

**Caracterización y Producción de Pellets de Biomasa Residual de Cultivos Agrícolas
Teniendo en Cuenta su Viabilidad como Fuente de Energía Alternativa**

Juan Manuel Rojas Santisteban

Trabajo de grado para optar Título de Ingeniero Mecánico

Director

Yesid Javier Rueda Ordoñez

PhD. en ingeniería química, ingeniero mecánico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Físico mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

DEDICATORIA

Quiero dedicar este nuevo triunfo en esta etapa de mi vida a mi Papá Víctor Manuel Rojas por ser la piedra angular, gracias por tus consejos, por demostrarme y enseñarme el valor de siempre salir adelante, mediante mucho esfuerzo y sacrificio, a mi madre Emilsen Santisteban por su amor incondicional, su paciencia y dedicación como la primera profesora que tuve en mi vida, hoy celebro con ellos, y aunque mis padres no tuvieron la oportunidad de estudiar, me brindaron la oportunidad que ellos no pudieron tener. Hoy valoro lo que han logrado, porque han alcanzado muchas oportunidades sin una adecuada formación, me enorgullecen y me motivan a seguir mejorando como persona y como profesional.

A mis hermanas Kelly Johanna y Duperly Yolani por compartir cada triunfo, cada caída, que a pesar de la distancia el vínculo que nos une es mucho más grande y mucho más fuerte. Este triunfo también es de ustedes que me motivaron a continuar, en especial mi hermana mayor quién tuvo la iniciativa y ha estado siempre apoyándome, motivándome a ser mejor cada día.

A cada uno de mis familiares, tías, tíos, mi padrino Julio, primos que estuvieron apoyándome, que me brindaron sus buenos deseos y me dieron consejos que impactaron mi desarrollo profesional de una manera positiva, en especial a mi nonita Socorro que siempre ha estado conmigo, que hoy agradezco a Dios por permitirme compartir estos logros junto a ella y que siempre ha estado orando para que todo se nos dé.

A Esney por compartir tantos buenos momentos, estar en las malas, en las buenas y que no se necesita estar, si no saber estar, gracias por apoyarme siempre. A Farid y Alejandro que también saben mis experiencias, son mi apoyo, son como los hermanos que no tuve y la vida los puso para ayudarme a superar cada dificultad, cada obstáculo.

AGRADECIMIENTOS

Quiero aprovechar este espacio para expresar mi agradecimiento a cada una de las personas que hicieron parte de este proceso, sin duda alguna, soy una persona con otra perspectiva gracias a lo aprendido en la universidad, agradezco el esfuerzo de mis padres por su compromiso hacia mí, nunca estuve solo a pesar de estar lejos de ellos, siempre estuvieron, fueron y serán el motor que me impulsa a salir adelante para ofrecerles algo mejor, se lo merecen.

A mis amigos Diego, Himer, Emer, Mauricio, Alejandro, Omar y Darwin, gracias por compartir los mismos sufrimientos, preocupaciones, noches de traspaso, salidas y claro que sí, muy buenos momentos que atesorare en mi memoria y que hoy cada uno está por su camino. Y sabemos que Dios nos tiene para grandes cosas

Hoy soy el profesional que una vez soñé ser, por cosas del destino la vida me guió ha esta profesión, y no me arrepiento de nada, gracias por las enseñanzas y lo que en el 2018 parecía una ilusión hoy puedo decir lo logre y es gracias a mi familia, amigos y profesores. Me alegra hacerlos sentir orgullosos y sentirme orgulloso de ser UIS, gracias por creer en mí y hacérmelo saber.

Las oraciones de Socorrito tienen poder.

Tabla de Contenido

Introducción	10
1 Planteamiento del problema.....	11
2 Justificación	13
3 Objetivos.....	14
3.1 Objetivo General.....	14
3.2 Objetivos Específicos.....	14
4 Marco teórico	15
4.1 Biomasa Residual.....	15
4.1.1 Rubus alpinus (mora).....	15
4.1.2 Zea mays (maíz duro)	16
4.1.3 Coffea arabica (café).....	17
4.1.4 Saccharum officinarum (caña de azúcar).....	18
4.2 Cultivos tradicionales de Colombia.....	19
4.2.1 Cultivos tradicionales en el municipio de Santa Bárbara, Santander	20
4.3 Pellets.....	21
4.3.1 Dimensiones del pellet.....	21
4.3.2 Humedad del pellet	21
4.4 Combustión.....	22
4.4.1 Conservación de la masa.....	22
5 Marco referencial	23
5.1 Marco de antecedentes	23
6 Metodología	24

6.1	Fase 1. Análisis de la producción de la biomasa residual de los cultivos de Mora uva (Rubus alpinus), maíz amarillo (zea mays), café (coffea) y los residuos fibrosos de la caña de azúcar en el municipio de Santa Bárbara, Santander.....	24
6.2	Fase 2. Caracterización Fisicoquímica de la biomasa residual de los cultivos mencionados.	30
6.3	Fase 4. Determinar la resistencia mecánica de los pellets de la biomasa residual....	40
6.4	Fase 5. Determinación del Costo de Producción de los pellets de la biomasa de residual.	42
7	Recomendaciones	47
8	Conclusiones	48
	Referencias Bibliográficas	49

Lista de Figuras

Figura. 1 Mora	16
Figura. 2. Maíz amarillo.....	17
Figura. 3. Café.....	18
Figura. 4 Caña de azúcar en Colombia	19
Figura. 5 Principales cultivos agrícolas del municipio de Santa Bárbara - Santander	20
Figura. 6 Molino eléctrico del laboratorio de combustión.....	28
Figura. 7 Disminución manual del tamaño de la biomasa	29
Figura. 8 Molino de cuchillas del laboratorio de procesos	29
Figura. 9 Tamaño de finos obtenido mediante el molino de cuchillas	31
Figura. 10. Porcentaje de humedad.....	33
Figura. 11 Porcentaje de materia volátil	34
Figura. 12 Porcentaje de cenizas.....	35
Figura. 13 Carbono fijo.....	36
Figura. 14 Análisis último de la biomasa.....	36
Figura. 15 Muestra para la bomba calorimétrica	37
Figura. 16 Análisis de la biomasa residual del cultivo de mora	39
Figura. 17 Análisis de la biomasa residual del cultivo de maíz.....	39
Figura. 18 Método de mezclado manual para garantizar homogeneidad en la mezcla	41
Figura. 19 Pellets obtenidos para cada una de las biomásas residuales.....	41
Figura. 20 Esquema de Producción para los Pellet.....	43

Lista de Tablas

Tabla 1. Gestión de Residuos en el Municipio de Santa Bárbara.....	25
Tabla 2. Cantidad de Biomasa Residual de la Mora.....	26
Tabla 3. Cantidad de Biomasa Residual de la Maíz	26
Tabla 4. Cantidad de Biomasa Residual del Café.....	26
Tabla 5. Cantidad de Biomasa Residual de la Caña de Azúcar	26
Tabla 6. Distribución para el sembrado de los cultivos	27
Tabla 7. Resultados del PCS obtenidos mediante la Bomba Calorimétrica	38
Tabla 8. Peso de las muestras antes y después de realizar el ensayo según la norma ASTM 440-80	42
Tabla 9. Costos asociados a la recolección de la materia prima.....	43
Tabla 10. Costos asociados a la operación de la peletizadora	44
Tabla 11. Costos asociados a la operación del molino	44
Tabla 12. Costos asociados al secado de la materia prima	44
Tabla 13. Costos asociados al empaque de los Pellets.....	45
Tabla 14. Costos asociados a la segunda etapa de producción de los pellets (maquila).....	45
Tabla 15. Costo de producción de los pellets para cada tipo de biomasa residual	46

Resumen

Título: Caracterización y producción de pellets de biomasa residual de cultivos agrícolas teniendo en cuenta su viabilidad como fuente de energía alternativa.

Autor: Juan Manuel Rojas Santisteban

Palabras Claves: Biomasa Residual, Pellets, Viabilidad Económica

Descripción:

Este estudio analiza el comportamiento de diversas biomásas residuales provenientes de cultivos de mora uva, maíz amarillo, café y residuos fibrosos de caña de azúcar, generados tras la cosecha. El objetivo es aprovechar estos residuos, que suelen causar contaminación por malas prácticas agrícolas, para la producción de energía sostenible y se caracterizan mediante análisis próximo y el uso de una bomba calorimétrica para determinar su poder calorífico.

El déficit energético en algunas regiones del país vulnera los derechos de los ciudadanos al privarlos de un servicio esencial como la energía. Para abordar esta problemática, se propone la producción de pellets a partir de biomasa residual, aprovechando los residuos agrícolas que, de otro modo, causarían contaminación. Estos pellets pueden facilitar el suministro energético a las regiones del país que se encuentran afectadas.

La viabilidad económica y la capacidad calorífica de cada biomasa son los parámetros principales para su caracterización y determinación. Además, se examinan las etapas de producción de pellets, las normas de aseguramiento de calidad y los costos asociados, comparándolos con las características de los combustibles sólidos como el carbón bituminoso.

