la fracción sólida, lo que lo convierte en una opción más adecuada en términos de cantidad y eficiencia para la producción de biocarbón.

---

\* Trabajo de Grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Ingeniería Mecánica. Director: Yesid Javier Rueda Ordóñez. Ingeniero Mecánico, PhD. Codirector: Pablo Antonio Nieto Rangel. Ingeniero Mecánico.

**Abstract**

**Title:** Evaluation of sustainable energy alternatives through the utilization of oil palm stems in gasification and pyrolysis processes\*

**Author (s):** María Camila Martínez Muñoz, Jorge Andrés Vides Quintero\*\*

**Key words:** biochar, slow pyrolysis, gasification, energy density.

**Description:** The oil palm (*Elaeis guineensis*) is one of the main crops in Colombia, positioning the country as the fourth-largest producer of palm oil worldwide and the leading producer in Latin America. Its productive stage lasts approximately 30 years and ends due to height limitations. Once the palm exceeds 20 meters in height, it must be cut and removed, as the available machinery cannot operate at such heights. This process generates approximately 240 kg of agro-industrial residues per harvested ton, with the stem comprising a significant portion of this waste. Given this abundant supply of raw material, its processing for biochar production emerges as a viable alternative. In this regard, this study focuses on evaluating biochar produced through slow pyrolysis and gasification, comparing its composition, energy density, and quantity. To achieve the proposed objectives, a physicochemical characterization of the biomass was initially conducted. Subsequently, slow pyrolysis and gasification processes were carried out, prioritizing the analysis of the solid products generated. The yields obtained were similar, with values of 49.92% for gasification and 50.27% for slow pyrolysis. However, a detailed analysis of the composition using proximate and elemental analysis, as well as the evaluation of energy density, revealed significant differences between the biochars. The biochar generated through gasification exhibited a higher energy value, positioning it as the most viable alternative from an energy perspective. Nevertheless, this value is not homogeneous throughout the solid fraction. In contrast, the biochar produced via slow pyrolysis demonstrated a uniform composition across the entire solid fraction, making it a more suitable option in terms of quantity and efficiency for biochar production.

---

\* Trabajo de Grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Ingeniería Mecánica. Director: Yesid Javier Rueda Ordóñez. Ingeniero Mecánico, PhD. Codirector: Pablo Antonio Nieto Rangel. Ingeniero Mecánico.

## Introducción

La agricultura es una práctica que ha usado la humanidad para su propia supervivencia, puesto que con ella se ha podido conseguir alimento de manera segura y sustentable. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO (s.f.), la cantidad de tierra usada para esta actividad en el mundo está alrededor de los 5 mil millones de hectáreas siendo esto más de un tercio de la superficie terrestre del planeta las cuales son actualmente demandadas gracias al modelo económico global actual.

Dentro del uso de estas tierras una cantidad se destina para plantaciones fijas como lo son la palma de aceite, el cacao y el café que ocupan 190 millones de hectáreas (FAO, s.f.). Con los datos recolectados por Ritchie, H. y Roser, M. (2024), para el año 2022 en el mundo aproximadamente 30 millones de éstas son usadas para la producción de aceite de palma y en el caso de Colombia la cifra ronda por las 487 mil hectáreas en el mismo periodo; posicionándose, así, como el cuarto país de mayor producción a nivel mundial de este producto.

En términos de cantidad de palma de aceite africana la organización Producción Agrícola Mundial (2023) realizó la estimación del periodo 2022-2023 encontrando una producción alrededor de los 77,6 millones de toneladas. Además, se estima que para el periodo siguiente ocurriría un aumento de 1,89 millones de toneladas en su producción.

En cuanto a la producción nacional, en Colombia, la palma de aceite africana es el cultivo número uno haciendo presencia en 161 municipios, repartiéndose estos en 21 de los 32 departamentos del país (Fedepalma, 2024). Ante la alta producción y ocupación de tierra que tiene este cultivo en el país, se presenta una situación con este proceso agrícola y es que como cualquier proceso productivo se generan unos residuos de diferentes partes de la palma que normalmente en la ruralidad son raramente aprovechados más allá de un abono o quema directa.

La cantidad de residuos generado por la producción de aceite a partir de la palma fue estimada por Cortés, et al. (2006) y se encontró que por cada tonelada de racimos de frutos frescos se producía 20 kg de lodo de lechos secados, 220 kg de racimos vacíos y de 0,8 a 1 m<sup>3</sup> de efluente líquido el cual le sirve como abono. La problemática surge cuando la palma se hace demasiado alta para la maquinaria disponible, pues cuando se pasan los 20 m de altura, las palmas son generalmente cortadas y desechadas. También Elbersen (2013), encontró que al procesar todos los residuos de la palma se logra disminuir, frente a métodos convencionales, hasta en 8 toneladas las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y a la vez colabora en hacer más sostenible su producción.

En síntesis, es claro que hay una gran cantidad de biomasa desaprovechada y que existen otros procesos que generan valor y pueden ayudar a la disminución de la acumulación de residuos contaminantes al ambiente. Por lo que, en este proyecto se busca aprovechar los residuos de la palma, haciendo uso específico del estípote, para poder producir combustible al someter esta biomasa a dos procesos independientes, una primera muestra se someterá al proceso de pirólisis lenta, y una segunda muestra, al proceso de gasificación, con el fin de evaluar las propiedades de los productos sólidos (biocarbón) de cada uno de los procesos y determinar cuál es el mejor entre estos.

Como resultado, se logró aprovechar el tallo de palma, previamente sin utilidad energética, agregando valor a la cadena de producción de este cultivo. Este aprovechamiento permite utilizar todas las partes de la planta, reduciendo su impacto ambiental. Además, se obtuvo un combustible viable, ya sea para procesos alternativos o para su comercialización, lo que fortalece el mercado agrícola y beneficia a los productores palmeros al reintegrar estos productos en el ciclo productivo agrícola.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Evaluar la composición, densidad energética y cantidad de la fracción sólida obtenida a través de los procesos de gasificación y pirólisis del tallo de la palma aceitera, identificando cuál de estas alternativas energéticas sostenibles es más eficiente y viable para la generación de biocarbón.

### **1.2 Objetivos específicos**

Determinar la composición del tallo residual de la palma aceitera con el fin de conocer sus propiedades fisicoquímicas haciendo uso de los métodos de análisis próximo y análisis último.

Evaluar la composición, cantidad y densidad energética del producto sólido generado en el proceso de pirólisis lenta y gasificación del tallo residual de la palma aceitera, así como determinar la cantidad, viscosidad y densidad del producto líquido obtenido en el proceso de pirólisis lenta.

Comparar los productos sólidos obtenidos en términos de composición, densidad energética y cantidad entre los procesos de gasificación y pirólisis lenta del tallo residual de la palma aceite africana.

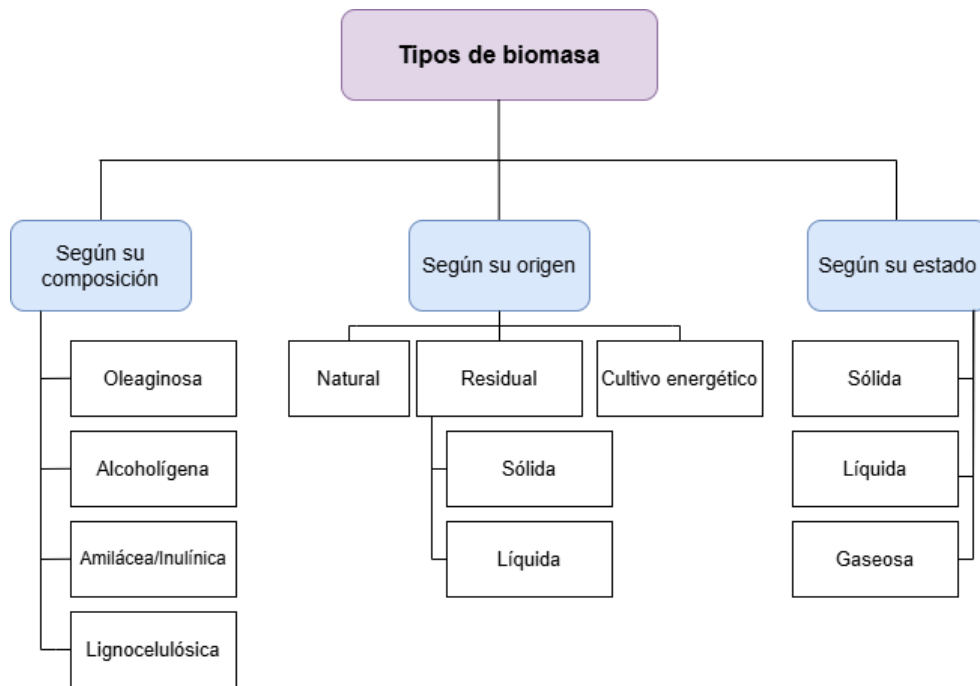
## **2. Marco teórico**

Esta sección tiene como propósito presentar conceptos y teorías fundamentales relacionadas con los procesos de gasificación y pirólisis aplicados al tallo de la palma aceitera. El objetivo es proporcionar las herramientas conceptuales necesarias para comprender los fundamentos científicos que sustentan la evaluación de la fracción sólida obtenida en estos procesos técnicos, así como su relevancia en el desarrollo de alternativas energéticas sostenibles.

### **2.1 Biomasa**

La biomasa se refiere a cualquier material que forme parte o haya formado parte de un organismo vivo. En el ámbito de la energía renovable, este término suele aplicarse específicamente a materiales de origen vegetal, como residuos agrícolas, subproductos industriales (por ejemplo, aserrín y bagazo de caña) y cultivos diseñados para la producción de energía, como el sorgo y ciertas gramíneas. Estos materiales desempeñan un papel crucial en los procesos de conversión energética, contribuyendo a la generación de combustibles sostenibles y otras fuentes de energía renovable. La biomasa puede clasificarse según su composición, origen y estado, como se muestra en la. (Hames, 2009).

La energía contenida en la biomasa proviene del sol. A través de la fotosíntesis, las plantas capturan la energía solar, absorben agua del suelo y CO<sub>2</sub> de la atmósfera, transformándolos en compuestos orgánicos que almacenan energía, mientras liberan oxígeno como subproducto. Posteriormente, los animales aprovechan y modifican esta energía al consumir las plantas, lo que hace que los residuos generados durante esta transformación también sean aprovechables como fuente de energía (de-Lucas et al., 2012).

**Figura 1***Clasificación de la biomasa*

### 2.1.2 Biomasa lignocelulósica

La biomasa lignocelulósica corresponde a un material derivado de plantas, compuesto mayormente por celulosa, hemicelulosa y lignina, elementos esenciales en la estructura de la pared celular de las plantas. Este recurso renovable destaca por su potencial en la producción de energía, biocombustibles y compuestos químicos de alto valor. Ejemplos frecuentes incluyen el cuesco de palma de aceite, el bagazo de caña de azúcar, que se genera en grandes cantidades en áreas agrícolas como el Valle del Cauca, y la paja de trigo, un residuo común en zonas dedicadas al cultivo de cereales (Afanasjeva et al., 2017).

### 2.2 Poder calorífico

El poder calorífico es una propiedad que cuantifica la energía liberada por unidad de masa o volumen de una sustancia cuando se somete a un proceso de combustión. Esta característica es

fundamental para caracterizar combustibles, ya que un mayor poder calorífico implica que se requiere una menor cantidad de combustible para realizar una tarea específica (Vaillant, s. f.).

De acuerdo con Primagas (s. f.), el poder calorífico representa la energía liberada durante el proceso de oxidación del combustible. Esta propiedad puede clasificarse en **poder calorífico inferior (PCI)** y **poder calorífico superior (PCS)**. El PCI no incluye el calor asociado a la condensación del vapor de agua generado durante la combustión, mientras que el PCS considera esta energía adicional, ya que incorpora el calor liberado por la condensación del agua producida en el proceso. Cabe destacar que el PCS también es conocido como **poder calorífico neto** debido a su consideración integral de la energía generada.

Esta distinción entre PCI y PCS permite una evaluación más precisa de la eficiencia y la aplicabilidad de diferentes combustibles según sus contextos de uso.

Algunos estándares para poder hacer la correcta medición de esta propiedad pueden ser la ASTM D5865 “Método estándar para determinar el poder calorífico del carbón y el coque utilizando un calorímetro de bomba.” Y la norma ASTM E711 “Norma utilizada para combustibles de biomasa, enfocándose en métodos calorimétricos para determinar el PCS.”

### **2.3 Termogravimetría**

La termogravimetría es una técnica analítica que permite medir la variación de masa de una sustancia en función del tiempo o de la temperatura, bajo condiciones controladas. Este proceso se lleva a cabo en atmósferas específicas, como aire, gases inertes u oxígeno, y la muestra puede someterse a incrementos o decrementos de temperatura. Los cambios de masa se representan generalmente en miligramos o en porcentajes, proporcionando datos precisos sobre el comportamiento del material. (Técnica Análisis Térmico / Termogravimetría (ATD, TG y DSC) (CAI Ciencias de la Tierra y Arqueometría), s. f.).

El objetivo principal de la termogravimetría es identificar las características químicas y físicas de un material, como su composición y naturaleza. Esta técnica es ampliamente aplicada en diversas áreas, incluyendo el estudio de polímeros, metales y materiales cerámicos, entre otros, lo que la convierte en una herramienta fundamental para la caracterización y análisis de materiales. (Mettler-Toledo International Inc, 2022).

La normativa para este procedimiento está condensada en la ASTM E1131 que es un método para conocer la composición de materiales por termogravimetría, la ASTM D7582 que es una norma específica para carbones y la ASTM D4326 que se utiliza para el estudio de cenizas en combustibles sólidos.

#### **2.4 Descomposición térmica de biomásas**

Según Temarium (2023), la descomposición térmica es un proceso químico donde la muestra o el objeto de estudio comienza a reaccionar únicamente mediante la absorción de calor, separándose en sus compuestos más primarios. La temperatura en la que se inicia este proceso se denomina temperatura de descomposición. La principal diferencia entre la descomposición térmica y la combustión radica en la ausencia de oxidación, ya que en la descomposición térmica no hay interacción con el oxígeno, limitándose a los efectos del calor aplicado.

En el caso de la biomasa, procesos como la pirólisis y la gasificación también implican descomposición térmica. Según Klug (2012), la pirólisis es un proceso de descomposición que ocurre en ausencia de oxígeno y es inherente a cualquier tipo de pirólisis, aunque los productos generados varían entre bioaceites, biocarbones y biogases, dependiendo de las condiciones del proceso.

Por otro lado, Orfão et al. (1999) propusieron un modelo cinético para estudiar la descomposición térmica en biomásas, específicamente en muestras de eucalipto y pino. Este

modelo identificó zonas específicas para la descomposición de los principales componentes de la biomasa: celulosa, hemicelulosa y lignina.

Este modelo fue posteriormente validado por Ordóñez y Tannous (2017), quienes estudiaron diferentes tipos de biomasa, incluyendo bagazo de caña, cáscara de arroz, madera de caixeta y hojas de caña. Encontraron que, hasta 150 °C, las muestras perdían su humedad; entre 200 °C y 420 °C, liberaban volátiles; y a temperaturas superiores, ocurría la carbonización, confirmando las zonas térmicas descritas en el modelo inicial. Estos hallazgos permiten comprender mejor los procesos térmicos de la biomasa y su comportamiento en aplicaciones como la producción de biocombustibles.

## **2.5 Análisis próximo**

El análisis próximo es un método ampliamente utilizado para estimar los productos generados al someter materiales a calentamiento bajo condiciones específicas. Este procedimiento se emplea como base para la caracterización de materiales en diversos contextos industriales y consiste en la determinación de parámetros clave como humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo, siguiendo los lineamientos establecidos por la norma ASTM D7582. Adicionalmente, para medir parámetros específicos, se aplicarán las normas ASTM D442-20, E1755-01 y D3175-20, garantizando la precisión en la evaluación de humedad, cenizas y materia volátil (López López, 2018).

## **2.6 Análisis elemental**

El análisis elemental o también llamado análisis último es una técnica que permite determinar la cantidad total de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S) presentes en diversos tipos de muestras, tanto orgánicas como inorgánicas, en estados sólido o líquido. Esta metodología se complementa con otros métodos de análisis estructural, siendo útil para confirmar

fórmulas moleculares de compuestos derivados de procesos de síntesis orgánica e inorgánica. Entre sus principales aplicaciones destacan el análisis de materiales agrícolas, suelos, sedimentos, fármacos, polímeros, alimentos, aceites, productos naturales y el control ambiental, entre otros (universidad nacional autónoma de México [UNAM], s.f).

El procedimiento sigue las directrices de la norma ASTM D5373, diseñada para la determinación de carbono, hidrógeno y nitrógeno en carbón y coque. Este método utiliza un horno especializado que opera a temperaturas de 900 °C a 1050 °C para carbón y de 950 °C a 1150 °C para coque. Durante la combustión de la muestra en una atmósfera rica en oxígeno, los elementos carbono, hidrógeno y nitrógeno se transforman completamente en sus formas gaseosas ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{NO}_x$ , respectivamente). Los productos gaseosos que podrían interferir en el análisis son eliminados, y los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) se convierten en  $\text{N}_2$  antes de la etapa de detección. Finalmente, el dióxido de carbono, el vapor de agua y el nitrógeno elemental en la corriente gaseosa son cuantificados mediante equipos especializados. Este procedimiento es ampliamente utilizado en distintas áreas de investigación y control de calidad.

- Los valores de carbono e hidrógeno pueden utilizarse para determinar la cantidad de oxígeno (aire) requerida en los procesos de combustión, así como para calcular la eficiencia de dichos procesos.
- Las determinaciones de carbono e hidrógeno pueden emplearse en cálculos relacionados con el balance de materiales, la reactividad y los rendimientos de productos en procesos de conversión de carbón, como la gasificación y la licuefacción.
- Los valores de carbono y nitrógeno pueden utilizarse en cálculos de balance de materiales empleados para fines de contabilidad de emisiones.

## 2.7 Proceso de pirólisis lenta

La pirólisis lenta es un proceso de combustión parcial que se realiza sobre una determinada muestra de masa, donde según Vilca et al. (2022) la tasa de calentamiento debe estar entre aproximadamente de  $10\text{-}50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  y las temperaturas de residencia pueden manejarse en un rango de entre  $400\text{ y }800\text{ }^{\circ}\text{C}$  en ausencia de oxígeno. Según Milian et al. (2020) este proceso (pirólisis lenta, flash, rápida) se desarrolla en 3 pasos: el primero consiste en la descomposición de la biomasa en las fracciones sólidas (biocarbón), la fracción líquida (biocombustible) y la fracción gaseosa (syngas); el segundo, ocurre cuando reaccionan las fracciones gaseosas y líquidas y finalmente, el tercero es la reacción entre el sólido y el gas para terminar de darle las propiedades tras el proceso.

