

Elaboración De Comprimidos De Biomasa Provenientes De Residuos Sólidos De La Extracción
De Aceite De Palma

Cristian Fernando Quesada Martínez y Oscar Daniel Rueda Ballesteros

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Químico

Modalidad Investigación

Director

Fredy Augusto Avellaneda Vargas

Ingeniero Químico, PhD.

Codirector

Yesid Javier Rueda Ordóñez

Ingeniero Mecánico, PhD.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2022

DEDICATORIA

A mis padres Oscar Rueda y Aidé Ballesteros quienes me apoyaron económicamente y emocionalmente durante todo mi trayecto universitario y son mi motivo de poder luchar y triunfar tanto personal como profesionalmente.

A mi pareja sentimental, Daniela Guerrero quien en la distancia fue un apoyo muy importante, y fue la persona que estuvo en los momentos difíciles de mi vida universitaria.

A mi compañero de trabajo, Cristian Quesada quien se convirtió en un gran amigo y fue quien luchó junto a mi para poder sacar adelante el presente proyecto.

Oscar Daniel Rueda.

A Dios por guiarme y darme fortaleza de sobrellevar los momentos difíciles.

A mis padres Héctor Quesada y Lina Luz Martínez y a mi hermano Mateo Quesada por su confianza y apoyo incondicional durante todos estos años, sin ellos nada de esto hubiese sido posible.

A Yina Díaz, mi pareja sentimental, por escucharme y brindarme su apoyo cuando lo necesité y por sus palabras de aliento durante estos años.

A mi compañero Oscar Rueda con quien llevé este trabajo a término.

Cristian Fernando Quesada Martínez.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander, específicamente a las escuelas de Ingeniería Química e Ingeniería Mecánica y al proyecto con código 2688 por ponernos en disposición los recursos necesarios para el proyecto.

A la empresa Palmeras de Puerto Wilches S.A. por facilitar la materia prima necesaria para el proyecto.

A los profesores Fredy Avellaneda y Yesid Rueda por la paciencia que tuvieron y por confiar en nosotros y permitirnos demostrar nuestras habilidades y conocimientos aprendidos durante nuestra carrera universitaria.

A los técnicos de laboratorio Eduardo Carrillo y Wilson Carrillo quienes nos brindaron toda la colaboración en la gestión y uso de los equipos de laboratorio.

A los ingenieros Joaquín Orozco y Guillermo Acero Medina quienes fueron fundamentales en la gestión de las pruebas necesarias para la investigación.

Tabla de Contenido

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. OBJETIVOS	14
1.1 Objetivo general	14
1.2 Objetivos específicos.....	14
2. ESTADO DEL ARTE	14
3. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA.....	16
3.1 Fase 1: Adquisición y acondicionamiento del material	16
3.1.1 Recepción de la biomasa	17
3.1.2 Determinación del contenido de humedad de la materia prima.	17
3.1.3 Secado del material.....	17
3.1.4 Molienda y tamizado de la materia prima	17
3.1.5 Densidad aparente.....	18
3.1.6 Caracterización de la materia prima	18
3.2 Fase 2: Elaboración de comprimidos por proceso de densificación	18
3.2.1 Estudio preliminar	18
3.2.2 Estudio principal.....	19
3.3 Fase 3: Análisis de los comprimidos obtenidos	20
3.3.1 Durabilidad	21
3.3.2 Poder calorífico.....	22
3.3.3 Densidad	22
3.3.4 Termogravimetría	23
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
4.1 Adquisición y acondicionamiento del material	23
4.1.1 Recepción de la biomasa	24
4.1.2 Determinación del contenido de humedad de la materia prima	25
4.1.3 Secado del material.....	26
4.1.4 Molienda y tamizado de la materia prima	27
4.1.5 Densidad aparente.....	28
4.1.6 Caracterización de la materia prima	29

4.2 Resultados estudio preliminar	30
4.2.1 Poder calorífico.....	31
4.2.2 Durabilidad	33
4.3 Resultados estudio principal.....	35
4.3.1 Durabilidad	36
4.3.2 Densidad	39
4.3.3 Poder calorífico.....	42
4.3.4 Humedad final	44
4.3.5 Termogravimetría (TGA)	45
5. CONCLUSIONES.....	47
6. RECOMENDACIONES	48
BIBLIOGRAFÍA	49

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Diagrama de la metodología del proyecto.....	16
Figura 2. Fibra de mesocarpio seleccionada como materia prima.....	24
Figura 3. Racimos vacíos (raquis) seleccionado como materia prima.....	24
Figura 4. Gráfica de distribución granulométrica de la fibra de mesocarpio y raquis.....	28
Figura 5. Gráfica tipo aglomerante - contenido de aglomerante vs poder calorífico de estudio preliminar.....	32
Figura 6. Gráfica tipo de aglomerante – contenido de aglomerante vs durabilidad de estudio preliminar.....	34
Figura 7. Gráfica temperatura de prensado – contenido de raquis con aglomerante vs durabilidad de estudio principal.....	36
Figura 8. Gráfico de temperatura de prensado – contenido de raquis sin aglomerante vs durabilidad de estudio principal.....	36
Figura 9. Pellets correspondientes al tratamiento M4 del estudio principal.....	38
Figura 10. Pellets correspondientes al tratamiento M1(A) y M2(C) del estudio principal y pellets del tratamiento M1(B) y M2(D) después de tres semanas.....	39
Figura 11. Gráfica temperatura de prensado – contenido de raquis con aglomerante vs densidad.....	39
Figura 12. Gráfica temperatura de prensado – contenido de raquis sin aglomerante vs densidad.....	40
Figura 13. Gráfica temperatura de prensado – contenido de raquis con aglomerante Vs poder calorífico de estudio principal.....	43
Figura 14. Gráfica temperatura de prensado – contenido de raquis sin aglomerante Vs poder calorífico de estudio principal.....	44
Figura 15. Resultados del análisis de TGA para diferentes tratamientos.....	46
Figura 16. Cilindro del molde para la elaboración de pellets.....	55
Figura 17. Tapa del molde para la elaboración de pellets.....	55
Figura 18. Montaje de molde para la elaboración de pellets.....	56
Figura 19. Imagen real del molde para la elaboración de pellets.....	56
Figura 20. Tambor cerámico utilizado para determinar la durabilidad de los pellets.....	57
Figura 21. Deflectores de madera adaptados al tambor cerámico para las pruebas de durabilidad.....	58