Trabajo de grado

**Faculta de Ingenierías Fisicomécnicas. Escuela de Ingeniería Mecánica.

Ingeniería Mecánica. Director: Yesid Javier Rueda Ordoñez. PhD. en Ingeniería Química

Abstract

Title: Characterization and production of biomass pellets from agricultural crop residues, considering their viability as an alternative energy source.

Author: Juan Manuel Rojas Santisteban

Key Words: Residual Biomass, Pellets, Economic Viability

Description:

This study analyzes the behavior of various residual biomasses from crops of blackberry, yellow corn, coffee, and fibrous residues of sugarcane, generated after harvest. The objective is to utilize these residues, which often cause pollution due to poor agricultural practices, for the production of sustainable energy. They are characterized through proximate analysis and the use of a bomb calorimeter to determine their calorific value.

The energy deficit in some regions of the country infringes on the rights of citizens by depriving them of an essential service like energy. To address this issue, the production of pellets from residual biomass is proposed, utilizing agricultural residues that would otherwise cause pollution. These pellets can facilitate the energy supply to the affected regions of the country.

The economic viability and calorific capacity of each biomass are the main parameters for their characterization and determination. Additionally, the stages of pellet production, quality assurance standards, and associated costs are examined, comparing them with the characteristics of solid fuels such as bituminous coal.

*Degree Thesis

**Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical. Mechanical Engineering. Director: Yesid Javier Rueda Ordoñez. PhD. en Chemical Engineering.

Introducción

Colombia es un país en desarrollo, lo que hace que la implementación de tecnologías energéticas sostenibles sea un proceso de transformación más lento. En 2021, se inauguró la primera planta de biomasa forestal con una capacidad energética de 4.5 megavatios, proporcionando energía renovable a más de 18,000 habitantes en Puerto Carreño, Vichada (Colprensa, 2021).

Por otro lado, según el "Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica (PIEC) 2019-2023", la falta de cobertura del servicio de energía eléctrica en La Guajira es la más alta del país. El Ministerio de Minas y Energía ha señalado que, aunque el Índice de Cobertura de Energía Eléctrica (ICEE) aumentó del 58.81% en 2018 al 61.23% en 2023, más del 80% de las obras para la transición energética están atrasadas.

La transición energética es un proceso que requiere muchos recursos económicos. Sin embargo, la implementación de pellets a partir de biomasa es un buen inicio para esta transición sin afectar los costos asociados a la infraestructura de las centrales térmicas. Además, contribuye a la reducción de emisiones de CO₂ y sirve como alternativa durante la ejecución de proyectos como granjas solares y parques eólicos.

1 Planteamiento del problema

La dependencia energética actual en cualquier región del país ha llevado a la implementación de energías alternativas con el fin de desarrollar nuevas tecnologías que puedan contribuir al cuidado del medio ambiente para mantener el confort y la calidad de vida de las personas. Asimismo, hay graves consecuencias en términos de calidad de vida, ya que las personas, especialmente las que viven en el campo se ven obligadas a cocinar; calentar sus hogares con las fuentes de energía no renovables. También, las empresas que dependen de estas para realizar sus procesos industriales generando la necesidad de explotar las zonas protegidas con el fin de obtener la materia prima. La implementación de estas fuentes de energía altamente contaminantes y no renovables, como la leña o el carbón, provoca una serie de problemas de salud y daños ambientales.

Según el informe de 2023 de la Agencia Internacional de Energía Renovable, menciona que “Sin embargo, el ritmo de mejora de la intensidad energética se ha ralentizado en los últimos años hasta el punto de que se redujo hasta el 0,6% en 2020” (IRENA, 2023) esto puede tratarse por un efecto transitorio debido, en gran medida, a la crisis que se vivió en el mundo por la pandemia.

Durante 2022 en Colombia, la participación de la biomasa a la matriz energética fue de 1.5% de la energía total y según la Unidad de Planeación Minero-Ambiente (UPME, 2024), la demanda energética proyectada alcanzó los 76,655 GWh lo que representó un crecimiento de 3,31% con respecto al año 2021, en donde la demanda acumulada fue de 74.116 GWh.

La implementación de pellets a partir de la biomasa residual es una solución a la transformación de las industrias ya que la manera de contribuir sería intercambiando los combustibles actuales como el carbón, reduciendo los costos en la fabricas debido a que los

cambios en la infraestructura no se verían afectados por adoptar este tipo de energía alternativa y contribuir con el cuidado del medio ambiente.

Por lo tanto, se realiza una evaluación de cuatro tipos de biomasa residual de los cultivos agrícolas como lo son: Mora uva (*Rubus alpinus*), maíz amarillo (*zea mays*), café (*coffea*) y los residuos fibrosos de la caña de azúcar generados en Colombia para la caracterización y peletización con el propósito de comparar sus propiedades fisicoquímicas como fuente renovable de energía y a su vez aprovechar los residuos de las cosechas que se generan en las zonas rurales.

2 Justificación

En Colombia la dependencia energética de los combustibles fósiles es muy alta, ya que gran parte de la economía del país depende de las rentas del petróleo. Según datos del Banco Mundial en 2021, Colombia generó un aporte de 3.4% al PBI del país y el recaudo de las regalías por la explotación de hidrocarburos fue de 5.59 Billones de pesos (COP) en 2023, teniendo una disminución con respecto al año 2021 donde las regalías alcanzaron un valor de 6.4 Billones de pesos (COP) (ANH, 2023).

Las reservas de petróleo se estiman alrededor de 7.5 años y el gobierno nacional ha empezado a implementar estrategias para la transición energética, estas están detalladas en la Hoja de Ruta de la Transición Energética Justa y en CONPES de Transición Energética.

En este estudio se plantea el uso de la biomasa residual como fuente de energía alternativa, mediante el aprovechamiento de los desechos que se generan en el sector agrícola, ya que gran parte del territorio colombiano es utilizado para siembras de diferentes cultivos. Con la finalidad de obtener mejores resultados se da la necesidad de clasificar cuatro tipos de biomasa residual de los cultivos de Mora uva (*Rubus alpinus*), maíz amarillo (*zea mays*), café (*coffea*) y los residuos fibrosos de la caña de azúcar.

Así mismo se requiere analizar la producción de estos cultivos con respecto a su disponibilidad, composición, manejo de los residuos, impactos ambientales y finalmente determinar los costos de implementar esta tecnología como fuente de energía alternativa, el objetivo del proyecto consiste en evaluar el comportamiento de la biomasa mediante un análisis fisicoquímico para la generación de pellets con el fin de implementarlos como fuente de energía alternativa y contribuir al cuidado del medio ambiente reduciendo la contaminación atmosférica asociada a las fuentes de energía convencionales.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Evaluar el comportamiento de la biomasa mediante un análisis fisicoquímico para la generación de pellets con el fin de implementarlos como fuente de energía alternativa y contribuir al cuidado del medio ambiente, reduciendo la contaminación atmosférica asociada a las fuentes de energía convencionales.

3.2 Objetivos Específicos

- Determinar la producción y caracterización de la biomasa residual provenientes de los cultivos de *Rubus alpinus* (mora), *zea mays* (maíz duro), *coffea arabica* (café) y *Saccharum officinarum* (caña de azúcar), a través del análisis próximo y el poder calorífico superior.
- Realizar la obtención de pellets utilizando la peletizadora del laboratorio de combustión en condiciones controladas.
- Evaluar la resistencia mecánica de los pellets a partir de la biomasa teniendo en cuenta su tamaño, humedad y contenido de cenizas para obtener una durabilidad óptima.
- Evaluar los costos para elaboración e implementación de los pellets como fuente alternativa de energía teniendo en cuenta la viabilidad económica para el desarrollo del combustible sólido.

4 Marco teórico

4.1 Biomasa Residual

El termino biomasa se refiere a toda la materia orgánica de origen natural que puede ser material vegetal o animal, como ejemplos de biomasa se puede encontrar madera, algas, residuos de procesos agrícolas y desechos orgánicos. La biomasa residual es generada principalmente de los cultivos, mediante actividades como la poda, cosecha y la preparación del producto.

Para el desarrollo de este proyecto se implementa el uso de la biomasa residual proveniente de los cultivos de:

4.1.1 *Rubus alpinus (mora)*

La mora es un cultivo nativo de Centro América, en Colombia el cultivo de mora se extiende por la cordillera de los Andes, donde la altura para encontrar estos cultivos puede oscilar entre los 1600 y 2600 metros sobre el nivel del mar. Se pueden encontrar diferentes tipos de variedades de mora en el país, ya que tiene una buena capacidad de adaptabilidad a las variaciones climáticas y a los diferentes niveles de humedad (Minagricultura, 2020).