En el trabajo realizado por Romero et al. (2016), se realizó el proceso de pirólisis con biomasa de cuesco de palma, para ello utilizaron un reactor de lecho fijo de laboratorio, usando rangos de temperatura para la pirólisis entre  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  y analizaron el contenido energético de los productos sólidos y gaseosos. Los resultados arrojaron que los carbones obtenidos en el proceso de pirólisis lenta tienen un alto valor energético, para la temperatura de  $500^{\circ}\text{C}$  se obtuvo un carbón de  $31,14\text{ MJ/Kg}$  siendo así el  $73\%$  de energía presente en la biomasa con un rendimiento en peso del  $50\%$ .

## 2.8 Proceso de gasificación

La gasificación es un proceso termoquímico que convierte la biomasa sólida en un gas combustible mediante la aplicación de altas temperaturas en presencia de un agente gasificante, como aire, oxígeno o vapor de agua, entre otros. La calidad del gas producido depende directamente del agente empleado: el uso de aire genera un gas de menor calidad, mientras que el

oxígeno produce un gas de alta calidad con un poder calorífico superior (Proyecto para promover la energía derivada de biomasa [PROBIOMASA], s.f.).

El proceso de gasificación de biomasa se desarrolla en cuatro etapas principales: secado, pirólisis, combustión y gasificación. Durante el secado, el contenido de humedad de la biomasa se elimina mediante la aplicación de calor, alcanzando temperaturas de 100-150 °C, lo que reduce su peso y facilita las etapas posteriores. En la pirólisis, que ocurre entre 200-600 °C, la biomasa se descompone térmicamente en ausencia de oxígeno, produciendo gases volátiles, bioaceite y un residuo sólido carbonoso. La etapa de combustión sigue con la oxidación parcial de una fracción de la biomasa en presencia limitada de oxígeno, generando calor para mantener el proceso y produciendo dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Por último, en la gasificación, el carbón restante y los volátiles reaccionan con agentes gasificantes como aire, oxígeno o vapor de agua, transformándose en un gas combustible compuesto por monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) y metano ( $\text{CH}_4$ ). Este conjunto de etapas, tal como lo describe Roddy (2012), permite aprovechar eficientemente la biomasa para producir energía en forma de gas combustible, destacando la importancia de un diseño adecuado del reactor para optimizar cada etapa (Roddy, 2012).

Además, los gasificadores utilizados en este proceso se dividen en tres tipos principales, clasificados según la dirección del flujo entre el combustible y el agente gasificante: lecho fijo, lecho fluidizado y lecho de arrastre. Los gasificadores de lecho fijo son los más estudiados y ampliamente utilizados debido a su diseño simple, facilidad de fabricación y adaptabilidad a aplicaciones de pequeña escala, con capacidades de hasta 10 MW. Generalmente, operan a presión atmosférica y son ideales para investigaciones y aplicaciones industriales a escala reducida (Zhang et al., 2020).

En la literatura, hay estudios que investigan el uso de residuos de la palma aceitera africana en procesos de gasificación. Cada parte de la palma tiene una composición distinta, lo que influye en su comportamiento durante el proceso de gasificación. Como se observa en un trabajo realizado por Orozco et al. (2023), se evaluó el potencial energético de la fracción gaseosa obtenida a partir de hojas y tallos de la palma como biomasa, utilizando aire como agente gasificante. Los resultados mostraron que las hojas presentan un rendimiento de  $1,85 \text{ Nm}^3 \text{ gas/Kg}$  de biomasa seca y un poder calorífico inferior de  $4,08 \text{ MJ/N} * \text{ m}^3$ . En cuanto a los tallos, se obtuvo un rendimiento de  $1,30 \text{ Nm}^3 \text{ gas/Kg}$  de biomasa seca y un poder calorífico inferior de  $4,56 \text{ MJ/N} * \text{ m}^3$ .

## 2.9 Biocarbón

El biocarbón es la masa sólida que surge tras exponer una biomasa o materia orgánica a unas condiciones especiales de temperatura y suministro deficiente de oxígeno. El biocarbón se puede obtener de varias maneras, pero es importante resaltar que es un producto que surge de los procesos tanto de pirólisis como de gasificación. Según (Laird et al, 2009) el producto sólido de pirólisis tiene una alta densidad energética alrededor de  $18 \text{ MJ/Kg}$  pero más allá de un uso meramente energético, Ariadna et al. (s.f.) utilizaron este producto como posible fertilizante, el cual agrega valor a la cadena de producción de un determinado cultivo pues, como lo establece Ramírez (2023), las condiciones de pH, conductividad eléctrica y de minerales presentes en el suelo mejoraban de forma que se hacía un suelo apetecible para el crecimiento de nuevas plantaciones y además ayudaba a no liberar carbono a la atmósfera ya que la degradación del biocarbón es un proceso de cientos de años. Según Ariadna et al. (s.f.) el proceso de pirólisis debe realizarse entre  $450\text{-}600 \text{ }^\circ\text{C}$  y hacer una alimentación de masa en lapsos de minutos o días, mientras que el suministro de gas auxiliar del proceso se hace cada 5 segundos con el fin de obtener las mayores cantidades de biocarbón. Para

la gasificación se hace necesario controlar la cantidad de oxígeno que se ingresa ya que a mayor cantidad de oxígeno mayor es la quema de la biomasa y menor el producto sólido.

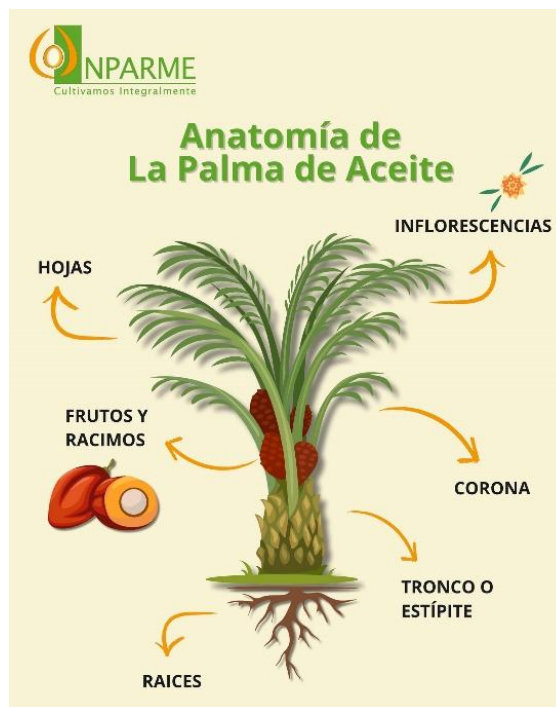
### 3. Metodología

#### 3.1 Selección y clasificación de la biomasa

La palma de aceite africana dispone de diferentes partes potenciales de biomasa, como se puede observar en la Figura 2, para poder ser usado en la pirólisis y en la gasificación, ya que cada una tiene una composición diferente en su relación de lignina, hemicelulosa y humedad.

#### Figura 2

*Partes de la palma de aceite africana*



*Nota.* Tomado de Imparme. (2024). [Anatomía de la palma de aceite]. Imparme SAS. <https://acortar.link/UE4GdR>

Dentro de estas diferentes partes se seleccionó el tallo o estípite de la palma como objeto de estudio, debido a que el Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma), como

interesado en la investigación realizó donaciones de esta parte de la planta, por lo que realizó el envío de dos lotes, en el primero fueron entregados los troncos de la estípita de la planta cortados en rodaja del mismo ancho del tronco de la planta y el segundo, fue de pedazos de troncos ya cortados de manera pequeña y secados.

### **3.2 Análisis elemental**

El análisis elemental, también conocido como análisis último, se llevó a cabo para determinar el contenido de carbono, hidrógeno y nitrógeno presente en la biomasa. Este procedimiento se realizó utilizando el equipo micro CHNSO de la marca LECO, en el laboratorio del Grupo de Química de Recursos Energéticos y Medio Ambiente (QUIREMA) de la Universidad de Antioquia. El análisis elemental realizado por la máquina se basa en la oxidación completa de los elementos carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) presentes en la muestra, mientras que el contenido de oxígeno (O) se determina por diferencia.

El procedimiento seguido se realizó de acuerdo con las recomendaciones de la norma ASTM D5373, la cual establece los lineamientos para el análisis elemental de combustibles sólidos, como carbón y coque.

### **3.3 Análisis próximo**

El análisis próximo de la biomasa se llevó a cabo siguiendo procedimientos estandarizados para determinar los contenidos de humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo. A continuación, se explican estos procedimientos junto con las normas aplicadas durante el proceso. Es importante mencionar que, dado que la humedad fue incluida como parte del análisis, todos los resultados se presentan en base húmeda. Las pruebas se realizaron sobre biomasa previamente acondicionada y cada determinación se repitió cuatro veces para asegurar la fiabilidad de los resultados obtenidos.

### 3.3.1 Determinación del contenido de humedad

El contenido de humedad en la biomasa se determinó utilizando las recomendaciones establecidas en las normas ASTM D3173/D3173M-17a y ASTM D4442-20.

Se utilizó una muestra representativa del tallo de la palma de aceite (1 g  $\pm$ 0,5 mg), se pesó y se secó en un horno eléctrico a una temperatura de 105°C hasta alcanzar un peso constante. Después, se calculó la humedad como el porcentaje de pérdida de peso respecto al peso inicial de la muestra con la ecuación 1.

$$\text{Humedad (HM)} = \frac{(PB - (PTD - PC))}{PB} \quad (1)$$

Siendo:

PB = peso de la biomasa

PDT = peso total después de la prueba

PC = peso del crisol

### 3.3.2 Determinación del Contenido de Cenizas

El contenido de cenizas se determinó siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM E1755-01.

Para el procedimiento, se utilizó una muestra seca de biomasa (1 g  $\pm$ 0,5 mg), la cual fue calcinada en un horno eléctrico a una temperatura de 575  $\pm$  25 °C, hasta que todo el material orgánico se quemó por completo, quedando únicamente los residuos minerales. El peso de estos residuos se usó para calcular el porcentaje de cenizas con la ecuación 2.

$$\text{Cenizas (CZ)} = \frac{(PTD - PC)}{PB} \quad (2)$$

Siendo:

PB = peso de la biomasa

PTD = peso total después de la prueba

PC = peso del crisol

### 3.3.3 Determinación del Contenido de Materia Volátil

La materia volátil se determinó utilizando las recomendaciones establecidas en las normas ASTM D3175-20 y ASTM E872-24.

Una muestra de la biomasa seca ( $1 \text{ g} \pm 0,5 \text{ mg}$ ) se calentó rápidamente en un horno eléctrico a  $950^\circ\text{C}$  en una atmósfera libre de oxígeno. Durante este proceso, los componentes volátiles se evaporaron y escaparon de la muestra. Cabe destacar que la muestra también contenía humedad, por lo que fue necesario restar este valor para calcular con precisión la cantidad de materia volátil, que se determinó como la pérdida de peso de la muestra tras el calentamiento como se muestra en la ecuación 3.

$$\text{Materia volátil (MV)} = \frac{(PB - (PTD - PC))}{PB} - HM \quad (3)$$

Siendo:

PB = peso de la biomasa

PTD = peso total después de la prueba

PC = peso del crisol

HM = porcentaje de humedad previamente calculado

### ***3.3.4 Determinación del Contenido de Carbono Fijo***

El contenido de carbono fijo en la biomasa se calculó indirectamente utilizando los resultados obtenidos del contenido de humedad, cenizas y materia volátil.

Se determinó como la diferencia entre el 100 % y la suma de los porcentajes de humedad, cenizas y materia volátil, como en la ecuación 4.

$$CF(\%) = 100 \% - (HM \% + CZ \% + MV \%) \quad (4)$$

Siendo:

CF = porcentaje de carbono fijo en la muestra

HM = porcentaje de humedad en la muestra previamente calculada

CZ = porcentaje de cenizas en la muestra previamente calculada

MV = porcentaje de materia volátil en la muestra previamente calculada

### **3.4 Análisis de poder calorífico**

El análisis de poder calorífico se desarrolla en dos fases: la primera, se centra en la preparación de la muestra que se extrajo del tronco de palma, y que al pulverizarse se procede a pesar en una balanza de 1 mg de error calibrada. Tras realizar la medición de la masa de la muestra, esta es compactada tipo pellet en una prensa para ser depositada en la bomba calorimétrica.

En la segunda fase, la muestra se expone a una combustión en un ambiente y condiciones ya establecidas con el fin de medir tanto el poder calorífico superior y así obtener el resultado neto, este proceso se logra al exponerla a una combustión en una atmósfera de oxígeno y midiendo el gradiente de temperatura.

El peso de la muestra fue de 0,8013 g, la máquina para medir el poder calorífico fue el calorímetro automático isoperibólico 6200 de marca Parr que sigue los lineamientos dictados según la norma ASTM D2015, D5865 que se aplica a carbones, coques y la norma ASTM E711 para biomasas.

### Figura 3

*Calorímetro 6200 Parr*



*Nota:* Tomado de "Calorímetro isoperibólico 6200 - Parr Instrument (Español)" (2018, 28 febrero), Parr Instrument (Español). Disponible en <https://www.parrinst.com/es/products/oxygen-bomb-calorimeters/6200-isoperibol-calorimeter/>

### 3.5 Termogravimetría

Para el desarrollo de la termogravimetría de la biomasa inicial se utilizó la máquina de TGA en los laboratorios de la universidad de las Campinas (UniCamp) en Brasil, siguiendo la norma ASTM E1131 para el procedimiento, la máquina se configuró para diferentes velocidades de calentamiento las cuáles se establecieron entre 10, 20 y 30 K/min. Este proceso sucede inmerso en una atmósfera de nitrógeno y los resultados que arroja la máquina son datos de temperatura, controlada en un rango de 0 a 800 °C, contra porcentaje de masa.

### **3.6 Preparación de la muestra**

A continuación, se describen los procedimientos específicos seguidos para acondicionar el residuo del tallo de palma de aceite africana antes de su uso en cada proceso. Dado que los equipos utilizados en los dos procesos son diferentes, la biomasa debe adecuarse de manera distinta para optimizar los resultados en cada caso.

#### ***3.6.1 Preparación proceso gasificación***

La biomasa utilizada fue entregada por Cenipalma, la cual proporcionó dos entregas de biomasa; para este proceso se seleccionó la segunda, ya que esta biomasa estaba cortada en trozos pequeños con forma de prisma cuadrangular y presentaba un estado seco. La biomasa se utilizó en su forma original; sin embargo, se realizó una segunda selección para asegurar que las piezas tuvieran un volumen inferior a 150 cm<sup>3</sup>. Este tamaño de muestra fue elegido para garantizar una superficie de reacción adecuada durante el proceso de gasificación,

Este enfoque está respaldado por Yahaya et al. (2019), quienes señalan que la reducción en el tamaño de las partículas mejora significativamente la eficiencia en la transferencia de calor y elimina los gradientes térmicos durante procesos termoquímicos como la pirólisis y la gasificación. Según su estudio, las partículas más pequeñas presentan una mayor velocidad de reacción, lo que contribuye a una conversión más uniforme y eficiente de la biomasa en productos sólidos y gaseosos, especialmente en reactores de lecho fijo tipo Down draft, donde esta condición optimiza el rendimiento del proceso y los productos obtenidos.

#### **3.6.2 Preparación para el proceso de pirólisis**

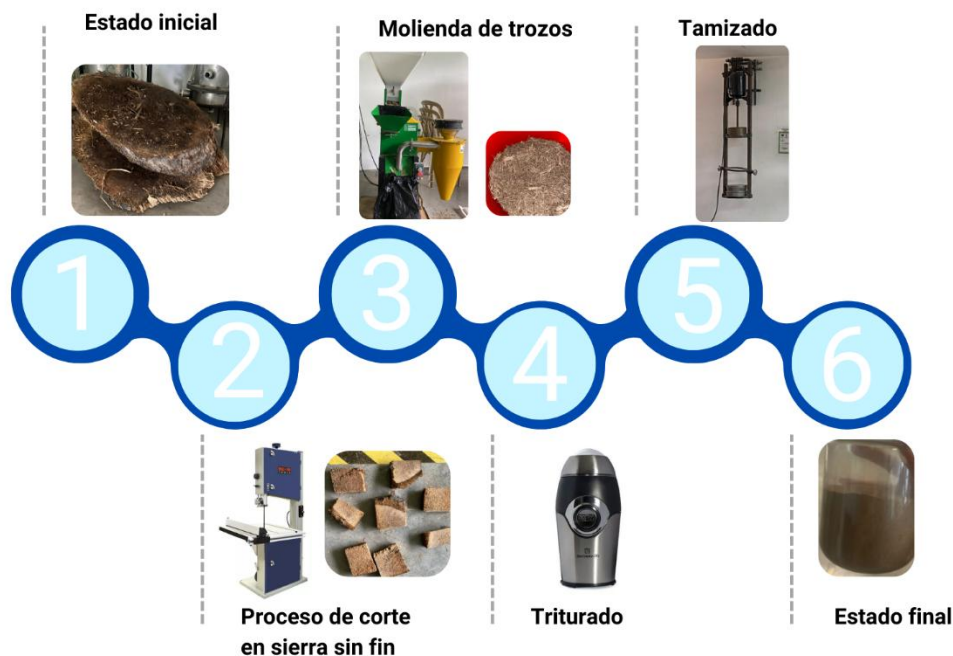
Para este proceso se seleccionó la primera tanda de biomasa, la cual consistía en cuatro rodajas grandes del tronco con un nivel de humedad perceptible al tacto. Por esta razón, las muestras fueron sometidas a un secado al aire libre durante varios días, con el objetivo de reducir

su contenido inicial de humedad. Este procedimiento facilitó el procesamiento posterior y evitó la introducción de un exceso de humedad en el reactor de pirólisis.

Una vez secas, las muestras fueron cortadas en trozos más pequeños para su procesamiento. Inicialmente, se trituraron en un molino de martillos hasta obtener partículas en forma de astillas. Posteriormente, estas astillas se pasaron por un triturador de café para transformarlas en una forma granulada. Finalmente, se tamizaron para garantizar un tamaño de grano uniforme, comprendido entre 200 y 300  $\mu\text{m}$ . Este tamaño de partícula fue seleccionado debido a las especificaciones del porta muestras del equipo utilizado, el cual tiene una forma cilíndrica con un volumen de 30  $\text{cm}^3$ .