Figura 22. Montaje del tambor rotatorio cerámico para la determinación de la durabilidad.....	58
Figura 23. Pellets correspondientes al tratamiento M1.....	59
Figura 24. Pellets correspondientes al tratamiento M2.....	59
Figura 25. Pellets correspondientes al tratamiento M3.....	59
Figura 26. Pellets correspondientes al tratamiento M5.....	60
Figura 27. Pellets correspondientes al tratamiento M6.....	60
Figura 28. Pellets correspondientes al tratamiento M7.....	61
Figura 29. Pellets correspondientes al tratamiento M8.....	61
Figura 30. Pellets correspondientes al tratamiento M9.....	61
Figura 31. Análisis de termogravimetría correspondientes al tratamiento M10.....	62
Figura 32. Análisis de termogravimetría correspondientes al tratamiento M11.....	62
Figura 33. Análisis de termogravimetría correspondientes al tratamiento M5.....	63
Figura 34. Análisis de termogravimetría correspondientes al Raquis	63
Figura 35. Análisis de termogravimetría correspondientes a la Fibra.	63

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Diseño experimental de estudio preliminar.	19
Tabla 2. Factores y niveles del diseño experimental de estudio principal.	20
Tabla 3. Diseño experimental de estudio principal.	20
Tabla 4. Humedad de recepción de las materias primas.	25
Tabla 5. Humedad post-tratamiento de las materias primas.	26
Tabla 6. Densidad aparente de la fibra de mesocarpio y el raquis.	28
Tabla 7. Análisis inmediato del raquis.	29
Tabla 8. Análisis inmediato de la fibra de mesocarpio.	30
Tabla 9. Tratamientos elaborados sin aglomerante.	35
Tabla 10. Humedad final de los diferentes tratamientos.	44

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Molde utilizado para la elaboración de los pellets.....	55
Apéndice B. Tambor rotatorio usado en la prueba de durabilidad	57
Apéndice C. Imágenes de los comprimidos de biomasa elaborados	59
Apéndice D. Gráficas de termogravimetría	62

RESUMEN

Título: Elaboración de comprimidos de biomasa proveniente de residuos sólidos de la extracción de aceite de palma

Autor: Cristian Fernando Quesada Martínez, Oscar Daniel Rueda

Palabras claves: Combustibles alternativos, Comprimidos, Residuos sólidos, Cera de abejas, Aceite de palma.

El presente proyecto tiene como objetivo fabricar comprimidos de biomasa residual sólida de la extracción del aceite palma para su aprovechamiento como biocombustibles. Los residuos seleccionados fueron el raquis y la fibra de mesocarpio al presentar mayores inconvenientes por sus grandes volúmenes de obtención y alta actividad biológica por su elevado contenido de humedad, además del interés del ente industrial por explorar su utilidad. Esta biomasa fue sometida a un acondicionamiento previo. Como estudio preliminar se estudiaron tres tipos de aglomerante (vela cebo, alcohol cetílico y cera de abeja) a diferentes porcentajes dentro de la muestra (2%, 6% y 10%). La cera de abeja al 10% fue el aglomerante seleccionado para el estudio principal, basado en el mejoramiento de los parámetros de durabilidad y poder calorífico en comparación con los otros dos aglomerantes.

En el estudio principal se evaluó el efecto de 3 temperaturas de prensado (45°C, 90°C y 135°C), y 3 porcentajes de contenido de raquis dentro de la muestra (15%, 50% y 85%) sobre el poder calorífico, la durabilidad, la densidad y la humedad de los comprimidos con y sin aglomerante. La adición del aglomerante mejoró los tres primeros parámetros mencionados, pero su homogenización con la biomasa representó un gasto energético al proceso y elevadas temperaturas se generan pérdidas de este. La temperatura más favorable para el proceso fue la de 90°C beneficiando los resultados de densidad y durabilidad sin representar un gasto energético tan alto como la de 135°C. En cuanto al contenido de raquis, puede utilizarse hasta en un 50% sin que afecte significativamente las características energéticas y mecánicas de los comprimidos elaborados. Finalmente, se afirma que fue posible elaborar comprimidos de biomasa residual de la extracción de aceite de palma con valores adecuados en sus características mecánicas y energéticas para ser usado como biocombustible sólido.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Fredy Augusto Avellaneda Vargas.
Codirector: Yesid Javier Rueda Ordóñez

Abstract

Title: Elaboration of biomass tablets from solid residues from palm oil extraction*

Authors: Cristian Fernando Quesada Martínez, Oscar Daniel Rueda**

Keywords: Alternative fuels, Tablets, Solid waste, Beeswax, Palm oil.

Description:

This project aims to manufacture solid residual biomass tablets from palm oil extraction for use as biofuels. The selected residues were empty fruit bunches and mesocarp fibers, as they presented major drawbacks due to their large volumes of production and high biological activity due to their high moisture content, in addition to the interest of the industrial entity in exploring their usefulness. This biomass was subjected to prior conditioning. As a preliminary study, three types of binder were studied (bait candle, cetyl alcohol and beeswax) at different percentages within the sample (2%, 6% and 10%). 10% beeswax was the binder selected for the main study, based on improved durability and calorific value parameters compared to the other two binders.

In the main study, the effect of 3 pressing temperatures (45°C, 90°C and 135°C), and 3 percentages of rachis content within the sample (15%, 50% and 85%) were evaluated on the calorific value, durability, density and humidity of the tablets with and without binder. The addition of the binder improved the first three parameters mentioned, but its homogenization with the biomass represented an energy expense to the process and high temperatures generated losses of this. The most favorable temperature for the process was 90°C, benefiting the density and durability results without representing an energy expenditure as high as 135°C. Regarding the content of empty fruit bunches, it can be used up to 50% without significantly affecting the energetic and mechanical characteristics of the elaborated tablets. Finally, it is stated that it was possible to make residual biomass tablets from palm oil extraction with adequate values in their mechanical and energy characteristics to be used as solid biofuel.