Figura 1. Mora

Según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural los principales departamentos sembradores de mora son Cundinamarca con un aporte del 22% en 3.363 hectáreas sembradas y Santander con un aporte del 20% en 3.309 hectáreas sembradas. Los municipios que abastecen la central mayorista de Bucaramanga (Centro abastos) son: Piedecuesta, Arcabuco, Herrán y Santa Bárbara, con una producción superior a las doscientas mil toneladas registradas en el segundo semestre del año 2020.

4.1.2 *Zea mays (maíz duro)*

El maíz llegó a Colombia en tiempos prehispánicos y desde entonces ha sido una de las principales fuentes de alimentación, con la llegada de los españoles se introdujeron nuevas variedades de modo que se expandió por varias regiones del país. A la fecha, Colombia es uno de los principales productores de maíz en América Latina.

Figura 2. *Maíz amarillo*



El maíz en el territorio colombiano es utilizado para el consumo humano y también para la producción de alimentos para animales, donde los principales departamentos que producen este cultivo son: Córdoba, Valle del Cauca, Huila, Sucre y Tolima. En el 2019 la producción de maíz amarillo alcanzo las 771.090 toneladas y de maíz blanco la producción fue de 464.100 toneladas, se observa que las importaciones de maíz amarillo siguen siendo muy superiores a la producción local que se tiene en el país (Fenalce, 2020).

4.1.3 *Coffea arabica* (café)

El café no es un cultivo originario de Colombia, fue introducido en el siglo XVIII, convirtiéndose en la fuente de ingresos principal de muchos campesinos, es reconocido mundialmente por su calidad y sabores únicos. Ya que se encuentra en las regiones andinas del país entre los 800 y 2000 metros sobre el nivel del mar (Colombiaverde, 2024). También se pueden encontrar diferentes tipos de variedad que se caracterizan por su sabor, esto ha llevado a convertirse

en uno de los productos más importantes de exportación y ha fomentado la siembra del café en muchas regiones de país.

Figura 3. *Café*



El café es un producto alimenticio que se ha vuelto muy popular entre las personas de diferentes partes del país, donde los principales departamentos que siembran estos cultivos son Huila, Antioquia, Tolima y Cauca. según la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia en el año 2023, las áreas cultivadas de café alcanzaron valores de 841.35 hectáreas.

4.1.4 *Saccharum officinarum (caña de azúcar)*

La caña de azúcar fue introducida desde la época colonial, donde llegaron las primeras plántulas a la zona del caribe y rápidamente se fue expandiendo por el Valle del Cauca. La caña requiere de climas cálidos para facilitar la producción de sacarosa y un crecimiento con mayor rendimiento, en sitios con nivel del mar por encima de los 1000 metros ya se empiezan a encontrar

problemas en los cultivos de caña, donde se inhiben la floración a causa de las bajas temperaturas (Subirós Ruiz, 2015).

Figura 4. *Caña de azúcar*



La mayoría de los cultivos de caña de azúcar en el país están ubicados en 30 municipios del Valle del Cauca, 9 de Cauca, 5 de Caldas, 5 de Risaralda y uno de Quindío, donde se encuentran 12 ingenios con una capacidad total instalada de molienda de 94.000 toneladas por día y el área neta sembrada para el 2023 fue de 240.534 hectáreas (Asocaña, 2024).

4.2 Cultivos tradicionales de Colombia

La amplia biodiversidad de Colombia, caracterizada por la diversidad de climas en su territorio, confiere al país una ventaja distintiva para la producción agrícola en diversos cultivos.

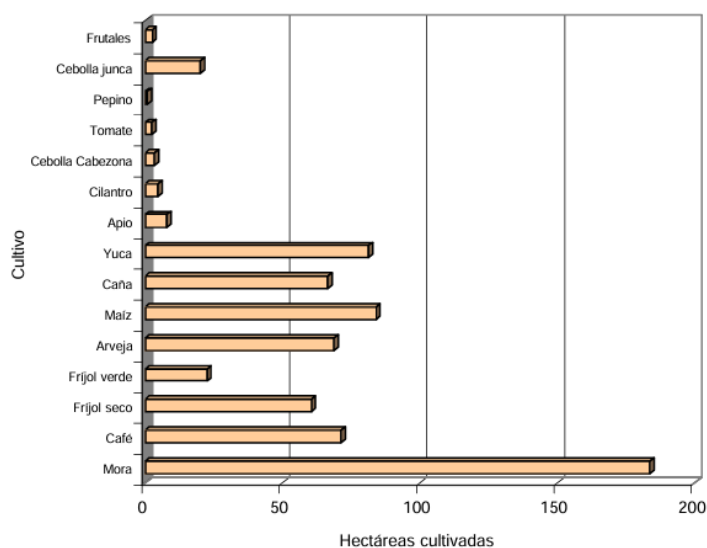
La mayor participación corresponde al cultivo de café con 839.661 hectáreas, para el maíz amarillo de 327.744 hectáreas, la caña de azúcar con 299.407 hectáreas y para la mora 15.696 hectáreas según la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA).

4.2.1 Cultivos tradicionales en el municipio de Santa Bárbara, Santander

Según los datos del ordenamiento territorial en Santa Bárbara, Santander se pueden encontrar cultivos como lo son Mora, Café, Maíz, Frijol seco, Caña, Apio, Papa, cilantro, Cebolla Cabezona, Tomate, Pepino, Cebolla junca y ciertos Frutales. La variedad que se tiene en el municipio es gracias a variedad de los pisos térmicos que se pueden encontrar en las zonas más cálidas hasta las zonas con clima templado y también cuenta con un espacio dentro de la zona de paramos.

Esto permite encontrar la variedad de productos alimenticios, pero debido a que la mayoría de estas partes del municipio son retiradas y no cuentan con un acceso vial, no permite la producción en masa de estos cultivos.

Figura 5. Principales cultivos agrícolas del municipio de Santa Bárbara - Santander



Fuente: Encuesta del EOT 2018

4.3 Pellets

Los pellets se caracterizan por ser materia orgánica que esta comprimida y densificada, generalmente su forma es cilíndrica donde puede variar su radio y altura, son utilizados en calderas y hornos. Esta práctica es de bajo costo, lo que la hace fácil de implementar y ha fomentado su uso no solo en la industria, sino también en la sociedad como una fuente de combustible sólido.

4.3.1 Dimensiones del pellet

Los pellets tienden a tener una forma cilíndrica la cual se caracteriza por la altura y el diámetro, este componente lo podemos encontrar de forma granular con el fin de facilitar el transporte y almacenamiento.

El tamaño estará determinado por la peletizadora del laboratorio de combustión, según la norma EN14961-1 el diámetro del pellet más que comunes que se pueden encontrar en el mercado están entre los 0,006 y 0,022 m, no puede ser superior a los 0.025 m ya que si es superior se considera que es una briqueta. Así mismo, la longitud oscila entre los 0,035 y 0,5 m.

4.3.2 Humedad del pellet

La humedad es uno de los parámetros más importantes en la elaboración de los pellets, puesto que de esta depende su estructura física y también la cantidad de poder calorífico que puede aportar al sistema. Dependiendo de los niveles de humedad que contenga la materia prima se debe dejar secar en al ambiente para reducir el porcentaje de humedad. En el laboratorio se realiza pruebas experimentales con el fin de encontrar el porcentaje de humedad adecuado para cada tipo de biomasa residual, de modo que, se debe realizar para cada uno de los pellets, si no cumple con las pruebas de durabilidad por la pérdida de humedad es necesario implementar un aglomerante.

Según la norma UNE-EN ISO 17225-6 de 2022 establece que el contenido de humedad en los pellets no debe superar el 12% en pellets de origen no leñoso, al presentar un contenido de

humedad superior se presentarías ineficiencias y gases de combustión más contaminantes, visualmente a la hora realizar estas quemas se puede evidenciar el humo excesivo, llama inestable y mayor contenido de cenizas.

4.4 Combustión

La combustión es una reacción química exotérmica en la cual el combustible, reacciona con un agente oxidante, como el aire atmosférico, liberando energía en forma de calor y luz. Durante la combustión, los átomos del combustible se combinan con el oxígeno, formando nuevos compuestos químicos, como dióxido de carbono, agua, y otros productos de la reacción.

En este caso el combustible es sólido y el agente oxidante es el aire, se requiere analizar la cantidad de gases generados durante la combustión.

4.4.1 Conservación de la masa

Ya que en la combustión es el proceso durante ocurre la quema de la materia prima, antes de pasar por esta etapa se tiene lo que se conoce como los reactivos que mide la cantidad de materia a utilizar durante y después de la combustión en unidades másicas o molares. Por otra parte, se tiene los productos que hace referencia a la sustancia que se forma mediante la reacción química de los reactivos.

Lo anterior, para hacer referencia a la ley de la conservación de la energía, donde la conservación de la masa define que la masa de los reactivos será igual a la masa de los productos, ya que la materia no se crea ni se destruye en una reacción química.