#### Figura 4

*Esquema de la preparación de la biomasa para el proceso de pirólisis*



### 3.7 Diseño de experimentos: Pirólisis

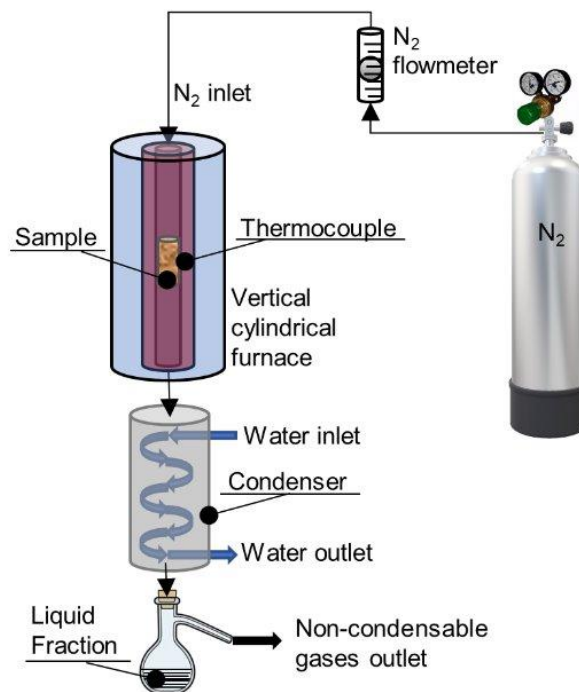
Con el análisis y resultados de las pruebas de caracterización de la biomasa (poder calorífico, análisis próximo y TGA) se propone el montaje de unas pruebas piloto con el fin de

confirmar la información del laboratorio en el banco de pirólisis, tal que a una velocidad media de calentamiento (20 K/min) se pusieron a prueba tres temperaturas (250, 400 y 550 °C) con el fin de observar cuál es el rango más adecuado de temperatura para obtener biocarbón.

El equipo para realizar todas las pruebas se encuentra descrito en el siguiente esquema y trata de un reactor de escala de laboratorio de lecho fijo y atmósfera de nitrógeno molecular que además es controlado por un sistema on-off para su temperatura.

### Figura 5

*Esquema de reactor de pirólisis laboratorio de combustión UIS*



Tras realizar las pruebas piloto o preliminares se determinó que las velocidades de calentamiento serían las mismas usadas para la termogravimetría (TGA) es decir, 10, 20 y 30 K/min y que las temperaturas de residencia usadas fueron 300, 350 y 450 °C. Es así como se llevó a cabo un diseño de  $k^n$ ; siendo  $n$  el número de parámetros a variar (velocidad de calentamiento y temperatura de residencia) y  $k$  el número de veces que se variarían los parámetros (tres

temperaturas y velocidades) dando como resultado un experimento de  $3^2$  que por razones de mayor fiabilidad se realizaron en duplicado gracias a la cantidad de biomasa máxima que podía tener el porta muestra del reactor de pirólisis (aproximadamente 12 gramos) y la disponibilidad del equipo.

Tras realizar cada prueba de pirólisis, se tomaron diferentes datos másicos con el fin de conocer el rendimiento de sólido y también, se determinaron los otros productos tanto líquidos como gaseosos con una regla de proporcionalidad entre la masa inicial y la masa final tras el proceso termo químico.

$$R = \frac{m_f}{m_o} * 100\% \quad (5)$$

Donde  $R$  es el rendimiento en %,  $m_o$  es la masa inicial en el porta muestra y  $m_f$  es la masa final o biocarbón generado tras la prueba.

## Figura 6

*Esquema metodológico de las pruebas finales de pirólisis*



En la imagen anterior se muestran los pasos para realizar las pruebas finales de pirólisis y consisten en lo siguiente:

1. Consiste en lavar, secar y limpiar todos los implementos y herramientas, como es la báscula de precisión, el condensador, el matraz de Erlenmeyer, el porta muestra y demás implementos.
2. La configuración del reactor consiste en la designación de los parámetros del experimento (velocidad de calentamiento y temperatura de residencia) y la apertura del suministro de nitrógeno y así crear su propio ambiente aislado de oxígeno.
3. En este paso se hacen las mediciones másicas de los implementos que tendrán relevancia para los balances de masa y así poder realizar el cálculo de los rendimientos. Se mide la masa del condensador, del matraz y del porta muestra con y sin la biomasa.
4. La puesta en marcha del equipo consiste en armar todas las partes de la máquina, y activar la programación del equipo del paso 2.
5. Tras finalizar el tiempo del proceso, se realiza el desarme del equipo e inmediatamente se hacen las mediciones en la balanza del condensador, el matraz y el porta muestra anotando cada uno de los valores obtenidos en las bitácoras de laboratorio.
6. La disposición final de las fracciones se hizo tanto en el caso del líquido (bioaceite) como en el del sólido (biocarbón). En el primero, todo el bioaceite del matraz era dispuesto en tarros ámbar de plástico, mientras que el biocarbón se guardaban en bolsas de muestra herméticas.

### **3.7.1 Caracterización del bioaceite**

La caracterización del bioaceite obtenido en el proceso de pirólisis es dispuesto en tarros ámbar como el que se ve en la Figura 7, tras haber acumulado la suficiente cantidad de líquido del

proceso de pirólisis se optó por analizar el bioaceite de la combinación de mayor rendimiento siendo la de 400 °C de temperatura de residencia a 30 °C/min como tasa de calentamiento con rendimientos cercanos al 40 %.

### **Figura 7**

*Tarros ámbar para bioaceite*



El tipo de caracterización para este bioaceite fue muy básico tratándose de un análisis de densidad el cual sigue lo dictado en la norma ASTM D4052-11 y también se determinó la viscosidad cinemática siguiendo la norma ASTM D455-12.

## **3.8 Gasificación**

El proceso de gasificación se diseñó con el objetivo de maximizar la producción de biocarbón a partir de biomasa de tallo de palma aceitera, favoreciendo la retención de carbono en forma de sólidos en lugar de la generación de gases. A continuación, se presentan su etapa preliminar y la final relativa al diseño de experimentos.

### **3.8.1 Pruebas preliminares**

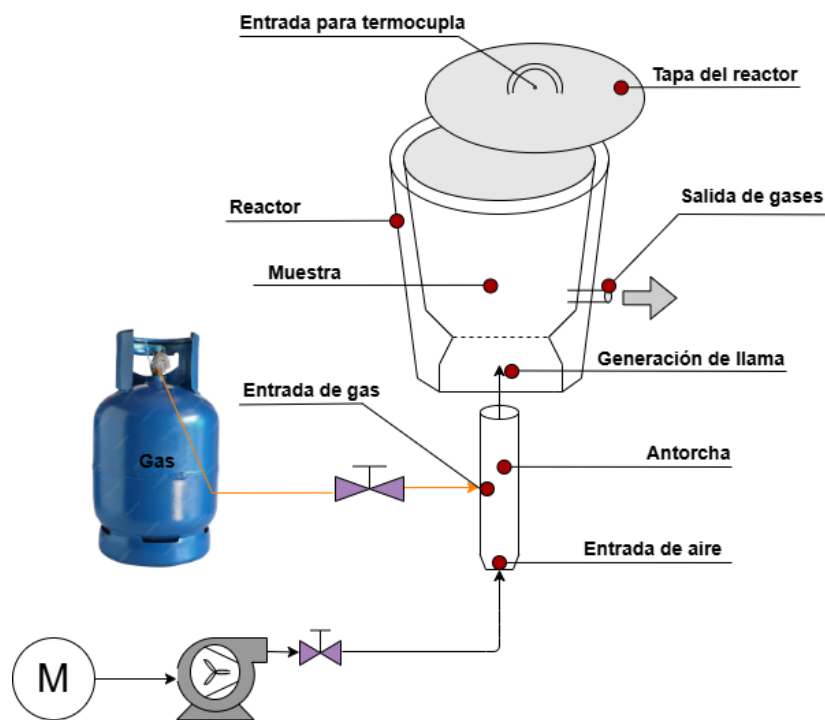
Para establecer las mejores condiciones del proceso en producción de biocarbón, se realizaron dos pruebas preliminares que permitieron identificar los parámetros más influyentes en la producción de biocarbón. Estas pruebas iniciales ayudaron a seleccionar las configuraciones de

flujo de gas y flujo de aire, así como la cantidad de biomasa que maximizaría la generación de fracción sólida.

El equipo utilizado tanto en las pruebas preliminares como en las pruebas finales es un reactor de lecho fijo tipo batch a escala de laboratorio, ubicado en el laboratorio de combustión de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Este reactor no cuenta con un sistema eléctrico para el control de temperatura; todos sus sistemas son regulados manualmente. A continuación, se presenta un esquema del equipo:

### Figura 8

*Esquema del reactor de gasificación y sus componentes*



Durante las pruebas preliminares, se evaluaron diferentes combinaciones de flujo de gas, flujo de aire, cantidad de biomasa y posición de la antorcha. Se llevó un registro detallado de la masa inicial y final de la biomasa, el tiempo de residencia y el porcentaje de sólidos residuales. Estos datos resultaron fundamentales para comprender cómo cada parámetro influye en la

producción de biocarbón y para determinar las condiciones óptimas que se utilizarían en las pruebas del diseño experimental.

### 3.8.2 *Diseño de experimentos*

Con base en los resultados de las pruebas preliminares, se estableció un diseño experimental que incluyó tres combinaciones de parámetros operativos. Los factores principales del diseño fueron el flujo de gas y el flujo de aire, evaluados en tres niveles específicos. Este diseño experimental siguió el mismo enfoque utilizado en el proceso de pirólisis  $k^n$  adaptando los parámetros a las particularidades de la gasificación. En este caso,  $k$  se mantiene en 3, representando los tres niveles de combinaciones, mientras que  $n$  se reduce a 1 variable. Esto se debe a que, aunque se trabajan dos parámetros, estos presentan una relación directa: el flujo de aire depende del flujo de gas para lograr una combustión completa. Por tanto, ambos parámetros se consideran como una sola variable en el diseño factorial, resultando en un diseño de  $3^1$ .

A diferencia del proceso de pirólisis, en este diseño no se realizaron duplicados de las pruebas. Esta decisión se basó en las limitaciones asociadas al montaje del equipo para cada prueba y la cantidad de biomasa requerida, lo que hacía inviable la repetición bajo las condiciones disponibles.

Las condiciones experimentales fueron las siguientes:

**Tabla 1**

*Niveles de parámetros de las pruebas finales*

<b>Niveles de parámetros</b>	<b>Flujo de gas [m/s]</b>	<b>Flujo de aire [m/s]</b>
Nivel Bajo	1,27	4,1
Nivel Medio	1,50	5,0
Nivel Alto	1,70	5,7

Para cada combinación, se mantuvieron tiempos de residencia prolongados para asegurar una conversión completa de la biomasa.

Así como en el proceso de pirólisis, en cada prueba de gasificación se registró la masa inicial y la masa final de la biomasa para calcular el rendimiento de sólidos residuales, utilizando la ecuación 6.

$$R = \frac{M_f}{M_o} \times 100 \% \quad (6)$$

Siendo:

R = el rendimiento de producto sólido en porcentaje

$M_o$  = la masa inicial de biomasa

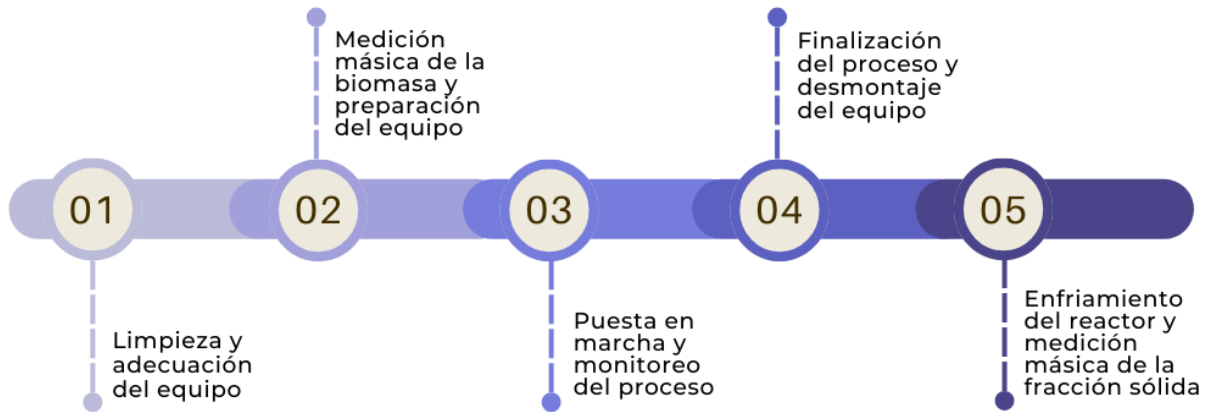
$M_f$  = la masa de biocarbón residual tras el proceso de gasificación.

Este rendimiento fue el principal indicador de la eficiencia del proceso en términos de producción de biocarbón.

A continuación, se presenta un esquema Figura 9 que ilustra los pasos metodológicos seguidos para la realización de las pruebas finales de gasificación.

**Figura 9**

*Esquema metodológico de las pruebas finales de gasificación*



El esquema anterior sintetiza la metodología en cinco pasos clave, los cuales consisten en:

1. El primer paso consiste en la limpieza del equipo, para garantizar que no haya contaminantes residuales de procesos previos. Esto se realiza utilizando una aspiradora de mano, asegurándose de eliminar cualquier partícula que pudiera haber quedado dentro del reactor o en la rejilla de su base, evitando así la contaminación del biocarbón generado. Una vez completada la limpieza, se procede a la adecuación del equipo. Este paso incluye la colocación de la antorcha en su base correspondiente, verificando que se encuentre a la altura adecuada según las especificaciones experimentales. Además, es necesario asegurar que la boquilla de la antorcha esté cubierta para evitar que, durante el suministro de la muestra, partículas ingresen y puedan obstruir o alterar la calidad de la llama. A continuación, se corta una lámina de fibra de vidrio con dimensiones específicas: un diámetro exterior igual al de la tapa del reactor y un diámetro interior igual al del borde superior del reactor. Este anillo de fibra de vidrio, gracias a sus propiedades aislantes, se utiliza posteriormente para colocarse entre el

- reactor y su tapa, contribuyendo a mantener la temperatura interna del reactor y minimizando la pérdida de calor en esta unión.
2. El segundo paso comienza con la medición de la masa de la muestra utilizada, en este caso, tallo residual de palma de aceite africana. Dado que la cantidad de biomasa dentro del reactor dependía del tamaño de las piezas, inicialmente se pesa toda la muestra almacenada en un solo saco. Posteriormente, se llena el reactor comprimiendo la biomasa para minimizar los espacios vacíos. Una vez que el reactor esté lo más lleno posible, se pesa la biomasa restante en el saco y, mediante la diferencia entre la masa inicial y la masa restante, se calcula la cantidad exacta de biomasa introducida en el reactor. Después de llenar el reactor, se procede a preparar el equipo para el proceso. El equipo sella utilizando su tapa correspondiente, la cual previamente fue acondicionada con la termocupla necesaria para monitorear la temperatura durante el proceso. Posteriormente, se verifica que las conexiones de las líneas de gas y aire estén correctamente instaladas. Una vez completada esta revisión, se enciende el turboventilador y se ajusta la válvula para registrar el flujo de aire. Este mismo procedimiento se repite con la línea de gas, obteniendo así ambos valores necesarios para el control del proceso.
  3. La puesta en marcha del proceso consiste en generar la llama utilizando un soplete, permitiendo que esta se mantenga en la antorcha gracias a los flujos de gas y aire previamente ajustados. Durante el monitoreo del proceso, se presta especial atención a la temperatura registrada por la termocupla dentro del reactor y a la salida de gases desde este. Aproximadamente a los veinte minutos de iniciado el proceso, se puede observar la emisión de gases desde el reactor, mientras que, tras una hora y cincuenta minutos, esta emisión disminuye considerablemente hasta casi detenerse.

4. Para la detención del proceso, se espera a que la emisión de gases termine por completo. Adicionalmente, se deja un tiempo adicional para asegurar que toda la muestra, incluida la parte superior, esté completamente carbonizada. Esto da como resultado una duración aproximada de dos horas y diez minutos por prueba. Una vez cumplido este tiempo, se cierran las líneas de gas y aire, y se apaga el turboventilador. Posteriormente, se retira la termocupla de la tapa del reactor.
5. Por último, para finalizar el paso a paso metodológico, se debe dejar enfriar el equipo durante aproximadamente cinco horas. Debido a las altas temperaturas alcanzadas, la muestra no es manipulable inmediatamente después del proceso, y es crucial mantener el reactor cerrado. Abrirlo antes de tiempo permitiría la entrada de oxígeno, lo que podría reactivar la combustión y reducir el biocarbón a cenizas. Una vez transcurrido el tiempo de enfriamiento, se procede a extraer todo el biocarbón generado para determinar finalmente el porcentaje de fracción sólida obtenida en este proceso.

### **3.9 Caracterización de los biocarbones**

Para caracterizar los biocarbones obtenidos tanto en el proceso de pirólisis como en el de gasificación se procedió a determinar sus propiedades, al igual que con la biomasa, mediante las técnicas de análisis próximo (ASTM D3172, ASTM D3175, ASTM D3174, ASTM D3173), análisis elemental (ASTM D5373) y poder calorífico (ASTM D5865).

Con los resultados de las anteriores pruebas de caracterización se pueden establecer los usos para el carbón, como su valor como capturador de carbono establecida por su relación H/C, y una clasificación según su rango como se establece en la norma ASTM D388 que dicta según los valores de carbono fijo (CF), materia volátil (MV) y poder calorífico neto (PCN) un determinado nombre para el carbón que así mismo asigna unos usos específicos a este biocarbón.

#### 4. Resultados y discusión

En este apartado se presentan los resultados obtenidos durante la caracterización de la biomasa, así como en los procesos de gasificación y pirólisis del tallo de palma aceitera. Se incluyen el análisis de la composición, la densidad energética y la cantidad de la fracción sólida generada. Adicionalmente, estos resultados se comparan con datos reportados en la literatura por diversos autores.

##### 4.1 Análisis elemental de la biomasa

A continuación, se presentan los resultados proporcionados por el laboratorio del grupo QUIREMA, los cuales se detallan en la Tabla 2. Es importante señalar que, para el componente de azufre (S), se asumió un valor de 0 %. Esta decisión se fundamenta en dos aspectos principales: primero, la determinación precisa del contenido de azufre requiere un equipo especializado diferente al utilizado en este análisis; y segundo, la literatura sugiere que el contenido de azufre en este tipo de biomasa es generalmente menor al 0,1 %, lo que respalda la suposición de un valor muy pequeño. Con esta consideración, el porcentaje de oxígeno (O) fue calculado por diferencia.