*Bachelor Thesis

**Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Fredy Augusto Avellaneda Vargas. Co-director: Yesid Javier Rueda Ordóñez

INTRODUCCIÓN

La palma aceitera (*Elaeis guineensis*) es una planta autóctona de la zona húmeda de África occidental y central (Mutsaers, 2019). Actualmente, es cultivada de manera comercial para la obtención del aceite de sus frutos en diferentes países a nivel mundial, principalmente en los que se encuentran en las regiones geográficas que comprenden los trópicos de Cáncer y Capricornio (Cárdenas, 2016), siendo Indonesia y Malasia los que mayor participación tienen en el mercado con alrededor de un 85% de la producción global de aceite palma (Asmar, 2020).

La producción mundial de aceite de palma ha crecido enormemente durante los últimos años, con el propósito de satisfacer su demanda y la de sus productos derivados a raíz del crecimiento económico mundial, en 1970 se producían 2 millones de toneladas, para el año 2018 esta cifra fue 35 veces mayor, alcanzando los 71 millones de toneladas anuales (Ritchie y Roser, 2021). La expansión de esta industria se vio reflejada principalmente en países en desarrollo, por ejemplo, Malasia que aumentó su producción de aceite de palma crudo de 2.5 millones de toneladas en 1980 a 19,5 millones de toneladas en 2019 (Mekhilef et al., 2011) y Colombia, cuya producción de este bien incrementó de 753 mil toneladas en 2010 a 1.55 millones de toneladas en 2020 (Redagrícola, 2021), catalogándose así, como el primer país productor de América Latina y cuarto a nivel mundial.

Lamentablemente este fenómeno viene acompañado de un aumento en la cantidad de residuos sólidos resultantes del proceso de extracción, como lo son el raquis que se obtiene al separar los frutos del racimo, la fibra de mesocarpio resultante del prensado del fruto y el cuesco obtenido en el rompimiento de la nuez ubicada dentro del fruto (Pérez y Lopez, 2019). Según Elbersen (2013), por cada tonelada de aceite obtenido se generan de 0,3 a 0,4 toneladas de raquis; 0,3 a 0,5 toneladas de fibra y 0,1 a 0,3 toneladas de cuesco.

El uso que se le da a dos estos residuos mayoritarios habitualmente, el raquis como abono en los cultivos y la fibra sin densificar como combustible en las calderas generadoras de vapor, no permite que sean aprovechados en su totalidad (Castillo et al., 2014), debido a que los grandes volúmenes obtenidos de estos y sus altos niveles de humedad, ocasionan problemas en su almacenamiento dado que el material se acumula y a mediano plazo comienza a degradarse lo que trae consigo impedimentos en la ignición de los mismos, desperdiciando así el potencial energético de los residuos, factor imperioso al momento de perfilarlos como una alternativa de aprovechamiento energético en las plantas de beneficio (Zapata et al., 2017).

El enfoque del presente proyecto es generar una alternativa de gestión de los residuos sólidos de la extracción de aceite de palma, sometiendo a una compactación mecánica mediante un proceso de densificación donde se estudie la influencia de variables como temperatura de prensado, composición del material y uso de aglomerante, en las propiedades energéticas y mecánicas de los comprimidos con el fin de obtener productos con mayor potencial energético y mejores características de almacenamiento y transporte. Por lo cual se plantea: ¿Cuáles son las condiciones de operación y las variables que permiten obtener mejores comprimidos de biomasa residual de la extracción de aceite de palma para que sean aprovechados como biocombustible sólido?

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

Elaborar comprimidos de biomasa residual sólida de la palma de aceite para su aprovechamiento como biocombustibles sólidos.

1.2 Objetivos específicos

- Identificar la materia prima para la elaboración de los comprimidos de biomasa.
- Obtener los comprimidos a partir de la biomasa seleccionada a distintas condiciones de operación.
- Caracterizar los comprimidos obtenidos, determinando así las condiciones favorables para su elaboración.

2. ESTADO DEL ARTE

Durante la extracción del aceite de palma se generan diversos residuos de biomasa como fibras, cuescos y racimos vacíos (raquis) (Arzola et al., 2012). Estos residuos representan una fuente importante de energía que a través de diferentes procesos puede ser aprovechada de forma eficiente como combustible dentro de las plantas de beneficio. La densificación es una de las técnicas favorables para mejorar las propiedades de combustión, almacenamiento y transporte de biomasa, esta se basa en compactar material suelto para formar un producto densificado y homogéneo con una mayor cantidad de energía por unidad de volumen, uno de los procesos en que se utiliza es la peletización (Faizal et al., 2016).

Las investigaciones desarrolladas en torno al aprovechamiento de los residuos de la industria de la palma aceitera mediante peletizado se han enfocado en el análisis de los diversos parámetros que afectan las propiedades energéticas y mecánicas de estos comprimidos fabricados. Arzola et al. (2014) realizaron un estudio experimental del proceso de peletización, en donde los

residuos utilizados fueron cuesco y fibra de mesocarpio, peletizados con una presión de 100 MPa, allí se evaluaron factores como el contenido de aglomerante (melaza) el cual adiciona a la mezcla en fracciones de 4%, 8% y 12%; el contenido de humedad ajustados al 10%, 14% y 18% y la fracción másica de cuescos en las mezclas de biomasa, cuyos valores variaron entre 40%, 50% y 60%. Los pellets con las mejores características de calidad se obtuvieron para una materia prima de biomasa con 10% de contenido de humedad, 4% de contenido de aglomerante, 40% en masa de cuescos y el porcentaje restante corresponde a la fibra. Para esta combinación de factores, se obtienen pellets con densidad de 1230 Kg/m³, índice de durabilidad del 94.6% y resistencia a la flexión de 2.1 MPa.