5 Marco referencial

5.1 Marco de antecedentes

El proyecto “Estudio Exploratorio Del Proceso De Co-Combustión De Carbón Y Biomasa Mediante Análisis Termogravimétrico Para Su Aprovechamiento En La Generación De Calor” (Cutimbo, 2017) tiene como objetivo estudiar el comportamiento de la co-combustión del carbón bituminoso y el bagazo de la caña de azúcar con el fin de mejorar la ignición del carbón, reduciendo los costos con el proceso de generación de calor. Teniendo en cuenta su caracterización fisicoquímica y parámetros cinéticos de la combustión; obteniendo las condiciones de reacción optimizadas para la combustión.

El proyecto “Análisis Teórico De La Combustión De Biomasa Residual Proveniente De Cultivos Tradicionales En Colombia” (Correa, 2016) tiene como objetivo general “Proponer un algoritmo que permita determinar el potencial energético durante la combustión de biomasa proveniente de cultivos tradicionales, utilizando el software EES.” Identificando los cultivos tradicionales de Colombia mediante su potencial como biomasa y estimar el potencial energético de la quema de esta biomasa residual con el fin de comparar los resultados con otras fuentes.

El artículo de investigación de investigación “Caracterización Físico-Química De Pellets Producidos A Partir De Mezclas 50/50 Carbón Bituminoso/Madera Residual” (Atuesta & Sierra, 2015) presenta los beneficios desde el punto de vista energético de los pellets producidos mediante una mezcla 50/50 entre el carbón Bituminoso y la Madera Residual, teniendo en cuenta que Colombia es un país que tiene grandes reservas de carbón y a su vez gran parte del territorio nacional está dedicado a la agricultura.

6 Metodología

El desarrollo de este proyecto se articula a través de cinco fases claramente definidas. Cada una de estas etapas desempeñan un papel fundamental en la consecución de los objetivos propuestos. En este apartado, se proporcionará una descripción de cada paso en el logro de los objetivos planeados.

6.1 Fase 1. Análisis de la producción de la biomasa residual de los cultivos de Mora uva (*Rubus alpinus*), maíz amarillo (*zea mays*), café (*coffea*) y los residuos fibrosos de la caña de azúcar en el municipio de Santa Bárbara, Santander.

Las visitas de inspección ocular se realizan en las diferentes veredas del municipio de Santa Bárbara con el fin de conocer a fondo las diferentes variedades de cultivos que se encuentran y aportan al desarrollo económico de las personas, ya que gran parte de la economía de los campesinos es del sector agrícola, no todas cuentan con la infraestructura adecuada para el despacho de mercancía, no podemos ni imaginar como lo sería para la biomasa residual. También se debe tener en cuenta la variedad climática que se presenta en la región, que aumenta la presencia de diversas variedades del mismo producto y por lo tanto las condiciones pueden llegar a cambiar durante el desarrollo de este.

Para caracterizar se toman diferentes muestras en las veredas con acceso vial para la recolección y posteriormente realizar el respectivo secado con el fin de reducir el contenido de humedad. También se recibió el apoyo de los líderes comunitarios y del municipio de Santa Bárbara, Santander con el plan de ordenamiento territorial para estimar la cantidad de hectáreas cultivadas por vereda.

La manipulación que se hace a cada uno de los cultivos en zonas donde la producción es muy baja, por lo general no se realiza un control o manipulación a los desechos post cosecha. Por

lo general a la hora de realizar las siembras, con antelación se preparan los terrenos donde se evidencian que una de las practicas más comunes es quemar directamente estos residuos en el sitio de trabajo, esto para el caso del maíz ya que es un cultivo que requiere sembrarse después de cada cosecha.

Para cultivos como la mora, el café y la caña de azúcar que son cultivos perennes que se caracterizan por poder aprovechar varias cosechas sin necesidad de ser replantados. Esto hace que se requiera de un manejo especial para cada uno de estos cultivos, la mora es un cultivo de producción semanal y esto a su vez causa el aumento de ramas que ya terminan su ciclo de vida y requiera implementar podas con mayor frecuencia para garantizar el buen estado de la planta.

Tabla 1. *Gestión de Residuos en el Municipio de Santa Bárbara*

CULTIVO	CANTIDAD [HA]	TIPO DE RESIDUO	DESCRIPCIÓN	GESTION DE RESIDUOS
MORA	183,61	Hojas y Tallos	La poda en la mora es una práctica que consiste en remover las ramas secas o que ya terminaron su ciclo de producción, ya que el cultivo se encuentra permanentemente en crecimiento.	Desechos
CAFÉ	71,34	Cascarilla y granos defectuosos	Durante el trillado del café se remueve la cascara que cubre el café y posteriormente se debe realizar una selección de los granos en mal estado.	Venta/Residuos
MAÍZ	84	Hojas y Tallos	En el proceso de la recolección del maíz se toma principalmente el fruto que esta recubierto de hojas y a su vez la planta después de la cosecha es utilizada para alimento de los animales o es tratado como residuo de postcosecha.	Ensilaje/Residuos
CAÑA DE AZUCAR	66,4	Bagazo y Hojas	Durante el corte de la caña se realiza la remoción de hojas secas adheridas al tallo. Por otro lado, el material que sale del molino se considera como el bagazo.	Queman /Residuos

Durante las visitas se realiza un promedio entre 5 muestras de diferentes lugares dentro del municipio donde se realizaban actividades de poda y recolección con el fin de cuantificar el contenido masico de cada una de las plantas mediante una balanza de precisión, para facilitar la

medición se corta la biomasa en pedazos pequeños. También, se realiza el cálculo de la cantidad de plantas por hectárea y así tener una relación directa entre la cantidad de biomasa residual sobre el área utilizada.

Tabla 2. *Cantidad de Biomasa Residual de la Mora*

Mora			
Muestras	desechos [g]	Desechos/ 15 días [g]	Periodo [días]
Exp1	250	237	25
Exp2	340	287	25
Exp3	278	219	27
Exp4	236	210	30
Exp5	365	264	32
Promedio	293,8	243,8	

Tabla 3. *Cantidad de Biomasa Residual de la Maíz*

Maíz			
Muestras	desechos [g]	Desechos/ 15 días [g]	Periodo [mes]
Exp1	500	0	6
Exp2	430	0	6
Exp3	580	0	6
Exp4	492	0	6
Exp5	530	0	6
Promedio	506,4		

Tabla 4. *Cantidad de Biomasa Residual del Café*

Café			
Muestras	desechos [g]	Desechos/ 15 días [g]	Periodo [mes]
Exp1	200	0	12
Exp2	240	0	12
Exp3	322	0	12
Exp4	274	0	12
Exp5	230	0	12
Promedio	253,2		

Tabla 5. *Cantidad de Biomasa Residual de la Caña de Azúcar*

Caña de azúcar			
Muestras	desechos [g]	Desechos/ 15 días [g]	Periodo [mes]
Exp1	244	580	3
Exp2	290	632	3
Exp3	254	649	3
Exp4	276	588	3
Exp5	265	643	3
Promedio	265,8	618,4	

Con el fin de conocer la producción de biomasa residual es necesario conocer y determinar la distancia entre filas para cada cultivo, la distancia entre cada planta y cada una de las longitudes

deben de estar en metros para determinar la cantidad de plantas por hectárea, entonces se tiene la siguiente ecuación:

$$M_{ct} = \left(\frac{L}{d_p} + 1 \right) * \left(\frac{W}{d_f} + 1 \right) * \frac{10000}{L * W} [Plantas/Ha]$$

Donde:

L = longitud del área

W = Ancho del área

d_p = Distancia entre plantas

d_f = Distancia entre filas

Tabla 6. *Distribución para el sembrado de los cultivos*

Cultivo	dp [m]	df [m]
Mora	1	2
Maíz	0,25	0,7
Café	1,2	1,4
Caña de azúcar	1	2

Las muestras fueron recogidas para un secado a temperatura ambiente y cortadas en fragmentos más pequeños con el fin de facilitar el almacenamiento de estas, después de los 15 días de secado se realiza el pesado de las muestras que ya se encuentran secas y al realizar una preselección de las diferentes condiciones geográficas del municipio.

Recolectando la biomasa residual de los cultivos en mención se llevan al laboratorio, donde se trituran mediante una trituradora eléctrica, la cual no tenía la capacidad de cortar las fibras de que presentan las biomásas, así se observó que el molino estaba clasificando el material del tallo.

Ya que la epidermis es la capa exterior que protege al tallo, la cual para la biomasa presente esta considera como una planta semi-leñosa, así como se puede observan en la figura 6.

Figura 6. *Molino eléctrico del laboratorio de combustión*



Es crucial el tratamiento de las muestras antes de realizar su respectiva caracterización, ya que la materia debe ser almacenada en un recipiente donde no permita el intercambio de humedad con el ambiente para evitar inconsistencias en los resultados entre las pruebas. También había que realizar una reducción al tamaño de la materia prima con la ayuda de unas tijeras industriales.