**Tabla 2**

*Resultados del análisis elemental para el residuo del tallo de la palma aceitera*

<b>Análisis elemental</b>				
Elemento	Carbono (%)	Hidrógeno (%)	Nitrógeno (%)	Oxígeno (%)
Biomasa	39,40	5,62	0,95	54,02

Los valores obtenidos en el análisis elemental del tallo de palma aceitera (o estípite) son consistentes con los reportados por Munar-Flórez et al. (2022) en el Boletín Técnico No. 41 de Cenipalma. El contenido de carbono en este estudio (39,40 %) está próximo al valor informado

por Munar-Flórez (45,91 %), mientras que el contenido de hidrógeno en el tallo (5,62 %) también se encuentra próximo al valor reportado para el estípite (6,38 %). Este nivel comparable de hidrógeno asegura un buen potencial energético, lo que lo convierte en una materia prima adecuada tanto para la producción de biocarbón como para la generación de gases combustibles en procesos de pirólisis y gasificación.

En comparación con el cuesco de palma, analizado en el estudio de Sánchez et al. (2017), el contenido de carbono en el tallo es inferior, ya que el cuesco presenta un valor significativamente mayor (52,8 %). Este resultado indica que el cuesco tiene un mayor potencial energético debido a su alta proporción de carbono fijo. Sin embargo, el contenido de hidrógeno es similar en ambas materias primas (5,7 % en el cuesco y 5,62 % en el tallo), lo que refuerza su viabilidad como fuente de energía. Además, el cuesco se caracteriza por un contenido mucho más bajo de cenizas (1,4 %), en comparación con valores típicos de otros residuos lignocelulósicos, lo que favorece su comportamiento en procesos como la gasificación.

El contenido de nitrógeno es notablemente bajo (0,95 %), lo cual presenta ventajas y desventajas dependiendo de la aplicación. Desde el punto de vista de la combustión, esta baja concentración de nitrógeno es beneficiosa, ya que reduce la formación de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), un grupo de gases contaminantes producidos durante la combustión a altas temperaturas. La formación de NO<sub>x</sub> es una de las principales causas de la contaminación atmosférica y la lluvia ácida (Basu, 2013). Por lo tanto, este bajo nivel de nitrógeno contribuye a un proceso de combustión más limpio y con menor impacto ambiental.

No obstante, desde una perspectiva agrícola, el bajo contenido de nitrógeno podría limitar la capacidad de la biomasa para enriquecer el suelo si se reintegra al ciclo de siembra. El nitrógeno es un macronutriente esencial para el crecimiento de las plantas, y su ausencia en cantidades

significativas limita la capacidad de la biomasa para enriquecer el suelo como fertilizante natural (Lehmann & Joseph, 2009). Esta limitación refuerza la importancia de procesos como la pirólisis y la gasificación, ya que permiten transformar la biomasa en productos más valiosos, como biocarbón, que mejora la retención de nutrientes en el suelo y tiene aplicaciones energéticas (Demirbaş, 2001).

## 4.2 Análisis próximo de la biomasa

Estos resultados proporcionan los valores de las propiedades fundamentales de la biomasa, ofreciendo una visión clara sobre su calidad y su potencial para el aprovechamiento en los procesos de pirólisis y gasificación.

### 4.2.1 Determinación del contenido de humedad

En la Tabla 3 se presenta el contenido de humedad obtenido a partir de los ensayos realizados, con un promedio de 8,0766 % contenido de humedad en la biomasa.

**Tabla 3**

*Resumen de datos de la prueba de humedad*

<b>Humedad (HM)</b>					
Muestra	M. biomasa [g]	M. crisol [g]	M. total [g]	M. prueba [g]	%Humedad
1	2,0014	17,2651	19,2665	19,1057	8,0344
2	2,0007	19,0273	21,028	20,8638	8,2071
3	2,0004	18,8191	20,8195	20,6573	8,1084
4	2,0009	18,1029	20,1038	19,9446	7,9564

Este valor es consistente con el comportamiento esperado para biomasa agroindustrial con pretratamiento limitado, como se observa en otros estudios. Por ejemplo, Carranza Rojas (2015) señala que la fibra de palma debe presentar un contenido de humedad inferior al 10 % para optimizar el rendimiento en procesos de pirólisis, lo que coincide con los valores obtenidos en este

trabajo. De manera similar, Deris et al. (2006) reportaron un contenido de humedad del 5,89 % para el tronco de palma aceitera, un valor también inferior al 10 %, que evidencia la influencia de un pretratamiento más intensivo. Por otro lado, Munar-Flórez et al. (2022) no reportan directamente el contenido de humedad, ya que las muestras analizadas fueron previamente secadas para alcanzar condiciones ideales, lo que dificulta una comparación directa con este estudio. En conjunto, estas diferencias reflejan la influencia del pretratamiento aplicado y las condiciones iniciales de las muestras, siendo el contenido de humedad obtenido en este trabajo coherente con biomásas que no han pasado por un secado intensivo.

#### 4.2.2 Determinación del contenido de cenizas

En la Tabla 4 se presentan los resultados del contenido de cenizas obtenidos en los ensayos, con un promedio de 7,2897 % en base húmeda, que corresponde a un 7,93 % en base seca.

**Tabla 4**

*Resumen de datos de la prueba de cenizas*

Cenizas					
Muestra	M. biomasa [g]	M. crisol [g]	M. total [g]	M. prueba [g]	%Cenizas
1	2,0002	27,4905	29,4907	27,6323	7
2	2,0004	26,0778	28,0782	26,2260	7,4085
3	2,0000	25,5849	27,5849	25,7300	7,2550
4	2,0011	26,6763	28,6774	26,8245	7,4059

Estos valores son significativamente más altos que el 3,69 % reportado por Munar-Flórez et al. (2022) y el 5,85 % encontrado por Deris et al. (2006) para el tronco de palma aceitera. Las diferencias podrían estar relacionadas con la composición inicial de la biomasa, el tipo de material analizado (estípite, tronco o fibra) y la presencia de impurezas. Carranza Rojas (2015) no reporta directamente valores de cenizas, pero enfatiza que niveles bajos de componentes inorgánicos son

cruciales para mejorar la eficiencia en procesos de conversión termoquímica. Además, señala que los residuos agroindustriales suelen presentar bajos niveles de componentes inorgánicos, lo cual podría estar relacionado con el procesamiento previo.

#### 4.2.3 Determinación del contenido de materia volátil

En la Tabla 5 se presenta un resumen de los datos obtenidos durante la prueba. Para obtener un único valor, se promediaron los cuatro resultados, encontrando un contenido de materia volátil en la biomasa de 67,3815 % en base húmeda, equivalente a 73,30 % en base seca.

**Tabla 5**

*Resumen de datos de la prueba de contenido de materia volátil*

<b>Materia volátil</b>					
Muestra	M. biomasa [g]	M. crisol [g]	M. total [g]	M. prueba [g]	%Mat. Volátil
1	2,0047	43,8301	45,8348	44,3258	67,1965
2	2,0017	41,5213	43,523	42,0125	67,3843
3	2,0012	42,1666	44,1678	42,6571	67,4131
4	2,0003	40,5679	42,5682	41,0558	67,5321

El contenido de materia volátil obtenido en este estudio es ligeramente inferior al 79,98 % reportado por Munar-Flórez et al. (2022) y al 76,84 % observado por Deris et al. (2006). A pesar de estas diferencias, los valores son consistentes con los de biomasa seca que conserva una fracción significativa de materia volátil, lo que indica un buen potencial para procesos termoquímicos como la pirólisis y la gasificación.

Carranza Rojas (2015) señala que el contenido de materia volátil depende del pretratamiento aplicado a la fibra de palma, situándose típicamente en rangos cercanos al 75 %, lo que coincide con el comportamiento esperado para biomásas lignocelulósicas. Las diferencias

observadas en este estudio pueden atribuirse a las condiciones experimentales y a las propiedades específicas de la biomasa analizada.

#### **4.2.4 Contenido de carbono fijo**

El contenido de carbono fijo se obtuvo utilizando la ecuación 4 con los valores definitivos de los demás compuestos, encontrando un contenido de carbono fijo en la biomasa del 17,2522 % en base húmeda, lo que equivale a 18,77 % en base seca. Este valor representa la fracción de carbono estructuralmente estable en la biomasa, que es resistente a la volatilización y a la conversión en cenizas durante los procesos termoquímicos (Crombie et al., 2013).

En comparación, Munar-Flórez et al. (2022) reportaron un contenido de carbono fijo del 16,33 % en el estípite de palma aceitera, mientras que Deris et al. (2006) observaron un contenido de 11,42 % en el tronco. Carranza Rojas (2015) destaca que el carbono fijo es un indicador clave de la calidad del biocarbón obtenido en procesos de pirólisis, ya que está directamente relacionado con su densidad energética, el valor obtenido presenta una mayor proporción de carbono fijo, lo cual puede influir positivamente en su rendimiento como biocarbón en aplicaciones energéticas.

#### **4.3 Poder calorífico de la biomasa**

El valor arrojado correspondió a un poder calorífico neto de 16,3446 MJ/Kg para la muestra de tallo de palma de aceite africana.

En una breve comparación de los resultados obtenidos con otros autores, se encontró que Fedepalma (1993) habla de un valor para los troncos de 4500 Kcal/kg, aproximadamente 18,8 MJ/Kg, mientras que en pellets de material fibroso y secados usados en el trabajo de Mufasa Abdul como menciona Forero et al. (2012) de un valor energético de 20 MJ/Kg. Respecto a otras partes de la palma según García et al. (2010) encontró para el cuesco un poder calorífico de 21,445 MJ/Kg, la tusa 8,165 MJ/Kg y la fibra de 19,201 MJ/Kg.

En la Tabla 6 se presentan los poderes caloríficos superiores de algunas biomásas comunes.

**Tabla 6**

*Poderes caloríficos superiores de algunas biomásas de referencia*

<b>Biomasa</b>	<b>Poder calorífico (MJ/Kg)</b>
Cáscara de coco	23,01
Cascarilla de arroz	15,49
Cascarilla de café	14,21
Cuesco de palma de aceite	19,46

Nota. Los valores de la anterior tabla se basaron en los estudios realizados por Suaza. *et al* (2012), Andrés. *et al* (2018), Torres, D. y Bastidas, M. (2017), Millán. *et al* (2016).

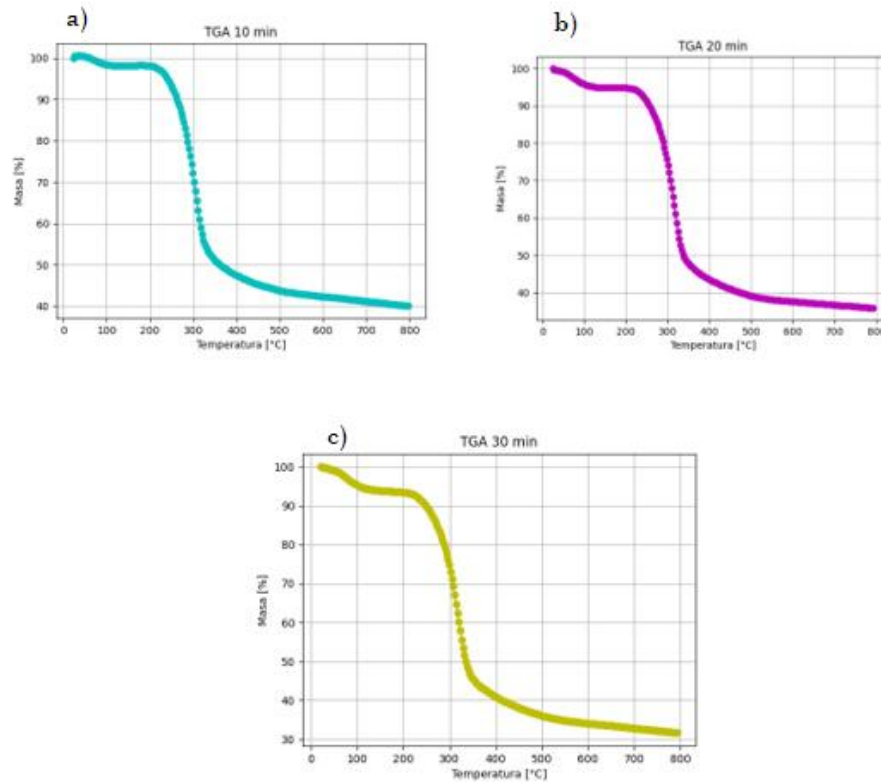
Todas las especificaciones sobre la realización y configuración de la máquina colorimétrica siguen la norma ASTM E711 y ASTM D2015 sobre la medición del poder calorífico para un carbón o coque.

#### **4.4 Termogravimetría (TGA)**

Al realizar y procesar la información de la termogravimetría se obtuvo la Figura 10 siendo que en esta aparecen las curvas a diferentes velocidades, las cuales son muy similares puesto que su comportamiento muestra una degradación de manera que, a mayor velocidad de calentamiento, la cantidad de masa decae y las diferencias empiezan a ser notables en el rango de 350 a 800 °C, siendo que para el TGA de 10 K/min la cantidad de masa no cae mucho más del 40 %. El TGA de 20 K/min cae alrededor del 35 %. Y finalmente, para el TGA de 30 K/min presenta una caída cercana al 30 % del valor de su masa inicial.

#### **Figura 10**

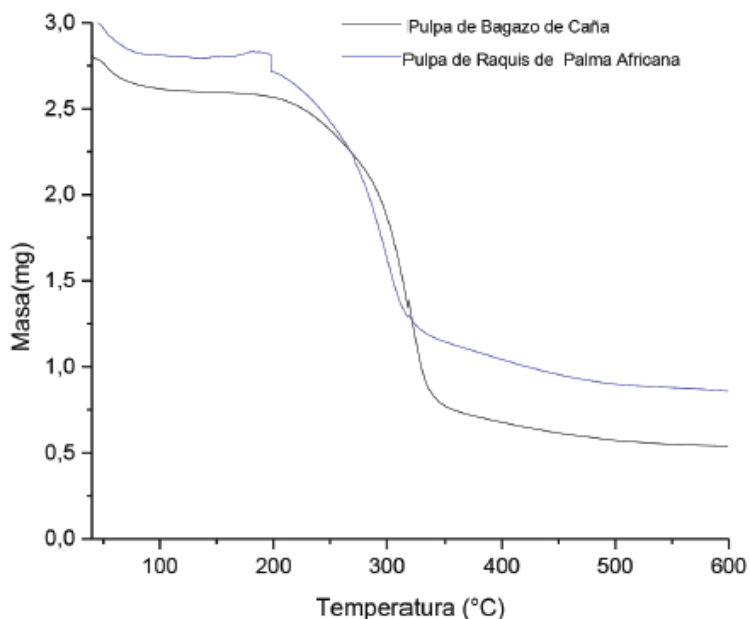
*Termogravimetrías del tallo de palma: a) 10 K/min; b) 20 K/min; c) 30 K/min*



Al revisar otros autores que hayan analizado esta misma parte de la palma africana o similares se pudo encontrar por ejemplo el caso estudiado por Altamirano, et al. (2018) donde las biomásas estudiadas fueron la pulpa de raquis de palma africana y pulpa de bagazo de caña, que poseen un comportamiento muy similar al obtenido del estípite de la palma, siendo que la caída por humedad, hemicelulosa y lignina suceden en un rango de temperaturas muy similares como se puede observar en la Figura 11.

### Figura 11

*Termogravimetrías del raquis de palma y bagazo de caña*



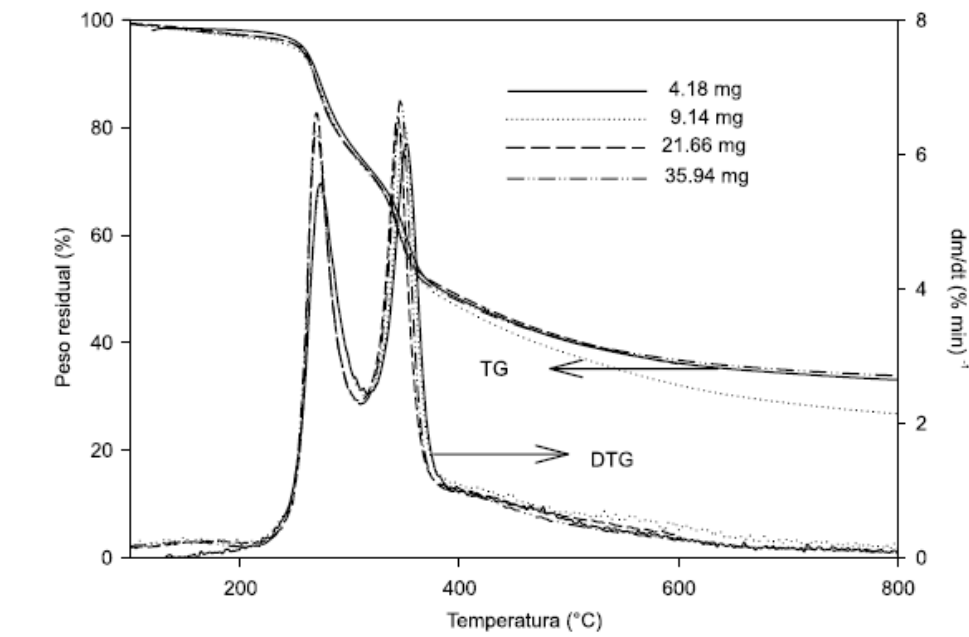
*Nota.* Tomado de Chaves *et al.* (2017). Evaluación de la tensión elástica de papel elaborado a partir de residuos orgánicos. Figura 3.

Otro ejemplo puede ser visto en el trabajo de García *et al.* (2008), quienes estudiaron el cuesco de la palma de aceite africana, donde encontró una curva como se ve en la Figura 12, siendo esta muy similar a la hallada en este estudio con la salvedad que admite temperaturas mayores pues llega hasta los 400 °C aproximadamente para empezar a descomponer la lignina mientras que en el tallo sucede desde los 350 °C aproximadamente, lo cual indica por qué el cuesco suele ser usado en pirólisis de mayores temperaturas y su principal objetivo es el producto líquido.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y los antecedentes expuestos se puede afirmar que el rango adecuado para la generación de biocarbón en el proceso de pirólisis, a una velocidad de calentamiento fija, ronda sobre el rango de 250 y 400 °C correspondiente a la zona coherente para obtener biocarbón a partir de la biomasa ya que el rendimiento ronda entre el 40 % y 75 %.

### **Figura 12**

*Termogravimetría del cuesco de palma*



*Nota.* Tomado de García N. *et al.* (2008). Determinación de los parámetros cinéticos de degradación térmica de los subproductos de las plantas de beneficio mediante análisis termogravimétrico y calorimetría de barrido diferencial. Figura 2.