Adicionalmente, se encontró que Rincón y Gonzales (2014) realizaron un estudio de factibilidad para la fabricación de pellets usando cuesco y fibra de mesocarpio como materia prima. Las variables de estudio fueron: composición de la mezcla y tamaño de partícula. Los autores diseñaron un arreglo experimental que consistió de 5 muestras escogidas aleatoriamente: donde se varió el porcentaje másico de cuesco en 0%, 50% y 100% de la mezcla y se manejó una presión de prensado de 4 Mpa. También trabajaron con dos rangos de tamaño de partícula lo cuales son: (<0.30 mm) y valores entre 0.30 mm y 1.18 mm. De lo anterior se pudo observar que un menor tamaño de partícula favoreció a la densidad de los pellets, de modo que, los pellets hechos de fibra al 100% y tamaño de partícula menor a 0.30 mm mostraron los mejores resultados de densidad con un valor de 1280 Kg/m³, resistencia al impacto de 69.15%, contenido de humedad de 6,70% y poder calorífico de 18421,92 KJ/Kg, el cual indica el potencial de aprovechamiento de la fibra de mesocarpio como materia prima en la fabricación de pellets.

Por su parte, Brunerová et al. (2018) utilizaron raquis como materia prima para la elaboración de pellets y presentaron buenos resultados en relación a su potencial energético como

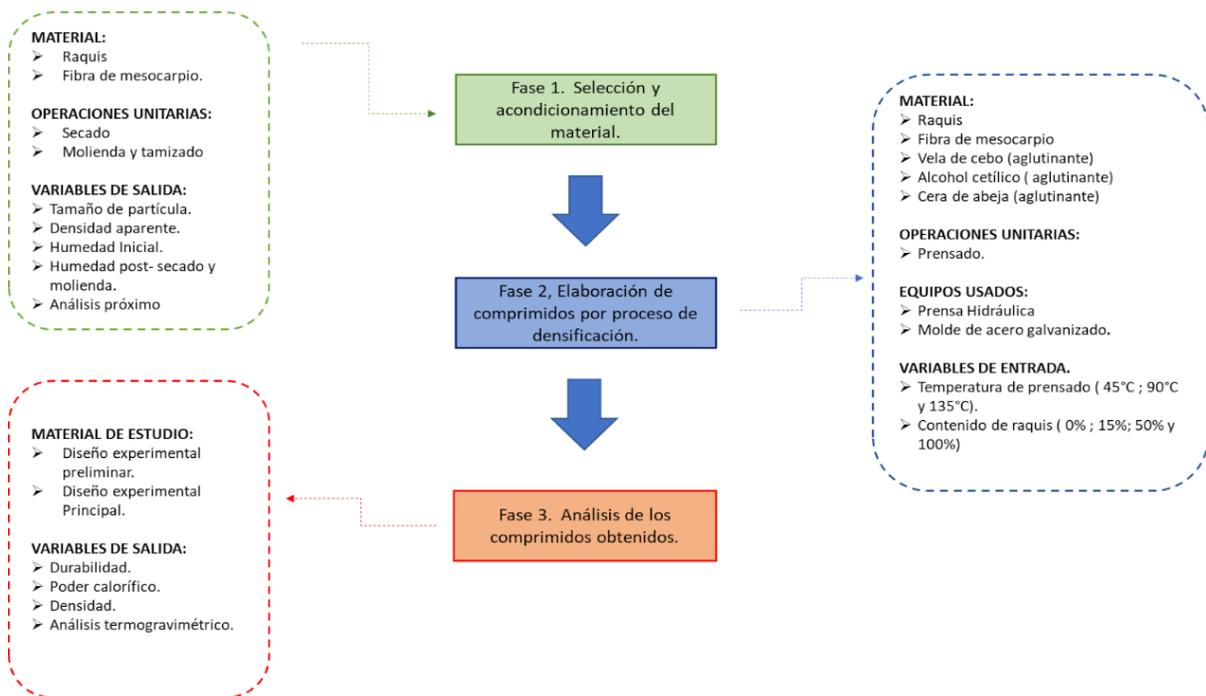
combustible, con unos valores de poder calorífico de 16390 KJ/Kg, durabilidad mecánica de 97.4%, porcentaje de humedad del 7.07% y densidad de 758.12 Kg/m³. Sin embargo, estos pellets presentaron un valor elevado de contenido de ceniza (9.41%) al ser comparado con otros estudios como los de Nasrin et al. (2008), Bemgba et al. (2012) y Lam et al. (2015) que trabajaron con la misma biomasa y obtuvieron contenidos de ceniza de 4.70%, 4.56% y 5.47% respectivamente. El contenido elevado de cenizas es atribuido a la presencia de impurezas en la biomasa.

3. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

La metodología experimental se presenta en la Figura 1.

Figura 1

Diagrama de la metodología del proyecto.



3.1 Fase 1: Adquisición y acondicionamiento del material

3.1.1 Recepción de la biomasa

La materia prima con la que se trabajó (raquis y fibra de mesocarpio) fue proporcionada por Palmeras de Puerto Wilches S.A. y recibidas por los integrantes del proyecto en la Universidad Industrial de Santander.

3.1.2 Determinación del contenido de humedad de la materia prima.

La determinación del porcentaje de humedad inicial se realizó en una balanza determinadora de humedad MX50 a una temperatura de 120°C para muestras de 5 g de raquis y 5 g de fibra cada biomasa por separado. El porcentaje de humedad de la materia prima es determinado nuevamente después de la etapa de secado y de molienda.

3.1.3 Secado del material

El raquis y la fibra fueron sometidos a un proceso de secado con el propósito de reducir su contenido de humedad a valores entre 7% y 10%. La operación se realizó en un horno digital de convección forzada con flujo de aire por 15 horas a una temperatura de 80°C.

3.1.4 Molienda y tamizado de la materia prima

Se realizó un proceso de disminución de tamaño de partícula al raquis y la fibra con ayuda de un molino de martillo y cuchillas con un tamiz de 0,8 mm. Las biomásas fueron molidas de manera individual.

A la biomasa resultante de la molienda le fue realizada una distribución granulométrica. Esta fue llevada a cabo tomando como base el concepto del método estándar para la determinación de la distribución de tamaño de partícula para combustibles sin comprimir presentado en la norma UNE-EN ISO 17827-2 (AENOR, 2016).