Figura 7. *Disminución manual del tamaño de la biomasa*



Figura 8. *Molino de cuchillas del laboratorio de procesos*



6.2 Fase 2. Caracterización Fisicoquímica de la biomasa residual de los cultivos mencionados.

La caracterización de la biomasa residual de cultivos agrícolas se realizó mediante análisis próximo, empleando un horno mufla, desecadores y una balanza analítica con precisión de 0.1 mg para determinar el porcentaje de humedad, materia volátil, cenizas y carbono fijo. El poder calorífico superior se estimó utilizando la ecuación empírica de Dulong, basada en la composición elemental. Cabe destacar que esta ecuación proporciona una estimación aproximada, y la precisión de los resultados obtenidos varía según la complejidad de la biomasa.

Con el fin de obtener resultados más precisos todas las biomásas pasaron por un proceso de trituración, con el fin de obtener homogeneidad entre las partículas, para esto fue necesario el uso de un molino de cuchillas, el cual se realiza la solicitud a la escuela de ingeniería química para hacer uso del banco y así garantizar unos resultados más homogéneos. El equipo de molienda permite ajustar el tamaño de partícula mediante el intercambio de cribas. Se empleó una secuencia de cribado en dos etapas: primero se utilizó una criba de 2 mm, y posteriormente, el material que superó esta primera criba se procesó nuevamente con una criba de 1 mm para garantizar que todo el material resultante tuviera un tamaño de partícula inferior a 1 mm.

Figura 9. *Tamaño de finos obtenido mediante el molino de cuchillas*

El contenido de humedad de las muestras de combustible de madera particulado se determinó siguiendo el método estándar ASTM E871-82(2019). Se pesó una muestra de más de 1 g en un crisol previamente tarado. Posteriormente, la muestra se secó en un horno a 105 °C durante 60 minutos. Tras el secado, la muestra se dejó enfriar en un desecador durante 15 minutos antes de pesarla nuevamente. Este proceso de secado y pesaje se repitió hasta obtener un peso constante (sin variaciones en el peso entre mediciones consecutivas). El porcentaje de humedad se calculó a partir del peso inicial y final de la muestra.

$$\%H_{ad} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} * 100 \quad (1)$$

Donde:

m_1 = masa del plato

m_2 = masa del plato y la muestra al iniciar el ensayo

m_3 = masa del plato y la muestra al terminar el ensayo

El contenido de materia volátil se determinó según el método estándar ASTM E872-82, utilizando un crisol de cerámica con tapa para contener una muestra de biomasa de menos de 1

mm de tamaño y con una masa superior a 1g. La muestra, pesada previamente junto con el crisol, una vez que el horno mufla alcanzó los 950 °C, se introdujo la muestra y se mantuvo a esa temperatura durante 7 minutos. Posteriormente, se dejó enfriar a temperatura ambiente antes de realizar una nueva pesada.

$$\%M_{vol} = \frac{w_i - w_f}{w_i - w_c} * 100 - \%H_{ad} \quad (2)$$

Donde:

$\%H_{ad}$ = Porcentaje humedad

w_i = masa del crisol y la tapa

w_f = masa del crisol, la tapa y la muestra al iniciar el ensayo

w_c = masa del crisol, la tapa y la muestra al terminar el ensayo

El contenido de cenizas se determinó según el método estándar ASTM E1755-24 utilizando el crisol de sílice, el cual debe recibir un pretratamiento antes de iniciar el ensayo, ya que para evitar errores se debe eliminar el contenido de humedad que pueda llegar a tener mediante el horno mufla, así como lo indica la norma. Por consiguiente, se registra el peso de cada muestra con su respectivo crisol y se introduce la muestra al horno mufla con la configuración de rampla para tener dos etapas, una a temperatura de 250 °C durante 30 minutos, la segunda etapa aumentando la temperatura a 575 °C durante 3 horas. Una vez finalizado se deja enfriar a temperatura ambiente dentro de un desecador y es nuevamente pesado.

$$\%C_{za} = \frac{M_f - M_c}{M_i - M_c} * 100 \quad (3)$$

Donde:

M_i = masa inicial de muestra seca y el crisol.

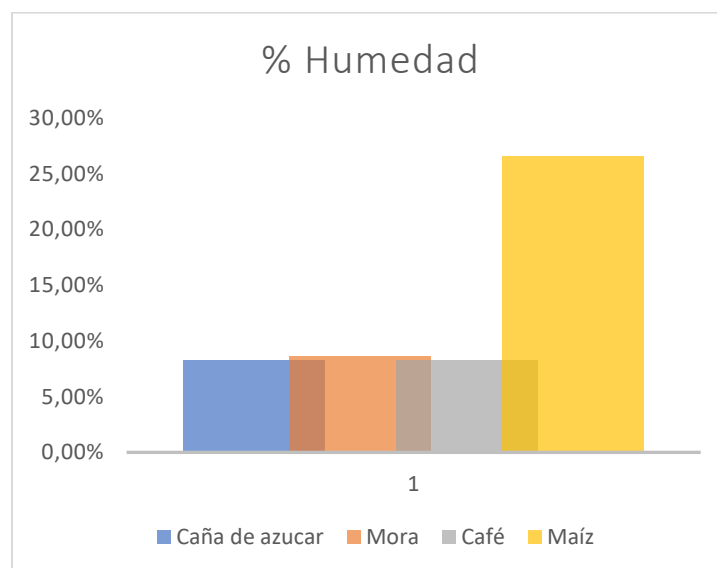
M_f = masa del crisol con la ceniza.

M_c = masa del crisol vacío.

Comparar las propiedades fisicoquímicas entre los cuatro tipos de biomasa residual mediante los criterios diámetro de pellets, longitud, densidad aparente, contenido de humedad, contenido de cenizas, carbono fijo, para que cumplan con las características de los combustibles sólidos.

Se realiza la respectiva toma de datos de las propiedades de cada biomasa residual con el fin de comparar sus resultados, para todos los ensayos mencionados anteriormente, se realizó cada prueba con una repetibilidad de cuatro muestras por prueba.

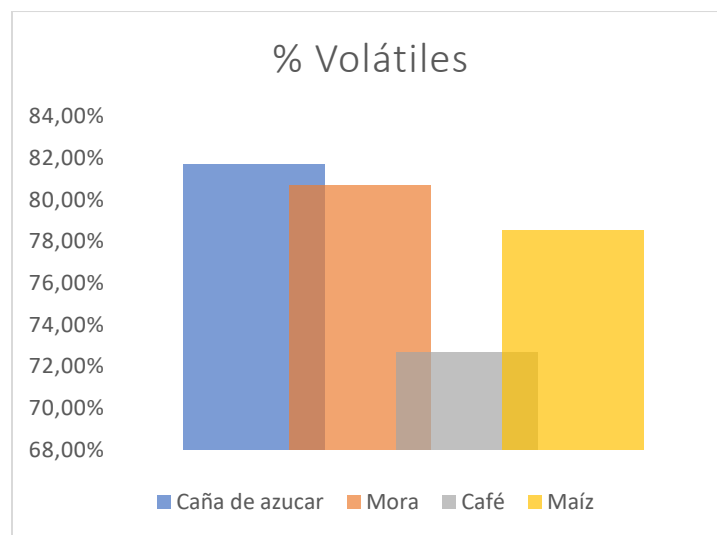
Figura 10. *Porcentaje de humedad*



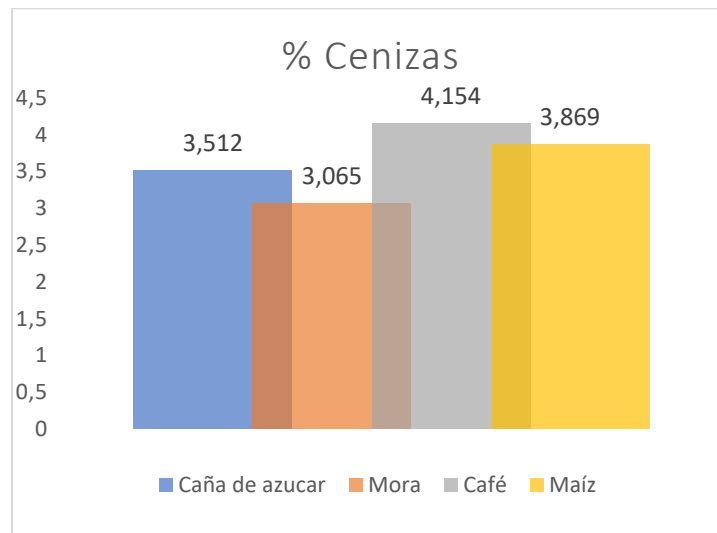
Se observa que el maíz como fuente de biomasa residual, tiene la capacidad de almacenar más humedad ya que los tallos no reciben ningún corte en especial, esto afecta económicamente ya que se tiene la necesidad de utilizar un secador hasta tener resultados más homogéneos con respecto a las otras biomásas, para su pos-tratamiento como materia prima para el pellet.

La biomasa que tiene menor porcentaje de materia volátil es el café, esta propiedad destaca que el café es la biomasa con la mayor resistencia a evaporarse y se tarda más en consumirse durante la combustión.