#### 4.5 Pirólisis

La presentación de los resultados en la pirólisis sigue el orden establecido por la metodología del proceso: primero se describen las pruebas preliminares, luego las finales, e inmerso en cada una de ellas se discuten los resultados obtenidos, analizando la relación entre las variables empleadas y comparándolos con hallazgos de otros autores. Finalmente, se identifican las propiedades del biocarbón de pirólisis con una caracterización empleando el análisis próximo, elemental y poder calorífico.

##### 4.5.1 Pruebas preliminares

Como el fin de las pruebas preliminares de pirólisis era conocer cuáles son los rangos de las variables que mejores resultados ofrecían en cuanto a obtención de biocarbón y de su calidad

como producto, se realizó un análisis de cada uno de los tres estudios siguiendo también lo visto en la termogravimetría del estípite de la palma.

En la Tabla 7 se puede encontrar un resumen de los valores máxicos y las condiciones de cada uno de los experimentos realizados siguiendo las condiciones descritas en la preparación de la muestra y el diseño de las pruebas preliminares descritos en la metodología.

**Tabla 7**

*Pruebas preliminares de pirólisis*

Toma de datos - pruebas preliminares					
N° de prueba	Temperatura [°C]	V. de calentamiento [°C/min]	Peso muestra [g]	Tiempo. R [min]	% Biocarbón
1	250		10,0048		80,4324%
2	550	20	12,0079	40	25,6889%
3	400		7,549		32,1314%

Se identificaron dos hallazgos principales. En la primera prueba, realizada a 250 °C, se obtuvo un rendimiento del 80 % en biocarbón, pero, a esta temperatura, la biomasa no se pirolizó adecuadamente, como se observa en la Figura 13, y la generación de gas y líquido, correspondientes al 20 % restante, fue insignificante. Para que el proceso de pirólisis sea efectivo, la biomasa debe degradarse completamente, lo que se refleja en el biocarbón con un característico color negro brillante y cambios medibles en las propiedades evaluadas mediante análisis próximo y elemental.

**Figura 13**

*Fracción sólida de la prueba preliminar 1*



El segundo hallazgo abarca las pruebas 2 y 3, realizadas a 550 °C y 400 °C, respectivamente. En la prueba a 550 °C, se obtuvo un rendimiento del 25 % respecto a su masa inicial, mientras que a 400 °C fue del 32 %. En ambas pruebas se logró producir carbones pirolizados en su totalidad, como se evidencia en la Figura 14. Sin embargo, dado que el enfoque del proyecto prioriza un mayor rendimiento de biocarbón, los porcentajes inferiores al 30 % fueron descartados. Finalmente, se determinó que 400 °C es la temperatura máxima de residencia, con 300 °C como punto inicial de este parámetro, según lo observado en la primera prueba y debido al diseño de experimentos habría una temperatura media de residencia, es decir, 350 °C para conocer el comportamiento de este proceso en la biomasa y su biocarbón.

#### **Figura 14**

*Biocarbón completamente pirolizado*



Jardón-Medina y Ortiz-Fernández (2022) realizaron un estudio de pirólisis en el rango de 170 °C a 230 °C utilizando lirio acuático proveniente de una presa en México. Observaron rendimientos del 40 % al 90 % en la producción de biocarbón, siendo los mejores resultados a 170 °C con un tiempo de residencia de 172 minutos, logrando un rendimiento del 70 %. Además, el biocarbón obtenido presentó un poder calorífico superior de 17,54 MJ/kg en base seca. Este rendimiento fue posible gracias a las características propias de la biomasa y al proceso de secado previo, que redujo su contenido de humedad a menos del 40 %, optimizando así las condiciones iniciales para la pirólisis.

De acuerdo con lo anterior, se puede comparar lo visto en las pruebas preliminares donde en la número 1 se obtuvo un rendimiento comparable al de Jardón-Medina y Ortiz-Fernández, sin embargo, a diferencia de estos autores, la biomasa se pirolizó completamente, por lo que se buscaron mejores condiciones con las variables controlables para completar este proceso.

#### ***4.5.2 Pruebas finales de pirólisis***

Las pruebas finales de pirólisis fueron el conjunto de experimentos que resultaron al seguir el modelo 3<sup>2</sup> y su debido duplicado, con el fin de conocer la incidencia que tuvieron las variables de velocidad de calentamiento y temperatura de residencia en la obtención de biocarbón.

**Tabla 8***Pruebas finales de pirólisis*

N° de prueba	Temperatura [°C]	V. de calentamiento [°C/min]	Peso muestra [g]	P.F sólida [g]	% Biocarbón
1	300	30	6,0009	2,7912	46,51%
2	350	30	6,0072	2,1713	36,14%
3	400	30	6,0045	1,8614	31,00%
4	300	20	6,0058	2,9759	<b>49,55%</b>
5	350	20	6,0091	2,1257	35,37%
6	400	20	6,0046	1,8144	30,22%
7	300	10	6,0077	2,9611	49,29%
8	350	10	6,009	1,4569	24,25%
9	400	10	6,0098	1,8337	30,51%
8.1	350	10	6	1,9611	32,68%

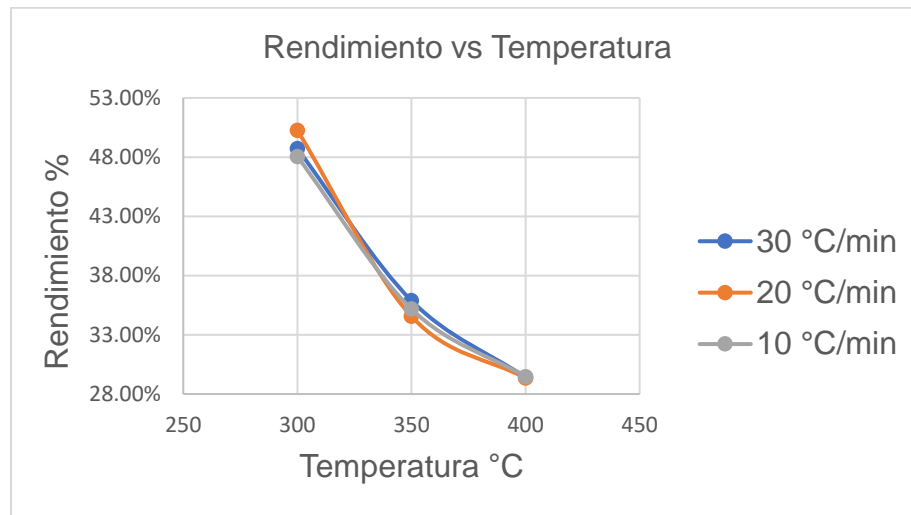
**Tabla 9***Duplicado de las pruebas de pirólisis*

N° de prueba	Temperatura [°C]	V. de calentamiento [°C/min]	Peso muestra [g]	P.F sólida [g]	% Biocarbón
10	300	30	6,0056	2,9259	48,72%
11	350	30	6,004	2,1546	35,89%
12	400	30	6,0012	1,7654	29,42%
13	300	20	6,0062	3,0193	<b>50,27%</b>
14	350	20	6,0014	2,0745	34,57%
15	400	20	6,0052	1,7623	29,35%
16	300	10	6,0043	2,8856	48,06%
17	350	10	6,0027	2,1118	35,18%
18	400	10	6,0065	1,77	29,47%

De las tablas anteriores se puede establecer que para la prueba 4 y su duplicado, que sería la prueba 13, se obtuvo el mayor rendimiento, porque en ambos casos se aproximan al 50 % para obtener biocarbón, bajo la condición de menor temperatura de residencia y velocidad de calentamiento media (300 °C y 20 °C/min).

**Figura 15**

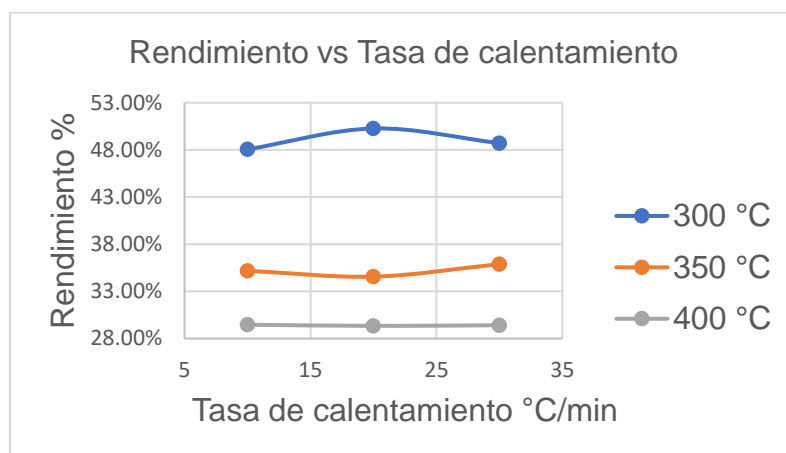
*Influencia de la temperatura en la producción de biocarbón*



De los resultados anteriores es válido afirmar que la temperatura de residencia es un factor crítico dentro del diseño propuesto, ya que entre menor sea este parámetro, mayor es la producción del producto sólido del proceso que se ve representada en la Figura 15. Adicionalmente, la velocidad de calentamiento no juega un rol tan crítico, posiblemente porque las variaciones entre ellas no llegan a ser suficientemente significativas para generar cambios muy notorios siendo casi constantes en todos los casos como se ve en la Figura 16.

**Figura 16**

*Influencia de la tasa de calentamiento en el rendimiento de biocarbón*



En síntesis, para la velocidad más alta (30 °C/min) se observa que el rendimiento del biocarbón es mayor para la temperatura de residencia de 350 °C, aunque los mejores resultados se presentaron a la temperatura de residencia más baja y velocidad de calentamiento media, 300 °C y 20 °C/min, respectivamente.

En la Tabla 6 se presenta la prueba 8.1, la cual corresponde a un experimento adicional realizado bajo las mismas condiciones de la prueba 8. Esto se llevó a cabo debido a una alta diferencia en los resultados obtenidos previamente, con un error estimado del 45 %, probablemente asociado a factores de medición de masa o problemas de calibración del equipo. En esta revisión, se identificó que la balanza de precisión utilizada estaba descalibrada, lo cual afectó los resultados de la prueba inicial. Este inconveniente fue corregido en las pruebas posteriores, asegurando mediciones más precisas.

En un trabajo realizado por Vilca et al. (2022) propusieron una revisión de la literatura disponible para clasificar la rentabilidad, calidad en términos de cantidad y valor energético y, la sostenibilidad del procesamiento de residuos sólidos mediante pirólisis, con el fin de obtener principalmente biocarbón. Entre sus conclusiones y la exposición de información se encontró que el proceso de pirólisis lenta tendría un rendimiento en sólido en el rango de 25 al 65 % lo que coincide de manera acertada con los datos de la Tabla 8 y Tabla 9, además que el rango de

temperaturas de residencia y tasa de calentamiento también están dentro del diseño de experimentos, siendo rangos de 300 °C y velocidades entre 6 a 48 °C/min, respectivamente.

Por otro lado, en el trabajo de Klug, M (2012) que también trata de pirólisis, haciendo un estudio para diferentes tipos de este mismo proceso (flash, intermedia y torrefacción) encontró que para procesos lentos como es la torrefacción a 290 °C y tiempos de residencia superiores a los 30 minutos se obtiene un rendimiento en carbón del 82 % y para un proceso como la pirólisis lenta a 400 °C y tiempos de residencia superiores a 1 hora se lograba un rendimiento del 35 % lo cual sitúa a los resultados obtenidos en este diseño como coherentes y confiables.

#### **4.5.3 Caracterización de la fracción líquida**

Para caracterizar el bioaceite, se siguió la metodología descrita previamente. Las mediciones finales se llevaron a cabo en los laboratorios de la Universidad Industrial de Santander (UIS), sede Guatiguará. Se determinó una viscosidad cinemática de 1,28 cSt y una densidad de 1,0389 g/ml (equivalente a 1038,9 kg/m<sup>3</sup>).

Según el estudio realizado por Urien, A. (2013), la viscosidad de los aceites pirolíticos puede variar ampliamente entre 0,25 y 1000 cSt, mientras que la densidad oscila entre 1150 y 1300 kg/m<sup>3</sup> en los casos de aceites más densos. Además, se destaca que estos valores dependen en gran medida de la naturaleza de la biomasa utilizada como materia prima.

**Tabla 10**

*Viscosidades de algunos líquidos de referencia*

<b>Líquido</b>	<b>Viscosidad cinemática (cSt)</b>
Alcohol propílico	1,4
Cerveza	1,8
Agua destilada	1,0038
Aceite de cárter automático SAE 40	12,9-16,8

Alcohol etílico	1,2
-----------------	-----

*Nota.* Tomado de Duplicación. Tabla de viscosidades de algunos líquidos comunes. (2025)

## 4.5 Gasificación

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las pruebas preliminares y finales del proceso de gasificación. Se incluyen los porcentajes de fracción sólida generada, una comparación con datos reportados por otros autores para validar la coherencia de los resultados y la metodología aplicada durante las pruebas. Asimismo, se identifica la combinación de variables experimentales que permitió alcanzar el mayor rendimiento de fracción sólida.

### 4.5.1 Pruebas preliminares

Los resultados de las pruebas preliminares se presentan en la Tabla 11. Estos resultados sirvieron como guía para identificar qué parámetros debían variarse y seleccionarse en las pruebas finales.

**Tabla 11**

*Parámetros de pruebas preliminares de gasificación*

Parámetros				
Nº prueba	Flujo de gas $\left[\frac{m}{s}\right]$	Flujo de aire $\left[\frac{m}{s}\right]$	Peso de la biomasa [g]	Fracción sólida %
1	1,6	5,5	925	33,84
2	1,7	5,8	713	< 3

Estas pruebas fueron fundamentales para determinar que el reactor del gasificador debe estar completamente lleno, procurando no dejar espacios y asegurando que la biomasa esté lo más compacta posible. Este hallazgo se obtuvo a partir de la prueba N°2, en la cual el reactor se llenó únicamente hasta  $\frac{3}{4}$  de su capacidad. Los resultados de esta prueba fueron completamente opuestos

al objetivo de obtener la mayor cantidad posible de biocarbón, ya que, al dejar un gran espacio vacío en el reactor, se permitió la entrada de aire, lo que provocó la combustión de la biomasa. Esto ocasionó que la fracción sólida se redujera a cenizas, un resultado que no contribuye al proceso de gasificación, el cual debe realizarse en condiciones de ausencia de oxígeno.

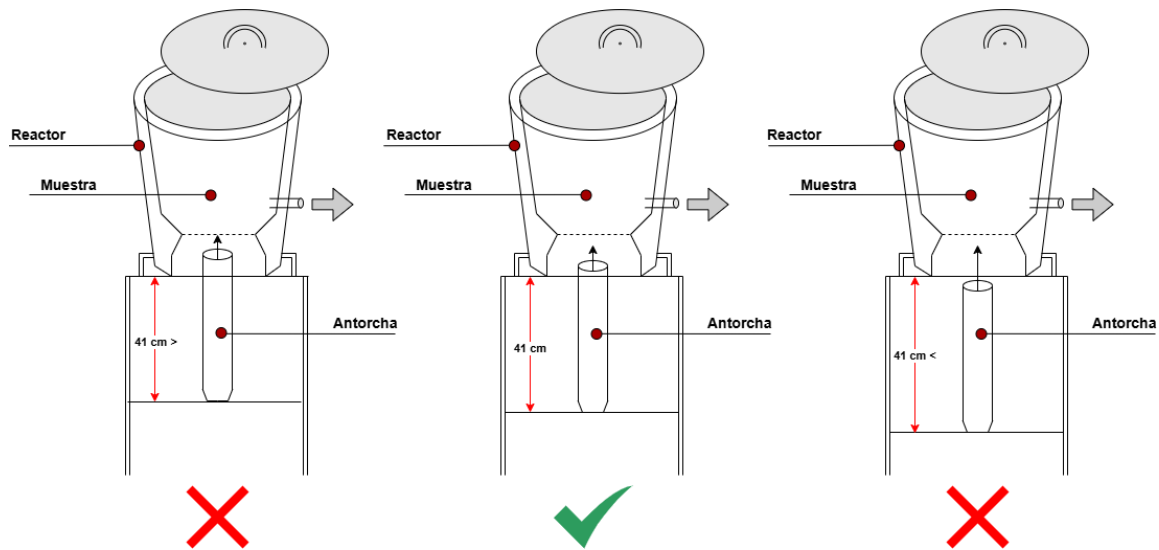
Diversos autores destacan la importancia de garantizar el llenado completo y la compactación adecuada del reactor para optimizar la gasificación. Shahbeig et al. (2022) subrayan que un control preciso de estos parámetros es fundamental para maximizar la eficiencia del proceso y evitar reacciones no deseadas, como la combustión que genera cenizas. De manera similar, Antil et al. (2023) señalan que la baja compactación o el llenado incompleto permiten la entrada de aire, disminuyendo la eficiencia y favoreciendo la combustión. Estos hallazgos coinciden con los resultados obtenidos en la prueba N°2, evidenciando la necesidad de optimizar estas condiciones para mejorar la producción de biocarbón.

Otro factor que debe considerarse en las pruebas finales es la posición de la base de la antorcha. Esta debe mantenerse en la ubicación indicada por la marca en la estructura, ubicada a 41 cm de la superficie de la mesa Figura 17, ya que cualquier desviación puede afectar significativamente el proceso de gasificación. Durante la prueba N° 2, la antorcha se colocó más cerca del reactor, lo que provocó un aumento de la temperatura a una velocidad superior a la esperada. Esto resultó en una disminución del contenido de biocarbón debido a la rápida degradación térmica de la biomasa.

Por otro lado, si la antorcha se posiciona por debajo de la marca o demasiado alejada del reactor, no se alcanza la temperatura necesaria para iniciar y mantener la gasificación. Esto se debe a la distancia excesiva de la llama y a la dificultad para controlar la transferencia de calor hacia la biomasa, comprometiendo el proceso.

**Figura 17**

*Esquema de la ubicación de la antorcha en el equipo de gasificación*



#### 4.5.2 Pruebas finales de gasificación

Basados en todas las recomendaciones y las variables fijas identificadas durante las pruebas preliminares, se definieron los valores y las variables a modificar para las pruebas de gasificación, como se muestra en la Tabla 12.

Las condiciones experimentales de las pruebas finales fueron las siguientes:

**Tabla 12**

*Parámetros de pruebas finales de gasificación*

Parámetros de pruebas finales		
N° prueba	Flujo de gas $\left[\frac{m}{s}\right]$	Flujo de aire $\left[\frac{m}{s}\right]$
1	1,27	4,1
2	1,5	5
3	1,7	5,7

El flujo de gas se seleccionó considerando los valores máximo y mínimo que el sistema puede otorgar, los cuales fueron controlados mediante una llave de paso. Este control garantiza un

suministro uniforme y estable, lo que permite mantener una transferencia de calor constante hacia la biomasa. Por otro lado, el flujo de aire se ajustó proporcionalmente al flujo de gas, dada su relación directamente proporcional en procesos de combustión parcial, donde es fundamental proporcionar una cantidad limitada de oxígeno para favorecer la gasificación en lugar de una combustión completa.