3.1.5 Densidad aparente

La densidad aparente de las biomásas seleccionadas después de la molienda fue determinada según la norma UNE-EN ISO 17828 (AENOR, 2016). Analizar esta propiedad es importante debido que las biomásas con un valor bajo de densidad aparente requieren de un proceso de densificación para mejorar sus características de almacenamiento, transporte y además aumentar su densidad energética.

La densidad aparente o a granel (BD) se expresa en Kg/m^3 según la ecuación 1, donde m_1 es la masa del recipiente vacío, m_2 es la masa del recipiente lleno y V es el volumen del recipiente.

$$BD = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (\text{Ec.1})$$

3.1.6 Caracterización de la materia prima

Se realizó el análisis inmediato tanto para el raquis como para la fibra de mesocarpio con el fin de obtener la composición en peso de humedad, volátiles altos, carbono fijo y cenizas, esto se hizo a través de un análisis TGA en una balanza TA Instruments TGA 5500.

3.2 Fase 2: Elaboración de comprimidos por proceso de densificación

3.2.1 Estudio preliminar

Se aplicó un diseño experimental de dos factores con tres niveles cada uno, usando como biomasa a la fibra de mesocarpio con el propósito de seleccionar el aglomerante y la cantidad de este que se usarían en el estudio principal, y a su vez, estudiar su efecto sobre los comprimidos junto con las otras variables. Para este fin se realizó un análisis de los resultados de poder calorífico y durabilidad del diseño experimental factorial. La temperatura de prensado fue fijada en 90°C . La Tabla 1 muestra la disposición del diseño experimental.

Variables/factores:

- Tipo de aglomerante (vela de cebo, cera de abeja, alcohol cetílico).
- Contenido de aglomerante dentro de la muestra (2%, 6% y 10% del total de la muestra).

Tabla 1

Diseño experimental de estudio preliminar.

Nomenclatura	Tipo aglomerante	Contenido de aglomerante
C2		2%
C6	Cera de abeja	6%
C10		10%
V2		2%
V6	Vela de cebo	6%
V10		10%
A2		2%
A6	Alcohol Cetílico	6%
A10		10%

3.2.2 Estudio principal

Después de analizar los resultados del estudio preliminar, se seleccionó el aglomerante y el contenido de este en la mezcla que fue usado en las muestras del estudio principal. Se diseñó un experimento de tipo factorial. Se trabajó con 2 factores con 3 niveles cada uno, lo anterior se encuentra contenido en la Tabla 2. Se realizó un análisis de los resultados de poder calorífico, durabilidad, humedad y densidad, del diseño experimental factorial con el fin de estudiar el efecto de las variables sobre las características de los comprimidos. La Tabla 3 muestra la disposición del diseño experimental. M10 y M11 se elaboraron con el propósito de realizar una comparación de sus resultados de análisis inmediato con los obtenidos por las biomásas utilizadas en este estudio. Adicionalmente, se elaborarán comprimidos sin aglomerante para aquellos tratamientos cuyos valores se destaquen entre los resultados de poder calorífico, durabilidad, humedad y densidad.

Variables/factores:

- Temperatura de prensado.

- Contenido de raquis dentro de la muestra (tomando a la mezcla como el 100%, el raquis y la fibra son conforman el 90% y el 10% restante corresponde al aglomerante).

Tabla 2

Factores y niveles del diseño experimental de estudio principal.

Factores / Nivel	Nivel bajo (-1)	Punto central (0)	Nivel alto (1)
Temperatura de prensado (°C)	45	90	135
Contenido de raquis (%)	15	50	85

Tabla 3

Diseño experimental de estudio principal.

Nomenclatura	Temperatura de prensado (°C)	Contenido de raquis (%)
M1	45	15
M2	45	50
M3	45	85
M4	90	15
M5	90	50
M6	90	85
M7	135	15
M8	135	50
M9	135	85
M10	90	0
M11	90	100

3.3 Fase 3: Análisis de los comprimidos obtenidos

Una serie de pruebas fueron llevadas a cabo sobre los comprimidos con el propósito de determinar parámetros relevantes direccionados a evaluar su función destinada como combustible.

Entre las pruebas realizadas se encuentran las siguientes:

3.3.1 Durabilidad

La durabilidad mecánica, que se considera el indicador más importante de la calidad mecánica de los biocombustibles sólidos, se define como la capacidad de los pellets para soportar fuerzas destructivas durante la manipulación, el transporte y el almacenamiento (Gilvari et al., 2019). Los pellets que se desintegran fácilmente producen altas emisiones de polvo, este altera los sistemas de alimentación de calderas, provocando una combustión no homogénea dentro del proceso y aumenta también el riesgo de incendio y explosión durante la manipulación, transporte y almacenamiento de los pellets (Temmerman et al., 2006).

En este estudio, el índice de durabilidad se midió para 10 pellets por cada tratamiento utilizando un tambor giratorio cerámico (21,8 cm de diámetro) con 4 deflectores de 20 mm de alto en sus paredes laterales como se puede apreciar en las imágenes del apéndice B. Después de 6 minutos y medio de rotación a 70 rpm el contenido dentro del tambor era vertido sobre un tamiz con tamaño de malla de 4.75 mm, los pellets o las fracciones de estos que no pasaron por el tamiz eran pesados. Este valor y el del peso inicial de los pellets son utilizados en la ecuación 2 para determinar el índice de durabilidad. Esta prueba se basa en el concepto del método estándar para la determinación de la durabilidad mecánica de los pellets y briquetas presentado en la norma UNE-EN ISO 17831-1(AENOR, 2016).

$$DI = \frac{M_f}{M_o} * 100 \quad (\text{Ec.2})$$

Dónde:

DI: índice de durabilidad (%)

M_o : masa inicial de gránulos utilizados en la prueba (g).

M_f : masa restante de gránulos utilizados en la prueba (g).