Figura 11. *Porcentaje de materia volátil*

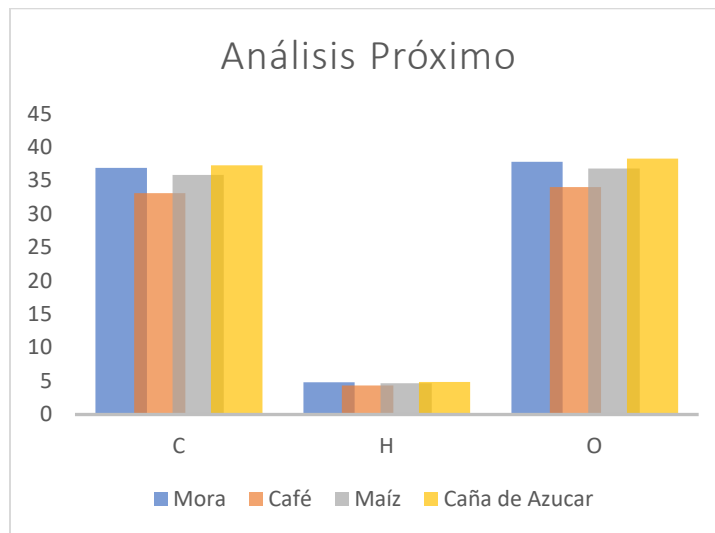


Las cenizas también son parte fundamental en la práctica, ya que al tener un menor contenido de cenizas no habrá que recoger tanta escoria cuando la biomasa sea utilizada en calderas, esto reduce los costos de mantenimiento asociados a la implementación de esta tecnología, además demuestra la importancia de la biomasa procedente de cultivo mora.

Figura 12. *Porcentaje de cenizas*

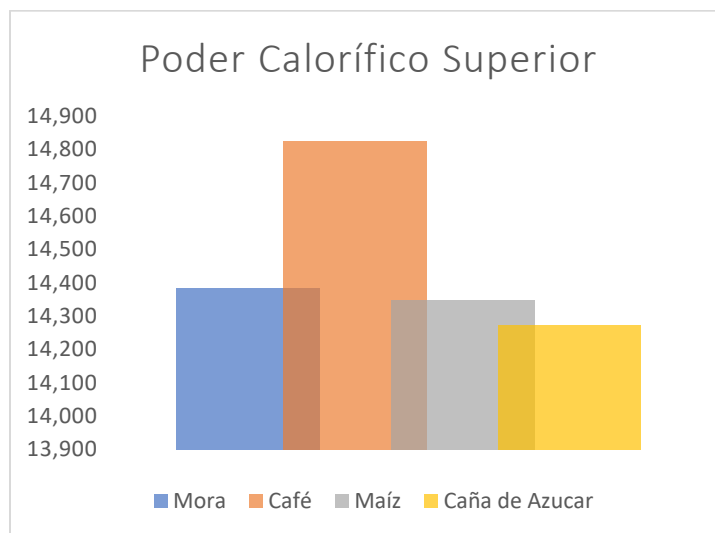
Durante el análisis próximo se estable que para comparar las propiedades y determinar cuál puede llegar ser más eficiente, sería erróneo pensar que con el análisis próximo se puede definir cuál es más eficiente ya que el contenido de gases influye en su comportamiento, pero también debemos tener en cuenta su estructura molecular ya que así haya un menos contenido de cenizas, mayor porcentaje de materia volátil, mayor contenido de carbono e hidrogeno, el comportamiento de cada biomasa cambia.

Figura 13. *Análisis próximo*



Mediante la ecuación de Dulong se calcula el poder calorífico que tiene cada biomasa la cual muestra que el café tiene un poder calorífico superior de 14.82 MJ/Kg comparándolo con la biomasa de la caña de azúcar con valor aproximado de 14.25 MJ/Kg.

Figura 14. *PCS mediante la ecuación de Dulong*

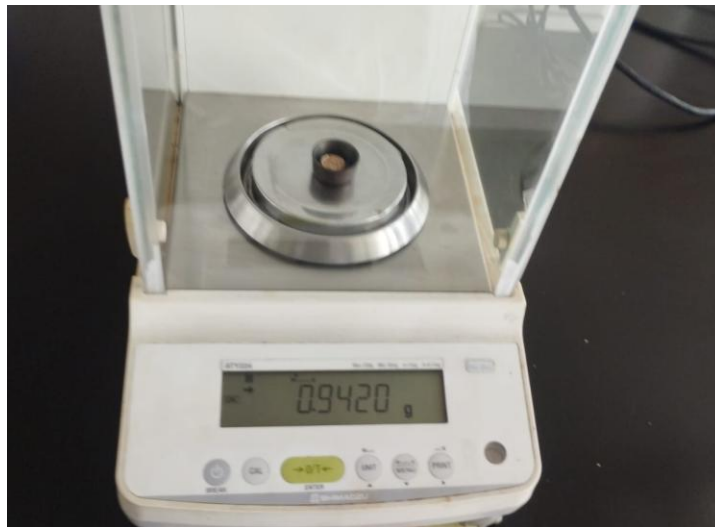


Para realizar una comparación más exacta se utiliza una bomba calorimétrica la cual mide la cantidad de calor liberada durante la combustión de cada biomasa. Ya que el método de análisis próximo es un modelo empírico el cual depende de muchas variables y que esta ecuación fue desarrollada experimentalmente para elementos con una composición química específica.

Datos obtenidos a partir de la bomba calorimétrica

La biomasa se tritura a 1mm de diámetro y menores para hacer una pastilla alrededor de un gramo como se observa en la figura. 15.

Figura 15. Muestra para la bomba calorimétrica



Los resultados obtenidos en la bomba calorimétrica muestran en la tabla 7. y se observa un comportamiento diferente al calculado por el análisis próximo, lo que resalta la importancia de utilizar métodos más acordes para el cálculo de la biomasa residual o proponer otro modelo empírico para calcular el poder calorífico superior con más precisión.

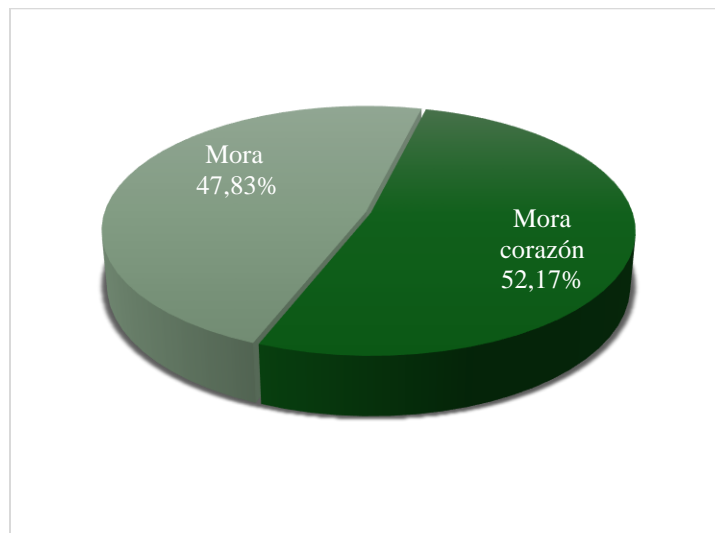
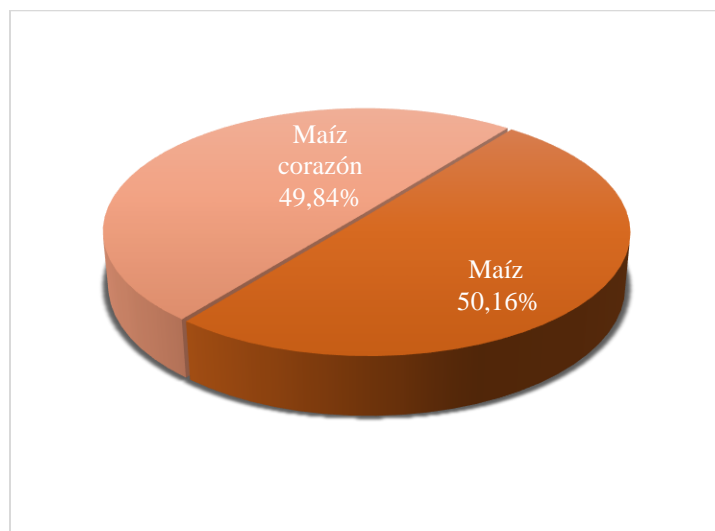
Tabla 7. Resultados del PCS obtenidos mediante la Bomba Calorimétrica

Tipo de Biomasa	Masa de la muestra [Kg]	PCS [MJ/Kg]	Temp inicial [°C]	Temp Cámara [°C]
Café	0,942	18,4665	24,7692	30,0008
Mora	0,8896	17,7347	24,8951	30,0005
Bagazo	0,863	17,1094	24,8854	29,9995
Maíz	0,8322	17,165	24,7515	29,9999
Mora corazón	0,9102	18,5992	24,7672	29,9998
Maíz corazón	0,8405	17,0539	24,9369	30

También se tomaron datos de las capas internas del tallo ya que están son más fáciles de triturar y al observar el comportamiento de los diferentes molinos al seleccionar la biomasa y quedar las fibra de la biomasa residual en los tamices se decide evaluar el comportamiento en las cuales este clasificación era más notoria como paso con el maíz y la mora, para el bagazo sus fibras casi que eran mucho más fuertes por tal razón se estima que en cualquiera de los análisis para determinar su poder calorífico había presencia de tejidos vasculares del tallo, por tal motivo no se realizó el estudio a esta biomasa.