En el reactor de gasificación, la combustión no se produce de manera uniforme en todo el equipo debido a las diferencias en la distribución de energía a lo largo de los ejes radial y axial (Bhoi & Channiwala, 2009). Este fenómeno provoca variaciones significativas en las temperaturas alcanzadas en diferentes regiones del reactor. En este proceso, las temperaturas registradas oscilaron entre 750 °C y 850 °C, según la medición proporcionada por la termocupla instalada. Los estudios realizados por Bhoi y Channiwala (2009) confirman que las distribuciones de temperatura axial y radial pueden verse afectadas por parámetros operativos como la relación aire-combustible, lo que influye directamente en la estabilidad térmica y la eficiencia del proceso.

Es importante señalar que la termocupla utilizada cuenta con un único punto de toma de datos y está ubicada en la zona central del reactor. Esto implica que las temperaturas registradas representan únicamente las condiciones locales de esa región y no reflejan las posibles variaciones térmicas en otras zonas del equipo. Por ejemplo, en la parte superior del reactor, donde el contacto con la llama es mínimo, las temperaturas podrían ser más bajas. En contraste, en la parte inferior, más cercana a la llama, es probable que las temperaturas sean considerablemente más altas.

Esta distribución desigual de la temperatura puede influir en la eficiencia del proceso de gasificación, ya que afecta la velocidad y la uniformidad de las reacciones termoquímicas. Para obtener mediciones más representativas y comprender mejor el comportamiento térmico del

reactor, sería necesario implementar un sistema de medición con múltiples termocuplas ubicadas estratégicamente a lo largo de los ejes axial y radial.

De acuerdo con la Tabla 13, la masa inicial de la biomasa presenta variaciones debido a las condiciones previamente mencionadas, particularmente relacionadas con la compactación de la muestra dentro del reactor.

**Tabla 13**

*Resultados de pruebas finales de gasificación*

Resultados de pruebas finales					
N° prueba	Flujo de gas $\left[\frac{m}{s}\right]$	Flujo de aire $\left[\frac{m}{s}\right]$	Masa de la biomasa [g]	Masa de la biomasa final [g]	Fracción sólida %
1	1,27	4,1	1252	600	49,92
2	1,5	5	1186	288	24,28
3	1,7	5,7	1300	378	29,08

De la tabla anterior se observa que la prueba N°1 presentó el mayor rendimiento de fracción sólida, con un porcentaje cercano al 50 %, bajo la condición de flujo de gas más bajo. Este comportamiento sugiere que una menor velocidad del flujo de gas favorece la retención de carbono en forma de biocarbón, posiblemente debido a un menor arrastre de partículas hacia las zonas de oxidación. Este fenómeno ha sido documentado en la literatura científica. Por ejemplo, You et al. (2017) destacan que la disminución en la velocidad del flujo de gas durante el proceso de gasificación limita el transporte de partículas hacia áreas de oxidación, minimizando así su conversión no deseada en productos gaseosos o cenizas.

Por otro lado, la prueba N°2 arrojó el menor rendimiento de fracción sólida, alcanzando un valor del 24,28 % con condiciones intermedias de flujo de gas y aire. Aunque la prueba N°3 presentó un rendimiento ligeramente superior, con un 29,08 %, ambas condiciones resultaron en

valores por debajo del 30 %, lo que se considera un porcentaje de bajo rendimiento. Esto indica que las condiciones de flujo de gas más elevadas podrían no ser ideales para maximizar la producción de biocarbón, resaltando la importancia de un control preciso de los parámetros operativos en el proceso de gasificación.

#### 4.6 Caracterización de los biocarbones

Los biocarbones obtenidos fueron identificados y caracterizados mediante análisis próximo, elemental y la determinación de su poder calorífico. Para el biocarbón generado mediante pirólisis, se seleccionó la fracción sólida con el mayor rendimiento, correspondiente a la obtenida a una temperatura de residencia de 300 °C y una tasa de calentamiento de 20 °C/min. Por otro lado, en el caso del biocarbón producido mediante gasificación, se eligió la fracción sólida con el mayor rendimiento, obtenida bajo las condiciones operativas de 1,27 m/s de flujo de gas y 4,1 m/s de flujo de aire.

##### 4.6.1 Análisis elemental

El análisis elemental fue realizado en un laboratorio externo, específicamente por el grupo QUIREMA, cuyos resultados se detallan en la Tabla 14. En esta tabla se presentan los porcentajes de carbono, hidrógeno y nitrógeno en las muestras analizadas. Cabe destacar que el valor reportado para el componente de azufre (S) fue de 0 %, y el porcentaje de oxígeno (O) se calculó por diferencia a partir de los demás elementos.

**Tabla 14**

*Resultados del análisis elemental de los biocarbones de pirólisis y gasificación*

<b>Análisis elemental</b>				
Biocarbón	Carbono (%)	Hidrógeno (%)	Nitrógeno (%)	Oxígeno (%)
Pirólisis	61,4	5,95	1,75	30,9
Gasificación	68,9	6,05	1,85	23,2

Los resultados del análisis elemental de los biocarbones obtenidos mediante pirólisis y gasificación muestran diferencias significativas respecto a los valores obtenidos en la biomasa utilizada para estos procesos. El contenido de carbono en el biocarbón de gasificación alcanzó un 68,90 %, mientras que el biocarbón de pirólisis presentó un 61,40 %. Este incremento en el carbono fijo del biocarbón de gasificación es atribuible a las altas temperaturas y la oxidación parcial características del proceso, que eliminan componentes volátiles y oxígeno, concentrando el carbono estructuralmente estable. Estudios como el de Batista y Gomes (2021) confirman que parámetros del proceso, como la temperatura y el tiempo de residencia, influyen directamente en el contenido de carbono fijo del biocarbón, mostrando que la gasificación produce materiales con mayor estabilidad química y menor contenido de volátiles debido a estas condiciones.

Por otro lado, el contenido de hidrógeno en los biocarbones obtenidos mediante pirólisis y gasificación mostró valores muy similares, alcanzando 5,95 % y 6,05 %, respectivamente. Esto indica que, durante los procesos termoquímicos, una fracción considerable del hidrógeno presente en la biomasa original se retiene en los productos finales. Según Alvarado-Flores et al. (2024), los procesos de pirólisis y gasificación son eficaces en preservar el hidrógeno contenido en la biomasa, lo cual aumenta el valor energético de los biocarbones y otros productos generados.

En cuanto al nitrógeno, ambos biocarbones mostraron un aumento respecto a la biomasa inicial, alcanzando valores de 1,75 % y 1,85 % para los procesos de pirólisis y gasificación, respectivamente. Este incremento puede atribuirse a la concentración de compuestos nitrogenados en la fracción sólida remanente tras la eliminación de materia volátil. Según Li et al. (2019), durante los procesos termoquímicos como la pirólisis, la eliminación de compuestos volátiles y oxígeno conduce a una mayor concentración relativa de nitrógeno en el biocarbón. Aunque este

contenido de nitrógeno podría ser beneficioso en aplicaciones agrícolas como biofertilizantes, también es importante considerar su impacto potencial en la formación de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) durante su combustión.

Finalmente, el oxígeno mostró una reducción significativa en ambos biocarbones. En el biocarbón de pirólisis, el contenido de oxígeno fue de 30,90 %, mientras que en el de gasificación disminuyó a 23,20 %. Esta reducción es característica de los procesos termoquímicos, donde se eliminan compuestos oxigenados como agua y otros volátiles. Un menor contenido de oxígeno es indicativo de un material más estable y con mayor densidad energética. Según Wang et al. (2017), durante los procesos de pirólisis, la eliminación de compuestos oxigenados debido a las altas temperaturas contribuye a la estabilidad química del biocarbón.

Otro valor derivado del análisis elemental es la relación hidrógeno-carbono (H/C), la cual es un indicador clave de la calidad del biocarbón y su eficiencia en diversas aplicaciones. Esta relación proporciona información sobre la aromaticidad y la estabilidad química del material. Valores más bajos de H/C están asociados con biocarbones altamente carbonizados, que poseen mayor estabilidad estructural y son más efectivos para aplicaciones de captura de carbono y enmienda de suelos debido a su resistencia a la descomposición. Según Leng et al. (2019), esta estabilidad se debe a la mayor proporción de carbono aromático en biocarbones con baja relación H/C, lo que mejora la captura de carbono y enmienda de suelos, debido a su resistencia a la descomposición.

#### ***4.6.2 Análisis próximo***

El análisis próximo se llevó a cabo en base húmeda, siguiendo la metodología previamente descrita. En la Tabla 15 se presentan los valores obtenidos para materia volátil, cenizas, humedad y carbono fijo de los biocarbones generados durante las pruebas de gasificación y pirólisis. Cabe

destacar que el contenido de carbono fijo se calculó por diferencia, considerando los valores de los demás componentes.

**Tabla 15**

*Resultados del análisis próximo de los biocarbones de pirólisis y gasificación*

<b>Análisis próximo</b>				
Biocarbón	Humedad	Cenizas	Materia Volátil	Carbono Fijo
Pirólisis	0,7629%	5,5626%	55,8019%	37,8726%
Gasificación	3,7341%	5,4273%	32,8489%	57,9897%

Según la norma ASTM D388-23, la materia volátil, junto con el carbono fijo, desempeña un papel fundamental en la clasificación de los carbones según su rango. Este criterio es especialmente relevante para los carbones de alto rango, como las antracitas y los carbones bituminosos con bajo y medio contenido de volátiles.

El contenido de materia volátil también influye significativamente en el proceso de encendido y combustión del carbón. En carbones con un bajo contenido de volátiles (< 20 %, en base libre de cenizas y humedad), es necesario un paso de precalentamiento adicional para lograr su encendido, debido a su menor reactividad inicial.

En los resultados obtenidos en este trabajo, se observa que el biocarbón producido por gasificación presenta un contenido de volátiles inferior al del biocarbón producido por pirólisis. Este menor contenido de volátiles convierte al biocarbón de gasificación en una opción de mayor calidad para aplicaciones que requieren una mayor demanda energética. Esto concuerda con lo expuesto por Díaz y Neira (2021), quienes establecen una relación inversamente proporcional entre

el poder calorífico y el contenido de volátiles: a mayor cantidad de volátiles, menor será el contenido de poder calorífico.

Además, lo anterior se respalda no solo con los resultados obtenidos en esta investigación, sino también con lo indicado por Survey (s.f.), quien señala que, a medida que los volátiles son expulsados de la matriz del carbón, el nivel de carbono fijo aumenta, mejorando así su capacidad energética.

Por otro lado, el contenido de carbono fijo es un parámetro clave en la caracterización del biocarbón, ya que está directamente relacionado con su capacidad de captura de carbono y su estabilidad a largo plazo en aplicaciones agrícolas y ambientales. Los biocarbones con un alto contenido de carbono fijo tienen la capacidad de permanecer en el suelo durante largos periodos, contribuyendo a la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero y fomentando la captura de carbono a largo plazo.

En este estudio, los resultados reflejan una diferencia significativa en el contenido de carbono fijo entre los biocarbones obtenidos por gasificación y pirólisis. El biocarbón generado por gasificación presenta un contenido de carbono fijo del 57,98 %, mientras que el biocarbón producido por pirólisis alcanza un 37,87 %. Este mayor contenido en el biocarbón de gasificación puede atribuirse a las diferencias en las condiciones operativas de ambos procesos. La gasificación, al operar a temperaturas más altas, favorece la conversión de la materia volátil en gases de síntesis, dejando una fracción sólida rica en carbono fijo. Según Ahmad et al. (2020), las temperaturas más elevadas características de la gasificación promueven la eliminación de materia volátil, resultando en un biocarbón con mayor contenido de carbono fijo.

Por otro lado, el biocarbón de pirólisis, producido a temperaturas más bajas, conserva una mayor fracción de materia volátil. Esto puede ser beneficioso en ciertas aplicaciones, como

enmiendas de suelo, donde la materia volátil puede contribuir a la actividad microbiana. Según Gul et al. (2015), los compuestos orgánicos de bajo peso molecular presentes en la materia volátil del biocarbón actúan como una fuente de carbono accesible para los microorganismos, promoviendo su actividad y abundancia. Sin embargo, este mayor contenido de materia volátil resulta menos eficiente para la captura y almacenamiento de carbono a largo plazo debido a su menor estabilidad química.

En comparación con datos reportados por otros autores, los valores obtenidos en este estudio son consistentes con rangos típicos para biocarbones lignocelulósicos. Estudios previos han señalado que el contenido de carbono fijo en biocarbones generados por gasificación tiende a ser más alto debido a las condiciones térmicas y de oxidación parciales que promueven la estabilidad estructural del carbono.

Para finalizar, los contenidos de cenizas encontrados en los dos biocarbones presentan valores muy similares, que oscilan entre 5,4 % y 5,6 %. La similitud en los contenidos de cenizas puede estar asociada a la composición inicial de la biomasa utilizada, dado que los procesos termoquímicos tienen un impacto limitado en la eliminación de material inorgánico.

#### ***4.6.3 Poder calorífico***

Los pasos metodológicos utilizados para la prueba de poder calorífico del biocarbón siguieron los mismos procedimientos aplicados previamente a la biomasa, con el objetivo de obtener el poder calorífico neto de las muestras analizadas. Las mediciones se realizaron de acuerdo con las normas ASTM D2015 y ASTM D5865, garantizando la correcta ejecución de las pruebas. El valor de poder calorífico determinado para el biocarbón obtenido mediante pirólisis lenta fue de **23,8016 MJ/kg**.

En el estudio realizado por Urien, A. (2013), al someter una biomasa de madera de abeto a un proceso de pirólisis a 400 °C, se obtuvo un rendimiento másico del 26,4 % y un poder calorífico cercano a 30 MJ/kg. Cabe destacar que la biomasa inicial tenía un valor energético más alto y que, a temperaturas mayores, como 600 °C, los biocarbones obtenidos presentaban un mayor contenido de carbono fijo, lo que se reflejaba en valores energéticos superiores.

Por otro lado, el biocarbón generado mediante gasificación alcanzó un poder calorífico neto de **25,7618 MJ/kg**, lo que demuestra su alta capacidad como fuente de energía renovable. Sin embargo, el grupo Quirema de la Universidad de Antioquia, en un análisis de una muestra similar, es decir, una muestra perteneciente a las mismas condiciones, pero de una zona distinta dentro del volumen del reactor, reportó un valor de  $15,755 \pm 0,690$  MJ/kg, indicando posibles variaciones en el proceso experimental. Mendoza et al. (2012), al realizar procesos de degradación térmica sobre una biomasa de características energéticas similares al tallo de palma, obtuvieron biocarbones con valores de poder calorífico entre 25 y 26,8 MJ/kg, lo que sugiere que el valor inicial obtenido para el biocarbón de gasificación corresponde a un proceso de gasificación completo.

Es importante señalar que la gasificación desarrollada en este trabajo implica un proceso de calentamiento heterogéneo, lo que puede afectar la calidad de los resultados dependiendo de la zona de la muestra analizada, generando variaciones significativas en las propiedades del biocarbón. En contraste, el proceso de pirólisis presenta un calentamiento más homogéneo, lo que favorece una mayor uniformidad en las propiedades del producto final. Garantizando condiciones óptimas en el reactor de gasificación, es posible obtener biocarbones con valores energéticos comparables a los de la pirólisis.

#### **4.7 Clasificación de biocarbones**

#### 4.7.1 Clasificación de biocarbones por rango

La clasificación se llevó a cabo siguiendo la norma ASTM D388-23 y con los resultados del análisis próximo y poder calorífico.

Para la clasificación la norma dicta que según las propiedades del carbón en cantidad de materia volátil y carbono fijo como en poder calorífico se puede nombrar la carbón.

En la Tabla 16 se observan la información resumida de los biocarbones de pirólisis y de gasificación y en la Tabla 17 se pueden observar una tabla de resumen para la clasificación según norma.

**Tabla 16**

*Resumen clasificación de biocarbones*

<b>Biocarbón</b>	<b>Materia volátil %</b>	<b>Carbono Fijo %</b>	<b>Poder calorífico MJ/Kg</b>	<b>Poder calorífico BTU/Lb</b>
Pirólisis	55,8019	37,8019	23,8016	10232,8461
Gasificación	32,8489	57,9897	25,7618	11075,5804

*Nota.* El factor de conversión a BTU/Lb fue multiplicar cada MJ/Kg por 429,9226 aproximadamente.

**Tabla 17**

*Clasificación de carbones por rango*

<b>Clasificación</b>	<b>Materia volátil %</b>	<b>Carbono Fijo %</b>	<b>Poder calorífico MJ/Kg</b>	<b>Poder calorífico BTU/Lb</b>
Antracita	2-14	86-98		
Bituminoso	14-31	69-78	24,418-32,557	10500-14000
Subbituminoso			19,3-24,418	8300-10500
Lignito			14,65-19,3	6300-8300

*Nota.* La anterior tabla resume la información de la tabla 1 de la norma ASTM D388-23.

A partir de las tablas presentadas, se identificó que el biocarbón obtenido por pirólisis es un combustible más rico en materia volátil en comparación con su contenido de carbono fijo. Además, su valor energético lo clasifica como un carbón subbituminoso, y específicamente, según los datos complementarios de la tabla, corresponde al tipo A.

Por otro lado, el biocarbón producido mediante gasificación mostró una mayor proporción de carbono fijo frente a su contenido de volátiles, junto con un valor energético superior. Estas características lo posicionan dentro del rango de carbones bituminosos, clasificado como tipo C de rango bajo, debido a que no cumple con las proporciones más estrictas entre carbono fijo y materia volátil necesarias para clasificaciones de mayor rango.

En términos generales, los resultados demuestran que ambos tipos de biocarbón poseen propiedades similares, con valores energéticos que varían ligeramente. Las principales diferencias radican en las proporciones de carbono fijo y materia volátil. Según Díaz (2021), los carbones subbituminosos tipo A, al contener más del 40 % de materia volátil, ofrecen una ignición segura y una combustión rápida; sin embargo, esta característica también contribuye a una mayor generación de emisiones. Estos carbones son ampliamente utilizados en la industria de generación eléctrica debido a su bajo costo, aunque no se recomiendan para procesos que requieran alta densidad energética debido a su limitado contenido de carbono.