3.3.2 Poder calorífico

El poder calorífico se define como la cantidad de energía generada al oxidar completamente una cantidad unitaria de una sustancia (Kabe et al., 2004), este parámetro fue determinado mediante el uso de una bomba calorimétrica. Este equipo mide la diferencia de temperatura de un fluido (agua en este caso) en el que se sumerge la bomba (cámara de reacción) antes y después de la combustión de la muestra, determinando de esta forma la energía liberada. La mayor parte del agua presente en los gases de combustión se condensa dentro de la bomba debido a las condiciones de temperatura y alta presión dentro de esta, por ende, el poder calorífico determinado es el superior.

3.3.3 Densidad

El cálculo de la densidad, ecuación 3, (m es la masa o peso del pellet y V hace referencia al volumen del mismo) de cada tipo de pellets se realizó utilizando los datos de dimensionamiento contenidos dentro de la Tabla 13 y teniendo en cuenta su forma geométrica cilíndrica para el cálculo del volumen por medio de la ecuación 4. La longitud (h), el diámetro y el peso de los pellets obtenidos de los diferentes tratamientos fue determinado al promediar los valores de estas mediciones realizadas a tres pellets de cada tratamiento, para la medición de la longitud y el diámetro se usó un calibrador digital y para el peso se usó una balanza digital con una sensibilidad de 0.01.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Ec.3})$$

$$V = \pi * r^2 * h \quad (\text{Ec.4})$$

Donde r es el radio y h es la altura.

3.3.4 Termogravimetría

Se realizó el análisis inmediato de las muestras M5, M10 y M11 con el fin de obtener la composición peso de humedad, volátiles altos, carbono fijo y cenizas, esto se hizo a través de un análisis TGA en una balanza TA Instruments TGA 5500, para posteriormente realizar una comparación con los resultados del análisis inmediato para las materias primas. La determinación de la humedad de los demás comprimidos se realizó según la sección 3.1.2.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Adquisición y acondicionamiento del material

Las materias primas seleccionadas en el presente proyecto fueron el raquis y la fibra de mesocarpio (fibra). Puesto que son estas dos las que presentan mayores inconvenientes al momento de darles un uso de valor agregado debido a sus grandes volúmenes de obtención y alta actividad biológica como consecuencias de su elevado contenido de humedad (entre 60% a 67% para el raquis (Brunerová et al., 2018) y entre 36% a 48% para la fibra de mesocarpio (Subramaniam et al., 2004; Subramaniam, 2013). Por lo cual requieren de más estudio enfocado a la búsqueda de alternativas para mejorar su aprovechamiento. Adicionalmente, el ente industrial manifestó interés en explorar la utilidad del raquis o mezcla de él junto con la fibra, necesidad surgida por la proyección nacional de reemplazar los cultivos actuales (*Elaeis Guineensis*) por una nueva variedad de palma de aceite que sería un híbrido entre *Elaeis Guineensis* y *Elaeis oleifera* cuyo fruto carece de almendra por lo cual los residuos mayoritarios del proceso de extracción pasarán a ser exclusivamente el raquis y la fibra. El cuesco por su parte es un combustible de biomasa de buena calidad con distribución uniforme del tamaño, fácil manejo, fácil trituración y actividad biológica limitada debido a su bajo contenido de humedad (11-13%). Esto lo ha convertido en un

recurso de biomasa atractivo para usarse directamente en las plantas de energía de biomasa Europa y la región Asia-pacífico (Zafar, 2021).

4.1.1 Recepción de la biomasa

La fibra de mesocarpio se recibió de la forma como se muestra en la Figura 2, la cual es como sale del proceso de prensado en el proceso de extracción de aceite. Por otro lado, el raquis no se recibió de la forma natural en la que se encuentra Figura 3a, sino que, se recibió triturada (Figura 3) por gestión de la empresa proveedora de dichos residuos. Esto quiere decir que, para realizar un proceso más eficaz y cómodo de secado y molienda, el raquis representa un trabajo extra en comparación a la fibra de mesocarpio.

Figura 2

Fibra de mesocarpio seleccionada como materia prima.



Figura 3

Racimos vacíos (raquis) seleccionado como materia prima. A) raquis sin triturar. B) raquis triturado.



A)



B)

4.1.2 Determinación del contenido de humedad de la materia prima

El contenido de humedad es un parámetro relevante dentro del proceso de densificación de biomasa, ya que este afecta tanto a la materia prima como a los productos resultantes de este proceso. Un alto contenido de humedad presenta impactos negativos en el rendimiento físico del producto resultante reduciendo su índice de durabilidad, aumentando la degradación de la materia prima asociada a una mayor actividad microbiana y disminuyendo el rendimiento de la combustión dificultando la ignición (Nielsen et al., 2009).

En la Tabla 4 se expresan los valores de humedad de las materias primas antes de someterlos a pretratamiento.

Tabla 4

Humedad de recepción de las materias primas.

Materia prima	% Humedad
Raquis	52,55
Fibra	40,75

Se puede observar que los valores de humedad para ambas materias primas presentadas en la Tabla 4 se encuentran por encima de los recomendados para evitar su degradación (<15%) basándonos en trabajos como Arzola et al. (2014) (10%) y Brunerová et al. (2018) (7,07%) los

cuales trabajaron con porcentajes de humedad en biomasa menores al 15% y obtuvieron, con estos, los mejores resultados en sus comprimidos. Además, con ese contenido de humedad no es posible realizar la disminución de tamaño de partícula debido a que la biomasa atascaría el molino de martillo y cuchillas, por lo cual no es favorable para el proceso usarlas de esta forma y se hace necesario someter las materias primas a un proceso de secado.

4.1.3 Secado del material

En la Tabla 5 se encuentran los nuevos valores de humedad de las materias primas después de un proceso de secado y posterior molienda.

Tabla 5

Humedad post-tratamiento de las materias primas.