En la figura. 16 y 17 podemos notar la diferencia entre el mismo tipo de biomasa, pero segmentada por la epidermis y por otro lado tejidos vasculares, cada análisis es realizado mediante la bomba calorimétrica el cual muestra que el poder calorífico es superior para los tejidos vasculares con un 52.17% en la figura 16 y 50.16% en la figura 17. Se denomina corazón, ya que se asemeja a la parte interna del tallo. Cabe resaltar que el análisis realizado para la mora es menos eficiente aun teniendo presencia de las fibras y los tejidos vasculares.

Ya que la diferencia no es significativa no vale la pena clasificar el mismo tipo de biomasa y optar por un molino de cuchillas que permitirá una mezcla más homogénea durante la reducción del particulado. Así mismo se muestran los resultados obtenidos para el otro tipo de biomasa.

Figura 16. *Análisis de la biomasa residual del cultivo de mora***Figura 17.** *Análisis de la biomasa residual del cultivo de maíz*

Como se observa en la gráfico 1 los resultados obtenidos de las biomásas residuales de los cultivos mediante el análisis ultimo y la bomba calorimétrica arrojan resultados muy diferentes sin olvidar que los resultados obtenidos por la bomba calorimétrica son más precisos de recomienda

utilizar una ecuación empírica que se ajuste mejor a estos tipos de biomasa residual de origen no leñosa.

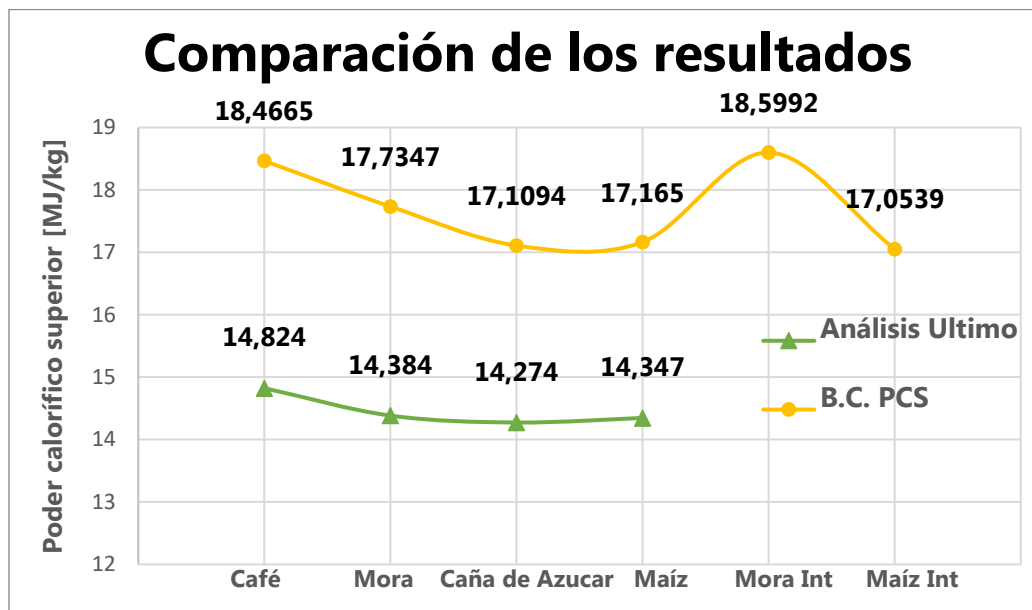


Gráfico 1. Comparación de los resultados obtenidos para obtener el Poder Calorífico Superior

6.3 Fase 4. Determinar la resistencia mecánica de los pellets de la biomasa residual

Para mejorar la estructura interna del pellet se utiliza un aglomerante, el cual fue seleccionado por un estudio previamente realizado, el cual resalta que, para obtener mejores resultados en cuanto a pérdida de humedad, contenido de cenizas y poder calorífico superior se debe utilizar el 10 % y una cantidad de agua de 40,5 % de la mezcla total, para obtener unos pellets de alta resistencia y mejor calidad energética (Caviedes Buyecué & Gómez Zárate, 2021). Una de las recomendaciones a la hora de añadir un aglomerante es revolver hasta obtener una mezcla homogénea, garantiza que el aglomerante cumpla la función de reforzar la estructura interna del pellet.

Figura 18. *Método de mezclado manual para garantizar homogeneidad en la mezcla*



Figura 19. *Pellets obtenidos para cada una de las biomazas residuales*



Según la norma ASTM D444-80 para medir la resistencia al impacto la cual consta en dejar caer la muestra de una altura de 1,85 m a una placa metálica 4 veces y se registra el cambio de masa. Con esto se quiere evaluar la resistencia de cada tipo de biomasa, ya que uno de los principales factores que influyen en el uso de estas alternativas energéticas es el almacenamiento y su transporte, con la ecuación podemos determinar el porcentaje de durabilidad y en la tabla se muestran los resultados obtenidos.

$$\%D_{urabilidad} = \frac{M_f}{M_i} * 100 \quad (4)$$

Donde:

M_i = masa inicial de muestra de un pellet.

M_f = masa final de muestra de un pellet del fragmento más significativo.

Tabla 8. *Peso de las muestras antes y después de realizar el ensayo según la norma ASTM 440-80*

TIPOS DE MUESTRAS	REPETIBILIDAD								% Durabilidad Prom
	1		2		3		4		
	M_i	M_f	M_i	M_f	M_i	M_f	M_i	M_f	
MORA	1,30	0,96	1,23	1,01	1,05	1,01	1,50	1,30	84,70
CAÑA DE AZUCAR	1,32	1,13	1,28	1,04	1,34	1,00	1,55	1,29	81,18
MAÍZ	1,21	1,01	1,39	1,13	1,32	1,05	1,63	1,23	79,94
CAFÉ	1,28	1,20	1,49	1,22	1,42	1,18	1,32	1,07	84,95

6.4 Fase 5. Determinación del Costo de Producción de los pellets de la biomasa de residual.

Con el fin de obtener el precio de la producción del pellet es necesario identificar las variables que están presentes a lo largo del proceso de fabricación del producto en dos etapas.

Para realizar el análisis económico para la obtención de la materia prima para los pellets se puede evidenciar en el siguiente esquema de producción.

Figura 20. Esquema de Producción para los Pellet



La primera etapa consta del ítem 1 y 2, el cual se tiene en cuenta los precios asociados a la recolección, transporte y mano de obra de las materias primas que se encuentran en los diferentes sectores del área rural como se puede evidenciar en la tabla 9. El costo de la materia prima es económico, ya que estamos aprovechando son los residuos post cosecha de los cultivos, se debe tener en cuenta el costo de la recolección y transporte de las biomásas que se han caracterizado anteriormente.

Tabla 9. Costos asociados a la recolección de la materia prima

	MORA	CAÑA DE AZUCAR	MAÍZ	CAFÉ
MATERIA PRIMA [\$/KG]	0	1000	500	4000
RECOLECCIÓN [\$/KG]	857	500	500	0
TRANSPORTE [\$/KG]	200	200	200	200
TOTAL	1057	1700	1200	4200

Para la segunda etapa consta de los ítems restantes, y es denominada la etapa de producción del pellet; el cual se debe realizar el servicio de maquila con una empresa que se dedique a la

fabricación de pellet, Santander no cuenta con plantas dedicadas a la fabricación de pellet a partir de biomasa, por consiguiente aumentan los costos por transporte. También se deben tener en cuenta los costos asociados al embalaje del producto y su respectivo almacenamiento.