Por su parte, Speight (2020) destaca que los carbones bituminosos presentan una mayor capacidad energética gracias a su contenido de carbono fijo, que oscila entre el 50 % y el 60 %. Esta característica, junto con un contenido moderado de volátiles, permite una ignición estable y los hace versátiles para diversos usos. Además de su aplicación en la generación de energía

eléctrica, los carbones bituminosos pueden ser empleados en procesos que demandan mayor energía, como la producción de coque. No obstante, para este propósito se recomienda combinarlos con carbones de mayor rango para mejorar su desempeño.

#### ***4.7.2 Relación H/C***

La relación molar H/C es un parámetro fundamental en la caracterización de biocarbones, ya que refleja su grado de carbonización y, por consiguiente, su estabilidad química y estructural. De acuerdo con los estándares del European Biochar Certificate (EBC), un biocarbón es considerado apto para aplicaciones de captura de carbono y enmiendas agrícolas sostenibles si su relación H/C es inferior a 0,7.

En este estudio, los biocarbones obtenidos presentan relaciones H/C de 1,05 para el biocarbón de gasificación y 1,15 para el de pirólisis, valores superiores al umbral establecido por el EBC. Esto indica que ninguno de los biocarbones cumple con los criterios de certificación para captura de carbono, ya que su grado de carbonización es menor y su estabilidad estructural es relativamente más baja.

## 5. Conclusiones

Se determinó la composición del tallo residual de palma aceitera mediante análisis próximo, encontrando un contenido de materia volátil cercano al 75 %, clasificándolo como una biomasa lignocelulósica. Además, el análisis elemental permitió caracterizar sus propiedades fisicoquímicas, destacando su contenido de hidrógeno y nitrógeno, lo que valida su potencial para procesos de pirólisis lenta y gasificación.

En el proceso de pirólisis lenta, y como parte del diseño experimental, se determinó que empleando una temperatura de residencia de 300 °C y una tasa de calentamiento de 20 °C/min, se obtuvo un rendimiento máximo del 50 %. Este comportamiento resalta que, a bajas temperaturas de residencia y con una velocidad de calentamiento media, se favoreció la producción de biocarbón, optimizando su rendimiento energético y composición final.

Se caracterizó el bioaceite obtenido a partir del proceso de pirólisis lenta, determinando su viscosidad cinemática y densidad. Los resultados evidenciaron que la mayor producción de esta fracción se obtuvo bajo condiciones de alta temperatura de residencia (400 °C) y una elevada tasa de calentamiento (30 °C/min).

Se concluye que una menor velocidad del flujo de gas favorece la retención de carbono en forma de biocarbón, dado que el rendimiento máximo en el proceso de gasificación se obtuvo con la combinación de un flujo de gas de 1,27 m/s y un flujo de aire de 4,1 m/s.

Los biocarbones obtenidos muestran comportamientos similares en cuanto a su contenido de humedad y cenizas. Pese a ello, las variaciones de las condiciones aplicadas durante los procesos de pirólisis lenta y gasificación generaron diferencias significativas en sus valores energéticos, así como en los porcentajes de materia volátil y carbono fijo. Estas diferencias permiten clasificar cada biocarbón de manera específica: el biocarbón producido mediante pirólisis

lenta se clasifica como un subbituminoso tipo A, mientras que el biocarbón obtenido por gasificación corresponde a un bituminoso tipo C, según la norma ASTM D388.

A pesar de que ambos procesos obtuvieron un rendimiento másico similar, el proceso de gasificación presentó un valor energético superior, lo que lo posiciona como la alternativa más viable desde el punto de vista energético, sin embargo, este valor no es homogéneo en toda la fracción sólida obtenida. Por el contrario, el biocarbón generado mediante pirólisis lenta presentó una composición homogénea en toda su fracción sólida, lo que lo convierte en la alternativa más eficiente y adecuada en términos de cantidad para la producción de biocarbón.

## 6. Recomendaciones

El presente estudio compara los procesos de pirólisis y gasificación, destacando las limitaciones observadas en los equipos utilizados, particularmente en el reactor de gasificación. Este último presenta una reacción no homogénea en todo su volumen, lo que resulta en la obtención de diferentes tipos de biocarbón según la zona del reactor. Por lo tanto, se recomienda el uso de un reactor de gasificación que garantice condiciones homogéneas y permita un monitoreo más preciso de la temperatura, a fin de obtener resultados más fiables y consistentes del proceso.

Para estudios futuros, se recomienda realizar análisis más detallados de la composición de los biocarbones, incluyendo aquellos necesarios para cumplir con los requisitos de certificación del European Biochar Certificate (EBC). Estos análisis deben abarcar:

1. Análisis de cenizas: Determinar la composición mineral de las cenizas, incluyendo elementos como calcio, potasio, magnesio, hierro y otros metales traza que puedan influir en la calidad del biocarbón.
2. Contenido de carbono orgánico (TOC): Evaluar la fracción de carbono estable presente en el biocarbón, que es clave para certificar su capacidad como sumidero de carbono.
3. Contenido de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs): Determinar la concentración de compuestos tóxicos, asegurando que los niveles cumplan con los límites establecidos por la normativa EBC.
4. Evaluación de metales pesados: Cuantificar elementos como cadmio, plomo, mercurio y arsénico, para garantizar la seguridad del biocarbón en aplicaciones agrícolas y ambientales.
5. Capacidad de retención de agua (WHC): Analizar la capacidad del biocarbón para mejorar la estructura del suelo mediante la retención de agua.

6. Capacidad de intercambio catiónico (CEC): Medir la capacidad del biocarbón para mejorar la fertilidad del suelo al retener y liberar nutrientes de manera eficiente.

**Referencias bibliográficas**

- Afanasjeva, N., Castillo, L. C., & Sinisterra, J. C. (2017). Lignocellulosic biomass. Part I: Biomass transformation. *Journal of Science with Technological Applications*, 3, 27–43.  
<https://doi.org/10.34294/j.jsta.17.3.22>
- Ahmad, J., Patuzzi, F., Rashid, U., Shahabz, M., Ngamcharussrivichai, C., & Baratieri, M. (2021). Exploring untapped effect of process conditions on biochar characteristics and applications. *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101310.  
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101310>
- Altamirano, Kevin & Adden, Kimberly & Diego, Luis & Briones Elizondo, Jorbri & Mora, Karina. (2017). Evaluación de la tensión elástica de papel elaborado a partir de residuos orgánicos. *Revista Ingeniería*. 28. 29. 10.15517/ri.v28i1.30587.  
[https://www.researchgate.net/publication/323353641\\_Evaluacion\\_de\\_la\\_tension\\_elastica\\_de\\_papel\\_elaborado\\_a\\_partir\\_de\\_residuos\\_organicos](https://www.researchgate.net/publication/323353641_Evaluacion_de_la_tension_elastica_de_papel_elaborado_a_partir_de_residuos_organicos)
- Alvarado-Flores, J., Alcaraz-Vera, J., Ávalos-Rodríguez, M., Guzmán-Mejía, E., Rutiaga-Quiñones, J., Pintor-Ibarra, L., & Guevara-Martínez, S. (2024). Thermochemical Production of Hydrogen from Biomass: Pyrolysis and Gasification. *Energies*, 17(2), 537.  
<https://doi.org/10.3390/en17020537>
- Andrés, R. R. S., Cárdenas-Gutiérrez, J. A., & Piero, R. S. J. (2018, 1 julio). *Poder calorífico de la cascarilla de arroz usada como combustible en hornos de secado*.  
<http://repositorio.ufps.edu.co/handle/ufps/1318>

- ANTIL, S., SACHDEVA, G., & SHARMA, A. (2023). Advancements and challenges in the fluidized bed gasification system: A comprehensive review. *Journal of Thermal Engineering*, 9(1), 233–246. <https://doi.org/10.18186/thermal.1245279>
- Ariadna, E. R., Guadalupe, P. L., Claudia, H. M., Jorge, L. C., Julio, C. A., Esteban, V. P., D, E. B. J., Ariadna, E. R., Guadalupe, P. L., Claudia, H. M., Jorge, L. C., Julio, C. A., Esteban, V. P., & D, E. B. J. (s. f.). *Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo*. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-57792016000300367](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000300367)
- Basu, P. (2013). Biomass Characteristics. En *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction* (pp. 47–86). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396488-5.00003-4>
- Batista, R. R., & Gomes, M. M. (2021). Effects of Chemical Composition and Pyrolysis Process Variables on Biochar Yields: Correlation and Principal Component Analysis. *Floresta e Ambiente*, 28(3). <https://doi.org/10.1590/2179-8087-floram-2021-0007>
- Bhoi, P. R., & Channiwala, S. A. (2009). Emission characteristics and axial flame temperature distribution of producer gas fired premixed burner. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 469–477. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.002>
- CARRANZA ROJAS, E. M. (2015). *PIRÓLISIS DE LA FIBRA DE LA PALMA AFRICANA DE ACEITE*. UNIVERSIDAD DE LOS ANDES.
- Casoni, A. I. (2017). Pirólisis de biomasa residual abundante en la región sur de la provincia de Buenos Aires para la obtención de productos de alto valor agregado. <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/4172>

- Chaves, K. R. A., Pinnock, K. A., Salazar, L. D. M., Elizondo, J. B., & Mora, K. R. (2017). Evaluación de la tensión elástica de papel elaborado a partir de residuos orgánicos. *Ingeniería*, 28(1), 29. <https://doi.org/10.15517/ri.v28i1.30587>
- Cortés, C., Cayón, D., Aguirre, V., & Chaves, B. (2006). RESPUESTAS DE PALMAS DE VIVERO A LA APLICACIÓN DE RESIDUOS DE LA PLANTA EXTRACTORA. *Palmas*, 23-32.
- Crombie, K., Mašek, O., Sohi, S. P., Brownsort, P., & Cross, A. (2013). The effect of pyrolysis conditions on biochar stability as determined by three methods. *GCB Bioenergy*, 5(2), 122–131. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12030>
- de-Lucas, A., Taranco, C., Rodríguez-García, E., & Paniagua, P. (2012). *Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad*.
- Demirbaş, A. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 42(11), 1357–1378. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00137-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00137-0)
- Díaz, J., & Neira, M. (2021). *Propiedades térmicas y clasificación de carbones sub-bituminosos*. *Revista de Combustibles Sólidos*, 12(3), 45-58.
- Díaz O., D. A & Neira C., J. E. (2021). Clasificación y análisis de la materia volátil en carbones y su relación con las demás propiedades, en un estudio de 26 muestras. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia facultad – seccional Sogamoso ingeniería de minas-carbones. <https://www.studocu.com/co/document/universidad-pedagogica-y-tecnologica-de-colombia/carbones-y-coquizacion/clasificacion-y-analisis-de-la-materia-volatill-en-una-muestra-de-26-carbones-colombianos/18947955>

- Duplicación. (2022, 27 octubre). *Viscosidades cinemáticas de algunos líquidos comunes*. - Duplicación - Equipos Neumáticos. Duplicación - Equipo Neumático. <https://duplacao.com.br/viscosidades-cinematicas-de-alguns-liquidos-comuns/?lang=es>
- Elbersen, W. (2013). Making Palm Oil Residues Available for the Biobased Economy while Recycling Nutrients. *Palmas*, 56-65.
- FAO. (s. f.). Food And Agriculture Organization Of The United Nations. <https://www.fao.org/sustainability/news/detail/es/c/1279267/#:~:text=Tendencias%20mundiales,y%20pastizales%20para%20el%20pastoreo>
- Fedepalma. (Febrero de 2024). *Fedepalma* . Obtenido de <https://fedepalma.org/zonas-palmeras/zona-norte/>
- García N., J. A., García P., M., & Das, K. C. (2008). Determinación de los parámetros cinéticos de degradación térmica de los subproductos de las plantas de beneficio mediante análisis termogravimétrico y calorimetría de barrido diferencial. *Palmas*, 29(4), 31–46. Recuperado a partir de <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1362>
- Guerra, J., Rosales, M., Suárez, G., & Strubinger, A. ESTUDIO DE PROCESOS TÉRMICOS PARA BIORREFINACIÓN DE RESIDUOS DE MAÍZ CARACTERÍSTICO DE VENEZUELA.
- Gul, S., Whalen, J. K., Thomas, B. W., Sachdeva, V., & Deng, H. (2015). Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 206, 46–59. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.015>

- Hames, B. R. (2009). *Biomass Compositional Analysis for Energy Applications* (pp. 145–167).  
[https://doi.org/10.1007/978-1-60761-214-8\\_11](https://doi.org/10.1007/978-1-60761-214-8_11)
- Jardón-Medina, A. G., & Ortiz-Fernández, A. (2022). Obtención y caracterización de biocarbón a partir de *Eichhornia crassipes* usando un prototipo de reactor de pirólisis solar. *Revista de Ciencias Ambientales*, 57(1), 1-23. <https://doi.org/10.15359/rca.57-1.13>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). Biochar for environmental management: An introduction. Biochar for environmental management. Science and technology. *Earthscan Publishers Ltd.*
- Leng, L., Huang, H., Li, H., Li, J., & Zhou, W. (2019). Biochar stability assessment methods: A review. *Science of The Total Environment*, 647, 210–222.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.402>
- Li, S., Harris, S., Anandhi, A., & Chen, G. (2019). Predicting biochar properties and functions based on feedstock and pyrolysis temperature: A review and data syntheses. *Journal of Cleaner Production*, 215, 890–902. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.106>
- López Balbiaux, N., & Lemus Neri, V. H. (s/f). *Análisis Elemental*. Recuperado el 22 de enero de 2025, de <https://quimica.unam.mx/investigacion/servicios-para-la-investigacion/usaii/analisis-elemental/>
- López López, G. A. (2018). *Predicción del análisis próximo de carbones colombianos mediante espectroscopía FTIR-DR en la región del infrarrojo medio utilizando mínimos cuadrados parciales*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD.  
<https://repository.unad.edu.co/handle/10596/20426>

- Klug, M. (2012, 16 abril). *Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa*.  
<https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/5547>
- Mettler-Toledo International Inc. all rights reserved. (2022, 11 julio). *Análisis termogravimétrico (TGA)*. Mettler-Toledo International Inc. All Rights Reserved.  
[https://www.mt.com/es/es/home/library/on-demand-webinars/lab-analytical-instruments/Thermogravimetric\\_Analysis.html#:~:text=El%20an%C3%A1lisis%20termogravim%C3%A9trico%20\(TGA\)%20se%20usa%20para%20caracterizar%20las%20propiedades,el%20desarrollo%20y%20la%20investigaci%C3%B3n](https://www.mt.com/es/es/home/library/on-demand-webinars/lab-analytical-instruments/Thermogravimetric_Analysis.html#:~:text=El%20an%C3%A1lisis%20termogravim%C3%A9trico%20(TGA)%20se%20usa%20para%20caracterizar%20las%20propiedades,el%20desarrollo%20y%20la%20investigaci%C3%B3n).
- Millán, L. M. R., Domínguez, M. A. C., & Vargas, F. E. S. (2016). Effect of temperature on energy potential of pyrolysis products from oil palm shells. DOAJ (DOAJ: Directory Of Open Access Journals). <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a06>
- Munar-Flórez, D. A., Ramírez-Contreras, N. E., & García-Núñez, J. A. (2022). *Biocarbón como producto de la biomasa residual de palma de aceite en un concepto de economía circular*.  
[www.cenipalma.org](http://www.cenipalma.org)
- OPSAA. (2024, 3 enero). <https://opsaa.iica.int/resource-1366-produccion-agricola-mundial,-uso-y-productividad,-1961-2020>
- Ordóñez, Y. J. R., & Tannous, K. K. (2017). Análisis cinético de la descomposición térmica de biomásas aplicando un esquema de reacciones paralelas independientes. *Revista UIS Ingenierías*, 16(2), 119-128. <https://doi.org/10.18273/revuin.v16n2-2017011>
- Orfão, J., Antunes, F., & Figueiredo, J. (1999). Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials—three independent reactions model. *Fuel*, 78(3), 349-358. [https://doi.org/10.1016/s0016-2361\(98\)00156-2](https://doi.org/10.1016/s0016-2361(98)00156-2)

Orozco, L. M., Mejía, J. A., Cardona, S. M., & Pérez-Rodríguez, C. P. (2023). Gasificación con aire de hojas y tallo de palma de aceite y determinación de su potencial para la generación de energía eléctrica. *Información tecnológica*, 34(3), 57–68. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642023000300057>

*Poder calorífico* / *Vaillant*. (s. f.). <https://www.vaillant.es/servicios/temas-de-ayuda/glosario/poder-calorifico/>

Primagas. (s. f.). ¿Qué es el poder calorífico? ¿Cuál es el poder calorífico del gas propano? *Primagas*. [https://www.primagas.es/blog/que-es-poder-calorifico#:~:text=%C2%BFC%C3%B3mo%20se%20mide%20el%20poder,1%20\(en%20combustible%20%C3%ADquido\).](https://www.primagas.es/blog/que-es-poder-calorifico#:~:text=%C2%BFC%C3%B3mo%20se%20mide%20el%20poder,1%20(en%20combustible%20%C3%ADquido).)

Producción agrícola mundial. (Octubre de 2023). *Producción agrícola mundial.com*. Obtenido de <http://www.produccionagricolamundial.com/cultivos/aceitedepalma.aspx>

Razuan, R., Sulaiman, M., Darus, F., Mahmud, M., & Abu Bakar, N. (2006). *PYROLYSIS OF OIL PALM TRUNK (OPT)*.

*Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 6(1), 43. <https://doi.org/10.25127/aps.20221.854>

Ritchie, H., & Roser, M. (2024, 16 febrero). *Land use*. Our World In Data. <https://ourworldindata.org/land-use>

Roddy, D. J., & Manson-Whitton, C. (2012). Biomass Gasification and Pyrolysis. En *Comprehensive Renewable Energy* (pp. 133–153). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00514-X>

Sánchez Alfonso, R. A., Aguiar Urriago, L. M., Uribe Aldana, N., & Rojas Forero, A. Y. V. (2017).

Modelo para la gasificación del cuesco de palma aceitera. *Ingenium*, 18(36), 81–100.

Shahbeig, H., Shafizadeh, A., Rosen, M. A., & Sels, B. F. (2022). Exergy sustainability analysis

of biomass gasification: a critical review. *Biofuel Research Journal*, 9(1), 1592–1607.

<https://doi.org/10.18331/BRJ2022.9.1.5>

Speight, J. G. (2020). *The chemistry and technology of coal* (3rd ed.). CRC Press.

Suaza M., Andrea & Forero-Nuñez, C. & Vargas, F. & Fajardo, C. & Rivera, J. (2012). Estudio

Preliminar del Potencial energético de Cuesco de Palma y Cascara de Coco en Colombia.

Revista de la Facultad de Ingenieria. 8. 19-25.