Materia prima	Humedad (%P/P)
Raquis	8,14
Fibra	7,41

Los valores de humedad de la Tabla 5 ya se encuentran por debajo del 15% evitando así la degradación del material (Brunerová et al., 2018) y también se ubican dentro del rango de los utilizados por los autores mencionados en la sección anterior. Este porcentaje de humedad no afectó el proceso de fabricación de los pellets de este estudio, ya que fueron fabricados mediante un proceso de prensado. Sin embargo, es importante resaltar que un bajo contenido de humedad en la materia prima de la cual se elaborarán los comprimidos afecta de manera negativa el proceso de densificación de peletizadora debido a la pérdida de humedad que se produce por el incremento de temperatura provocado por la fricción entre el equipo y la biomasa, por esta razón los fabricantes de estos equipos sugieren que la biomasa para la elaboración de los pellets contenga entre un 10% a 15% de humedad (MaquinPRO, 2022).

4.1.4 Molienda y tamizado de la materia prima

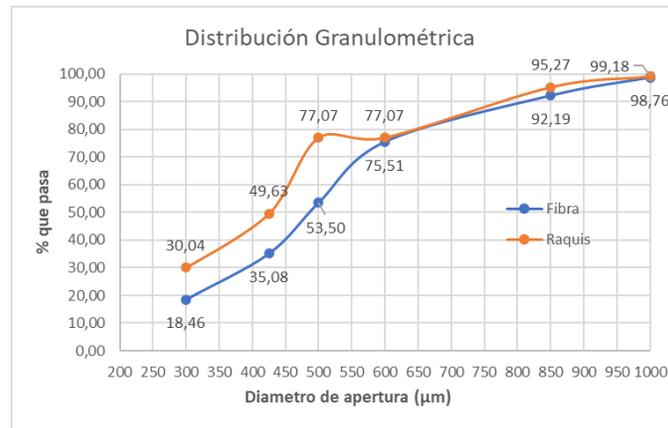
La distribución granulométrica permite identificar los diferentes tamaños de partícula dentro de la materia prima después del proceso de molienda, Gonzáles (2013) dentro de su investigación estudió la influencia de diferentes tamaños de partícula utilizados por distintos autores en la elaboración de pellets los cuales mencionan que las partículas mayores a 1mm (1000 μm) pueden actuar como punto de ruptura en los pellets y que para la obtención de partículas demasiado finas se requiere un proceso de molienda más exhaustivo, además de que estas requieren de mayor acondicionamiento para poder elaborar pellets. Por lo cual el autor recomienda trabajar con una mezcla de diferentes tamaños de partícula, ya que de esta forma se obtendrían pellets con buena calidad debido a la ocupación de espacios entre las partículas. La distribución granulométrica fue realizada según lo descrito en la sección 3.1.4. Para esto se utilizó una columna vibratoria de tamices con diferentes aperturas de malla (1000, 850, 600, 500, 425 y 300 μm), para muestras de 100 g de raquis y de 100g de fibra, cada biomasa por separado, el proceso de tamizado tardó un lapso de 20 minutos. Después, cada tamiz fue pesado con la cantidad de muestra que quedará dentro del mismo, a los valores registrados se les restaba el peso del tamiz vacío y de esta forma quedar únicamente con el peso de la muestra que contenía el tamiz.

En la Figura 4 se presentan los resultados de la distribución granulométrica de la fibra de mesocarpio y el raquis. En estos se evidencia que alrededor del 98,76% de las partículas dentro de la muestra de fibra de mesocarpio y 99,18% de las partículas dentro de la muestra de raquis son menores o iguales a 1mm, por lo cual se considera que un porcentaje de partículas mayores a 1mm (1000 μm) como el obtenido en la fibra (1,24%) y en el raquis (0,82%) no afectarán de manera significativa las características del producto final y por lo tanto se usará toda la distribución granulométrica para la elaboración de los comprimidos o pellets, cabe resaltar que debido a la

naturaleza del raquis este tuvo que someterse a una segunda molienda y en comparación a la fibra su molienda fue más exigente para el molino, llegando en una ocasión a obstruir su mecanismo y produciendo su avería. El tamiz con apertura de malla de 500 μm no pudo ser usado para el tamizado del raquis ya que sufrió una abolladura que no le permitió que encajar en la columna de tamices.

Figura 4

Gráfica de distribución granulométrica de la fibra de mesocarpio y raquis.



4.1.5 Densidad aparente

La densidad aparente fue determinada según lo descrito en la sección 3.1.5, los resultados se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6

Densidad aparente de la fibra de mesocarpio y el raquis.

Materia prima	Densidad aparente (Kg/m^3)
Fibra de mesocarpio	446,75
Raquis	311,45

Los valores determinados de densidad aparente para el raquis y la fibra de mesocarpio en la Tabla 6 son bajos si se les compara con los valores que deben tener los pellets según la norma UNE-EN ISO 17225-6 ($\geq 600 \text{ Kg/m}^3$) (AENOR, 2014), debido a esto se realiza el proceso de densificación a las materias primas, en el cual se elevan los valores de densidad aparente en los combustibles sólidos favoreciendo la relación de energía por unidad de volumen, y por consiguiente, aumentando el tiempo entre cargas al equipo que lo esté usando como combustible y mejorando sus características de almacenamiento (el espacio para almacenarlo disminuye) (De lucas, 2012).

4.1.6 Caracterización de la materia prima

El análisis inmediato proporciona una composición general de la biomasa, este consiste en la determinación del contenido de cenizas, contenido de humedad, materia volátil y carbono fijo de la biomasa y, por lo tanto, es fundamental para determinar el uso energético que se le puede dar a la biomasa (Ozbayoglu, 2018).

En la tabla 7 y 8 se muestran el análisis inmediato del raquis y la fibra de mesocarpio respectivamente, basados en estudios realizados por otros autores tanto a nivel nacional como de otras regiones del mundo y la prueba TGA que se realizó en el laboratorio de la escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander.

Tabla 7

Análisis inmediato del raquis.