Tabla 10. *Costos asociados a la operación de la peletizadora*

Costo de operación de la peletizadora			
Ref.	Valor	Unidad	
Potencia	403	hp	
Potencia	300,638	Kv	
Eficiencia	0,87	-	
Potencia real	345,5609195	Kv	
Precio	976,28	\$/Kvh	
Costo	\$ 337.364	\$*h	
Producción	6000	kg/h	
Costo	\$ 56,2	\$/Kg	

Tabla 11. *Costos asociados a la operación del molino*

Costo de operación del Molino			
Ref.	Valor	Unidad	
Potencia	537	hp	
Potencia	400,602	Kv	
Eficiencia	0,85	-	
Potencia real	471,2964706	Kv	
Precio	976,28	\$/Kvh	
Costo	\$ 460.117	\$*h	
Producción	10000	kg/h	
Costo	\$ 46,0	\$/Kg	

Tabla 12. *Costos asociados al secado de la materia prima*

Costo de operación del Secador			
Ref.	Valor	Unidad	
Potencia	140	hp	

Potencia	104,44	Kv
Eficiencia	0,9	-
Potencia real	116,044	Kv
Precio	976,28	\$/Kvh
Costo	\$113.292	\$/h
Producción	500	kg/h
Costo	\$ 226,6	\$/Kg

Tabla 13. *Costos asociados al empaque de los Pellets*

Costo de Empaquetado		
Ref.	Valor	Unidad
Costo UNT	2000	COP
Cantidad	40	Kg
Hilo y etiqueta	25%	-
Costo	\$ 66,67	\$/Kg
OBS: fibras de polipropileno laminado a ambas caras		

Tabla 14. *Costos asociados a la segunda etapa de producción de los pellets (maquila)*

Proceso	Cantidad	Unidad	Precio
<i>Secado</i>	1	kg	\$ 26,58
<i>Molienda</i>	1	kg	\$ 46,01
<i>Acondicionamiento</i>	1	kg	\$ 26,58
<i>Peletizado</i>	1	kg	\$ 56,23
<i>Enfriamiento</i>	1	kg	\$ 77,00
<i>Empaque</i>	1	kg	\$ 66,67
<i>Almacenamiento</i>	2	kg	\$ 77,06
<i>Transporte</i>	1	kg	\$ 10,00
<i>Total</i>			\$ 786,13

Por lo anterior se tiene el costo correspondiente a cada etapa, se tiene que el costo de producción de un kilogramo de pellets equivale a cada tipo de biomasa residual como se observa en la tabla 11.

Tabla 15. *Costo de producción de los pellets para cada tipo de biomasa residual*

	MORA	CAÑA DE AZÚCAR	MAÍZ	CAFÉ
ETAPA 1	1057	1700	1200	1700
ETAPA 2	786,13	786,13	786,13	786,13
TOTAL	\$ 1.843,13	\$ 2.486,13	\$ 1.986,13	\$ 2.486,13

Con esto se puede inferir que el costo más económico para producir la energía serían los asociados a la primera etapa, por consecuencia la biomasa residual proveniente de la biomasa residual del cultivo de mora es más eficiente.

Por otro lado, los costos energéticos actuales en el segmento de los combustibles sólidos para el precio del carbón bituminoso son inferiores, pero ya se han realizado estudios donde se observa que los combustibles a base de biomasa residual tienen menor contenido de emisiones de carbono. Según el boletín de minería No. 5 de la subdirección de minería el precio del carbón promedio para 29 de septiembre de 2023 fue de \$ 538,45 COP por kilogramo, con lo anterior se observa que el proceso de transición energética que pueden implementar las centrales térmicas del país a causa de la legislación ambiental en Colombia, pueden ser los pellets de biomasa residual como una respuesta rápida para la disminución de las emisiones de CO₂.

7 Recomendaciones

En este trabajo de grado se presentan diferentes problemáticas relacionadas con el tratamiento de la materia prima, por tal razón es importante clasificar la biomasa en materia leñosa y no leñosa para realizar un manejo correcto durante la producción de pellets a partir de la biomasa residual.

Lo recomendable es utilizar un molino de cuchillas para la biomasa leñosa ya que este será el encargado de cortar las fibras de las capas exteriores del tallo y así desintegrar la materia prima, por otro lado, la biomasa no leñosa se puede pulverizar mediante un molino de martillos, esta máquina está diseñada para pulverizar la materia prima según el tamaño de la criba para clasificar el tamaño del grano y así facilitar la compactación de la biomasa. En comparación estas dos alternativas se deben desarrollar en base seca, ya que la presencia de humedad causa la acumulación de grumos, aumento de temperatura y un tratamiento de pre-secado; lo cual causa pérdidas en la eficiencia del equipo que se ven reflejados en mayores costos de producción.

El alcance de este proyecto está limitado al municipio de Santa Bárbara, ya que la estructura y composición química cambia según las condiciones ambientales. Por tal razón es importante evaluar las características fisicoquímicas de cada una de las alternativas para garantizar un poder calorífico en cada región donde se vaya a implementar el desarrollo del combustible sostenible.

Así mismo para el desarrollo de un modelo empírico, la recolección de información de los cultivos de mora, café, maíz y caña de azúcar en los diferentes sectores del país facilitarán el desarrollo de un modelo matemático que se asemeja a la capacidad energética de cada biomasa.

8 Conclusiones

Se observa que la biomasa residual proveniente del cultivo de mora arroja unos resultados positivos como fuente de combustible sólido, destacando por sus propiedades energéticas y además el costo para implementación de este producto en comparación de las otras biomasa residual es más bajo.

Durante el proceso de molienda se descubre que la biomasa se segmenta de acuerdo con sus características fisiológicas, ya que las materias primas provenientes de los cultivos de caña, maíz y mora, la capa exterior están presentes fibras que hacen que el molino de martillos no sea el adecuado para desintegrar la materia, es muy importante conocer cómo está compuesta la biomasa residual para seleccionar las herramientas acordes a composición de la materia prima. También se destaca que no hay una diferencia significativa en cuanto a su poder calorífico, más sin embargo estas fibras no permiten la compactación adecuada para el pellet.

El valor del carbón bituminoso puede llegar a alcanzar valores tres veces más económicos que la producción de pellets a partir de la biomasa residual, pero estos precios pueden disminuir si la cantidad fabricación se hace a grande escala, pero su contenido energético tiene una diferencia promedio entre los 10 -14 MJ/Kg.

La ecuación de Dulong es una aproximación para determinar el poder calorífico superior, pero comparado con los resultados obtenidos en la bomba calorimétrica se observa que puede presentar un porcentaje de error entre 16% al 19%. Por Lo que se recomienda implementar ecuaciones o desarrollar modelos matemáticos que permitan evaluar de manera más precisa las propiedades durante el análisis próximo

9 Referencias Bibliográficas

- ANH, A. N. (31 de Julio de 2023). *AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS*. Obtenido de <https://www.anh.gov.co/es/operaciones-y-regal%C3%ADas/datos-y-estadisticas/>
- Asocaña. (2024). *Informe Anual 2023-2024*. Cali: Asocaña.
- ASTM International. (1980). Standard Test Method for Ash Content in Wood (ASTM Standard No. D444-80). Retrieved from <https://www.astm.org>.
- Atuesta, B. L., & Sierra, V. F. (2015). *Caracterización Físico-Química De Pellets Producidos A Partir De Mezclas 50/50 Carbón Bituminoso/Madera Residual*. Bogotá: Informador Técnico (Colombia).
- Caviedes Buyecué, N. J., & Gómez Zárate, J. D. (2021). *Evaluación técnico-económica de la producción de pellets elaborados a partir del residuo de la postcosecha del cacao*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Colombiaverde. (01 de Febrero de 2024). *Colombia Verde*. Obtenido de <https://colombiaverde.com.co/geografia/agricultura/cultivos-de-cafe-en-colombia/>
- Colprensa. (13 de Noviembre de 2021). *Gobierno inauguró planta de generación de biomasa forestal*. Obtenido de El Universal: <https://www.eluniversal.com.co/colombia/2021/11/13/gobierno-inauguro-planta-de-generacion-de-biomasa-forestal/>
- Correa, Z. S. (2016). *Análisis Teórico De La Combustión De Biomasa Residual Proveniente De Cultivos Tradicionales En Colombia*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

Cutimbo, Q. M. (2017). *Estudio Exploratorio del Proceso de Co-Combustión de Carbón y Biomasa Mediante Análisis Termogravimétrico para su Aprovechamiento en la Generación de Calor*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

European Committee for Standardization. (2010). Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 1: General requirements (EN Standard No. 14961-1:2010). Retrieved from <https://www.cen.eu>

Fenalce. (08 de Mayo de 2020). *Fenalce*. Obtenido de <https://fenalce.co/wp-content/uploads/2021/10/Maiz-situacion-pres-8-de-mayo-de-2020-Fenalce.pdf>

International Organization for Standardization. (2022). Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 6: Graded non-woody pellets (ISO Standard No. 17225-6:2022). Retrieved from <https://www.iso.org>

IRENA, A. I. (2023). *Seguimiento del ODS7: Informe sobre los progresos de la energía en 2023*.

Minagricultura. (01 de Marzo de 2020). *Minagricultura*. Obtenido de <https://sioc.minagricultura.gov.co/Mora/Documentos/2020-12-31%20Cifras%20Sectoriales.pdf>

MinAgricultura. (02 de marzo de 2022). *Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural*. Obtenido de <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/MinAgricultura-consolida-estrategia-para-disminuci%C3%B3n-de-importaciones-de-soya-y-ma%C3%ADz.aspx>

Subirós Ruiz, F. (2015). *Cultivo de la Caña de Azúcar*. Madrid: Mundi-Prensa.

UPME. (2024). *Proyección de la Demanda de Energía Eléctrica, Potencia Máxima y Gas Natural 2023-2037*. Bogotá: upme.gov.co.