Survey, K. G. (s. f.). *Volatile Matter (Part of Proximate Analysis), Coal Analysis, Kentucky*

*Geological Survey, University of Kentucky.* [https://www.uky-](https://www.uky.edu.translate.googleusercontent.com/translate/g/KGS/coal/coal-analyses-volatile-matter.php?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sge#:~:text=Volatile%20matter%20is%20one%20of,a%20coal%20sample%20during%20heating.)

[edu.translate.googleusercontent.com/translate/g/KGS/coal/coal-analyses-volatile-](https://www.uky.edu.translate.googleusercontent.com/translate/g/KGS/coal/coal-analyses-volatile-matter.php?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sge#:~:text=Volatile%20matter%20is%20one%20of,a%20coal%20sample%20during%20heating.)

[matter.php?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=sge#:~:text=Volatile%20](https://www.uky.edu.translate.googleusercontent.com/translate/g/KGS/coal/coal-analyses-volatile-matter.php?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sge#:~:text=Volatile%20matter%20is%20one%20of,a%20coal%20sample%20during%20heating.)

[matter%20is%20one%20of,a%20coal%20sample%20during%20heating.](https://www.uky.edu.translate.googleusercontent.com/translate/g/KGS/coal/coal-analyses-volatile-matter.php?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sge#:~:text=Volatile%20matter%20is%20one%20of,a%20coal%20sample%20during%20heating.)

*Técnica Análisis Térmico / Termogravimetría (ATD, TG y DSC) (CAI Ciencias de la Tierra y*

*Arqueometría).* (s. f.). [https://cai.ucm.es/ciencias-tierra-arqueometria/tecnicas/analisis-](https://cai.ucm.es/ciencias-tierra-arqueometria/tecnicas/analisis-termico-termogravimetria-atd-tg-y-dsc/26/#:~:text=La%20termogravimetr%C3%ADa%20(TG)%20es%20la,la%20temperatura%20(diagramas%20isotermos).)

[termico-termogravimetria-atd-tg-y-](https://cai.ucm.es/ciencias-tierra-arqueometria/tecnicas/analisis-termico-termogravimetria-atd-tg-y-dsc/26/#:~:text=La%20termogravimetr%C3%ADa%20(TG)%20es%20la,la%20temperatura%20(diagramas%20isotermos).)

[dsc/26/#:~:text=La%20termogravimetr%C3%ADa%20\(TG\)%20es%20la,la%20temperat](https://cai.ucm.es/ciencias-tierra-arqueometria/tecnicas/analisis-termico-termogravimetria-atd-tg-y-dsc/26/#:~:text=La%20termogravimetr%C3%ADa%20(TG)%20es%20la,la%20temperatura%20(diagramas%20isotermos).)

[ura%20\(diagramas%20isotermos\).](https://cai.ucm.es/ciencias-tierra-arqueometria/tecnicas/analisis-termico-termogravimetria-atd-tg-y-dsc/26/#:~:text=La%20termogravimetr%C3%ADa%20(TG)%20es%20la,la%20temperatura%20(diagramas%20isotermos).)

Temarium. (2023, 24 agosto). 16. CALOR DE DESCOMPOSICION. *Bomberos Info.*

<https://www.bomberos.info/2023/03/curso-termodinamica-calor-de-descomposicion.html>

- Torres, D., & Bastidas, M. (2017). Análisis ambiental debido a la transición energética de la cascarilla de café: caso de estudio municipio de Villanueva, La Guajira. *Revista Agunkuyâa*, 7(1), 7-25. <https://doi.org/10.33132/27114260.1212>
- Urien, A. (2013). Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual.
- Vilca, K., Rodríguez, S., Atarama, U., Cueva, C., Concha, W. J., Atausupa, M. A., & Gosgot, W. (2022). Pirólisis: una revisión de conceptos y aplicaciones en la gestión de residuos sólidos.
- Wang, S., Dai, G., Yang, H., & Luo, Z. (2017). Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 62, 33–86. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.05.004>
- World Coal Association. (2022). *Coal classification and applications*. Retrieved from <https://www.worldcoal.org>
- Yahaya, A. Z., Somalu, M. R., Muchtar, A., Sulaiman, S. A., & Wan Daud, W. R. (2019). Effect of particle size and temperature on gasification performance of coconut and palm kernel shells in downdraft fixed-bed reactor. *Energy*, 175, 931–940. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.138>
- Yepes Maya, D. M., & Chejne Janna, F. (2012). Gasificación de biomasa residual en el sector floricultor, caso: Oriente Antioqueño. *Revista Ion*, 25(2), 49-55.
- You, S., Ok, Y. S., Chen, S. S., Tsang, D. C. W., Kwon, E. E., Lee, J., & Wang, C.-H. (2017). A critical review on sustainable biochar system through gasification: Energy and environmental applications. *Bioresource Technology*, 246, 242–253. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.177>

Zhang, Y., Wan, L., Guan, J., Xiong, Q., Zhang, S., & Jin, X. (2020). A Review on Biomass Gasification: Effect of Main Parameters on Char Generation and Reaction. *Energy & Fuels*, 34(11), 13438–13455. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c02900>

## Apéndices

### Apéndice A. Bitácora de análisis próximo de biocarbones

**Tabla A1**

*Resumen de datos de la prueba de humedad de biocarbón de pirólisis*

<b>Humedad</b>					
<b>Muestra</b>	<b>M. biomasa [g]</b>	<b>M. crisol [g]</b>	<b>M. total [g]</b>	<b>M. prueba [g]</b>	<b>%Humedad</b>
1	1.2017	18.131	19.3327	19.3185	1.1817%
2	1.229	18.2653	19.4943	19.4864	0.6428%
3	1.2135	17.8395	19.053	19.044	0.7417%
4	1.2152	19.2315	20.4467	20.4408	0.4855%

**Tabla A2**

*Resumen de datos de la prueba de cenizas de biocarbón de pirólisis*

<b>Cenizas</b>					
<b>Muestra</b>	<b>M. biomasa [g]</b>	<b>M. crisol [g]</b>	<b>M. total [g]</b>	<b>M. prueba [g]</b>	<b>%Cenizas</b>
1	1.0202	26.6967	27.7169	26.7664	6.0691%
2	1.0275	24.6245	25.652	24.6887	5.4853%
3	1.0985	27.0455	28.144	27.1111	5.2089%
4	1.0736	27.5132	28.5868	27.5803	5.4871%

**Tabla A3**

*Resumen de datos de la prueba de materia volátil de biocarbón de pirólisis*

<b>Mat. Volátil</b>					
<b>Muestra</b>	<b>M. biomasa [g]</b>	<b>M. crisol [g]</b>	<b>M. total [g]</b>	<b>M. prueba [g]</b>	<b>%Mat. Volátil</b>
1	1.0628	40.9656	42.0284	41.4482	54.5916%
2	1.062	41.6184	42.6804	42.0836	56.1959%
3	1.0994	42.0699	43.1693	42.543	56.9674%
4	1.0921	43.4504	44.5425	43.9369	55.45280%

**Tabla A4***Resumen de datos de la prueba de humedad de biocarbón de gasificación*

<b>Humedad</b>					
<b>Muestra</b>	<b>M. biomasa [g]</b>	<b>M. crisol [g]</b>	<b>M. total [g]</b>	<b>M. prueba [g]</b>	<b>%Humedad</b>
1	1.5069	19.2316	20.7385	20.677	4.0812%
2	1.5049	18.2659	19.7708	19.714	3.7743%
3	1.5047	17.8397	19.3444	19.2915	3.5157%
4	1.5062	19.3553	20.8615	20.8078	3.5653%

**Tabla A5***Resumen de datos de la prueba de cenizas de biocarbón de gasificación*

<b>Cenizas</b>					
<b>Muestra</b>	<b>M. biomasa [g]</b>	<b>M. crisol [g]</b>	<b>M. total [g]</b>	<b>M. prueba [g]</b>	<b>%Cenizas</b>
1	1.2044	24.6216	25.826	24.7248	4.8345%
2	1.1999	25.6067	26.8066	25.7230	5.9584%
3	1.2062	27.0374	28.2436	27.1507	5.6590%
4	1.2056	27.5074	28.713	27.6158	5.2573%

**Tabla A6***Resumen de datos de la prueba de materia volátil de biocarbón de gasificación*

<b>Mat. Volátil</b>					
<b>Muestra</b>	<b>M. biomasa [g]</b>	<b>M. crisol [g]</b>	<b>M. total [g]</b>	<b>M. prueba [g]</b>	<b>%Mat. Volátil</b>
1	1.0067	40.7122	41.7189	41.3876	32.9095%
2	1.0359	41.5461	42.582	42.2367	33.3333%
3	1.0231	43.0463	44.0694	43.7389	32.3038%
4	1.032	43.8505	44.8825	44.5419	33.0039%

**Apéndice B. Bitácora de pruebas de pirólisis**

**Figura B1**

*Registro de datos del diseño de experimentos y duplicado de pirólisis lenta.*

Toma de datos - pruebas reales																
#pruebas	Temperatura [°C]	V. de calentamiento [°C/min]	Peso 1 [g]	Peso 2 [g]	Peso 3 [g]	Peso muestra [g]	Tiempo. R [min]	Peso F. 1 [g]	Peso F. 2 [g]	Peso F. 3 [g]	P.F sólida [g]	P.F líquida [g]	Fracción T. [g]	Balance de masa [g]	%S	%L
1	300	30	166.5003	171.8559	86.0081	6.0009	45	169.2915	173.2714	86.1112	2.7912	1.5186	4.3098	1.6911	46.51%	25.31%
2	350	30	166.5867	171.8638	86.014	6.0072		168.758	173.8457	86.169	2.1713	2.1369	4.3082	1.699	36.14%	35.57%
3	400	30	166.5787	171.8881	86.0041	6.0045		168.4401	173.656	86.1885	1.8614	1.9523	3.8137	2.1908	31.00%	32.51%
4	300	20	166.6554	171.8435	86.0158	6.0058		169.6313	173.2114	86.0676	2.9759	1.4197	4.3956	1.6102	49.55%	23.64%
5	350	20	166.61	171.854	86.0147	6.0091		168.7357	173.4504	86.1576	2.1257	1.7393	3.865	2.1441	35.37%	28.94%
6	400	20	166.7036	171.859	86.0064	6.0046		168.518	173.9285	86.288	1.8144	2.3511	4.1655	1.8391	30.22%	39.15%
7	300	10	166.8437	171.8559	86.0139	6.0077		169.8048	173.1996	86.0831	2.9611	1.4129	4.374	1.6337	49.29%	23.52%
8	350	10	167.5502	171.8512	86.0134	6.009		169.0071	174.0005	86.1103	1.4569	2.2462	3.7031	2.3059	24.25%	37.38%
9	400	10	166.9091	204.0506	86.0251	6.0098		168.7428	206.1174	86.165	1.8337	2.2067	4.0404	1.9694	30.51%	36.72%
DUPLICADO																
10	300	30	166.8834	204.0448	86.0252	6.0056	45	169.8093	205.2335	86.0468	2.9259	1.2103	4.1362	1.8694	48.72%	20.15%
11	350	30	166.8535	204.9491	86.0241	6.004		169.0081	205.896	86.2221	2.1546	1.1449	3.2995	2.7045	35.89%	19.07%
12	400	30	167.0288	204.0525	86.0262	6.0012		168.7942	206.3256	86.1534	1.7654	2.4003	4.1657	1.8355	29.42%	40.00%
13	300	20	166.9809	204.0524	86.026	6.0062		170.0002	205.403	86.0502	3.0193	1.3748	4.3941	1.6121	50.27%	22.89%
14	350	20	167.0415	204.0475	86.0255	6.0014		169.116	205.9992	86.235	2.0745	2.1612	4.2357	1.7657	34.57%	36.01%
15	400	20	166.9925	204.0493	86.026	6.0052		168.7548	206.0973	86.2782	1.7623	2.3002	4.0625	1.9427	29.35%	38.30%
16	300	10	167.0654	204.0556	86.0271	6.0043		169.951	205.427	86.081	2.8856	1.4253	4.3109	1.6934	48.06%	23.74%
17	350	10	167.0411	204.0517	86.0249	6.0027		169.1529	205.7333	86.1732	2.1118	1.8299	3.9417	2.061	35.18%	30.48%
18	400	10	167.0245	204.0527	86.0218	6.0065		168.7945	206.325	86.2119	1.77	2.4624	4.2324	1.7741	29.47%	41.00%
8.1	350	10	167.0386	204.0535	86.0276	6	45	168.9997	206.223	86.1932	1.9611	2.3351	4.2962	1.7038	32.68%	38.92%
19	300	20	166.9307			7.314	45	170.4425			3.5118				48.01%	

**Peso 1.** Corresponde al peso del porta muestras vacío y, **peso F1** corresponde al porta muestra terminado el proceso.

**Peso 2.** Corresponde al peso del matraz de Erlenmeyer vacío y, **peso F2** corresponde al matraz finalizado el proceso.

**Peso 3.** Corresponde al peso del condensador vacío y, **peso F3** al peso del condensador al acabar la pirólisis.

**P. F sólida** corresponde a la cantidad de biocarbón resultante del proceso.

**P.F líquido** corresponde a la suma del bioaceite presentes en el matraz y del condensador.

**Fracción T.** es la suma de las fracciones líquidas y sólidas mientras que **Balance de masa** corresponde a la cantidad de gas producido.

Los porcentajes de rendimiento de biocarbón (%S) y bioaceite(%L) siguen la ecuación

$$\%R = m_f * 100 \% / m_o$$

Donde  $m_f$  es igual a P.F sólida o líquida según el rendimiento deseado y  $m_o$  es igual al peso de la muestra inicial.

**Apéndice C.** *Registro fotográfico del equipo y los implementos utilizados para las pruebas de pirólisis*

**Tabla C1**

*Implementos utilizados en el proceso de pirólisis lenta.*

---

Matraz de Erlenmeyer



---

Condensador

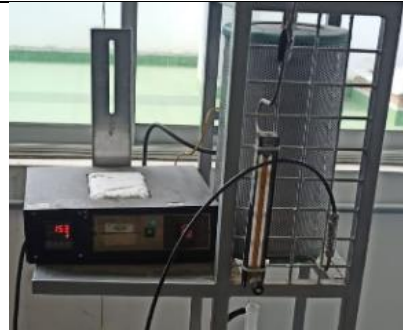


---

Porta muestra



Reactor de pirólisis



**Apéndice D.** *Registro fotográfico del sistema utilizado para gasificación*

**Figura D1**

*Montaje del reactor utilizado para las pruebas de gasificación*



**Apéndice E. Resultados enviados por el grupo QUIREMA de los diferentes análisis****Figura E1***Resultados de poder calorífico***Resultados de Análisis - CENIPALMA****Determinación del Poder Calorífico****Método:** Calorimétrico adiabático, adaptado de ASTM D-2015.**Equipo:** 6100-Parr

<b>Solicitante:</b> Cenipalma	<b>Número de muestras:</b> 2	
<b>Condiciones del análisis y reporte</b>  <b>Tipo de Muestras:</b> Biomasa, Carbonizados sólidos, identificados como pirólisis y gasificación.  Muestra analizada tal cual se recibió. Se reporta el valor promedio y el error.	<b>Correcciones por:</b>	
	Humedad	No
	Nitrógeno	No
	Azufre	No
	Hidrógeno	No
<b>Código suministrado</b>	<b>Valor promedio (kJ/kg)</b>	<b>Error (± kJ/kg)</b>
Biomasa	15642	6
B. Pirólisis	21410	198
B. Gasificación	15755	690

**Figura E2***Resultados de análisis próximo*

**Análisis Próximo**

**Método:** Análisis próximo para determinar humedad (105-110 °C), material volátil, carbono fijo y ceniza (750-950 °C) en atmósfera inerte (N<sub>2</sub>) y ceniza en aire.

**Equipo:** TA Instruments Q600

Muestra	Humedad @ 110°C (%)	Material Volátil 110 – 800 °C (%)	Carbono Fijo @ 800 °C (%)	Ceniza @ 800 °C (%) en aire
Biomasa	13.7	72.9	13.4	-
B. Pirólisis	6.6	45.6	35.3	10.5
B. Gasificación	2.4	24.4	25.8	46.4

Observaciones sobre la muestra de Biomasa: A esta muestra se le hizo un perfil de calentamiento en aire desde temperatura ambiente y se observa que material ligno-celulósico pierde 27% volátiles hasta 220 °C y se puede generar un carbonizado estable con un 16-20% de biochar a temperaturas inferiores a 340 °C. A temperaturas superiores se produce la combustión de carbonizado.

**Figura E3***Resultados de análisis elemental***Análisis Elemental (Análisis Último)**

**Método:** Análisis elemental para determinar contenido de Carbono, Hidrógeno y Nitrógeno

**Equipo:** Micro CHNSO marca LECO

Muestra	Carbono (%)	Hidrógeno (%)	Nitrógeno (%)
Biomasa	39.40	5.62	0.95
B. Pirólisis	61.40	5.95	1.75
B. Gasificación	68.90	6.05	1.86


Grupo Química de Recursos Energéticos y Medio Ambiente - QUIREMA

*Wilson Alonso Ruiz*  
 Profesor Investigador  
 Grupo QUIREMA

Apéndice F. Reporte de prueba de viscosidad

Figura F1

Resultados prueba de viscosidad realizados en la sede Guatiguará

	LABORATORIO DE ANÁLISIS PETROFÍSICOS Y DAÑO A LA FORMACIÓN			FORMATOS	
	PRUEBA VISCOSIDAD CINEMÁTICA			2024-03-22	FD009
				VERSIÓN: 01	Página 1 de 1

FECHA DE LA PRUEBA					
Año:	2024	Mes:	11	Día:	27
PROYECTO					

Muestra	T (°C)	Capilar	C	Densidad (g/ml)	t (seg)
Acetate	40	size 60	0.004237	N.A	300
Residuo de	40	Senal Z 79	0.004237	N.A	300
Pivalisis	40		0.004237	N.A	300
/					

**NOTA:**  
La constante C de cada capilar, debe consultarse en el manual de calibración de equipos

**Cálculos Viscosidad Cinemática y Dinámica**

	Muestra	T (°C)	U (cSt)	μ (cP)
U = $C \cdot t$				
$\mu = \rho \cdot U$				
U= Viscosidad Cinemática	Acetate	40	1.28	N.A
ρ= Densidad a temperatura de prueba g/ml	Residuo de	40	1.28	N.A
μ= Viscosidad Dinámica, cP	Pivalisis	40	1.28	N.A
C= Constante calibración del capilar	/			

**Gráfica Viscosidad Dinámica vs. Temperatura:**

ELABORADO POR: Miguel Ángel Méndez Álvarez VERIFICADO POR: Hernán Pérez

FIRMA: Miguel FIRMA: Hernán

ELABORO	REVISO Y APROBO	COPIA CONTROLADA	SI X
LABORATORIO	DIRECTOR DEL LABORATORIO		NO