Humedad (%P/P)	Material volátil (%P/P)	Ceniza (%P/P)	Carbono fijo (%P/P)	PCS(MJ/Kg)	Referencias
7,78	81,53	6,28	12,19	17,57	Nyakuma et al. (2019)
6,8	77,4	3,3	19,3	18,1	Johari et al. (2015)
7,86	75,88	5,18	18,94	17,78	Yan et al. (2019)
8,14	76,34	4,78	18,88	17,26	Este estudio

Tabla 8*Análisis inmediato de la fibra de mesocarpio.*

Humedad (%P/P)	Material volátil (%P/P)	Ceniza (%P/P)	Carbono fijo (%P/P)	PCS(MJ/Kg)	Referencias
-	72,46	7,03	20,51	17,13	Chen et al. (2014)
-	75,23	6,35	18,42	16,94	Rashid et al. (2017)
10,1	83,31	6,23	10,46	17,15	Faizal et al. (2018)
7,41	75,06	5,53	19,41	18,90	Este estudio

La mayoría de los resultados del análisis inmediato y poder calorífico realizados a las biomásas de este estudio (raquis y fibra de mesocarpio) se encuentran dentro o muy cercanos de los valores reportados por los otros autores, con la excepción del poder calorífico de la fibra (18,90 MJ/Kg) donde muestra un incremento significativo, el cual se asocia al cuesco presente en la fibra recibida, ya que el cuesco presenta un poder calorífico promedio de 20,09 MJ/Kg lo que provoca un incremento de este parámetro en la materia prima (Loh, 2017).

4.2 Resultados estudio preliminar

Los comprimidos de biomasa para el estudio preliminar y el estudio principal se elaboraron con ayuda de una prensa hidráulica que permitía graduar su temperatura, en donde se montaba el material en un molde de acero galvanizado (Apéndice A). Antes del proceso de densificado la prensa era graduada a la temperatura necesaria del tratamiento a ejecutar, cuando ésta llegaba a la temperatura requerida el molde se ubicaba dentro y se precalentándolo por 20 minutos con el fin de que este alcanzara la temperatura de trabajo. La presión establecida para la elaboración de los comprimidos fue de 30 Kg/cm² (3MPa), máximo valor de presión ejercido por la prensa al molde de acero galvanizado, esta se mantenía sobre el molde cargado con la biomasa por 1 minuto antes de retirarlo y obtener los comprimidos con el fin de que el comprimido alcanzara la temperatura de trabajo.

Adicionalmente, otro aspecto importante dentro del estudio fue garantizar la correcta integración del aglomerante en la biomasa, para esto fue necesario el calentamiento de ambos se estableció a 100°C como la temperatura de calentamiento, por 10 minutos para la biomasa (y así evitar la formación de grumos al adicionar el aglomerante) y para el aglomerante se mantuvo hasta que este se encontrara totalmente en fase líquida, esto debido a que los aglomerantes utilizados eran sólidos a temperatura ambiente y debían ser fundidos para obtener una mayor homogeneidad en la mezcla. Posteriormente la mezcla se dejó enfriar hasta temperatura ambiente, ya que por las limitaciones de capacidad de producción de pellets que se tuvieron por el molde utilizado, no era posible elaborarlos con las muestras en caliente sin que se afectara la durabilidad de los comprimidos por el enfriamiento de la muestra durante el proceso.

Esta sección del estudio fue realizada con el propósito de seleccionar el aglomerante y la cantidad de este que se usarían en el estudio principal, y a su vez, estudiar su efecto sobre los comprimidos junto con las otras variables. Los aglomerantes utilizados fueron escogidos considerando que mediante su adición se favoreciera el poder calorífico y la durabilidad de los comprimidos. Debido a que estos (aglomerantes) por si solos ya son usados como combustible y que después de fundirse por efecto de la de temperatura de prensado, al ser sólidos a temperatura ambiente, se enfriarían mejorando la cohesión de las partículas.

4.2.1 Poder calorífico

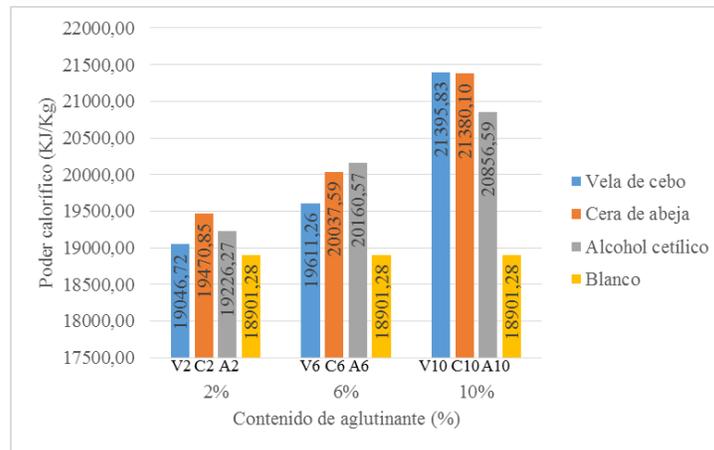
Los resultados de poder calorífico para cada tratamiento dentro del diseño experimental se presentan en la Figura 5. En general, se puede observar que a medida que aumenta el contenido de aglomerante, también lo hace el poder calorífico, esto sucede con los tres tipos de aglomerantes utilizados (vela de cebo, cera de abeja y alcohol cetílico). Además, también se puede evidenciar que los valores de poder calorífico de todos los tratamientos del diseño experimental fueron

mayores que el presentado por el blanco, lo que nos indica que, si se desea tener productos con mayor poder calorífico, el uso de aglomerante es recomendado. Ahora bien, si se realiza un análisis más detallado bajo la anterior premisa, se observa un incremento de la vela, la cera y el alcohol al 2% de 0,77%; 3,01% y 1,72% respectivamente, respecto al valor de poder calorífico del blanco, donde, si se compara con el porcentaje de aglomerante adicionado (2%), solo la cera de abeja tuvo un incremento por encima (3,01%), a diferencia de los otros dos aglomerantes donde su incremento no es muy significativo. De igual manera pasa en el subgrupo de los tres aglomerantes en una concentración de 6%, los cuales tienen un incremento de poder calorífico respecto al blanco de la siguiente manera: 3,76% para la vela de cebo, 6,01% la cera de abeja y 6,66% el alcohol cetílico, donde solo la cera y el alcohol obtuvieron un incremento mayor al porcentaje de aglomerante adicionado sin embargo la diferencia no supera ni un punto porcentual. Es para concentraciones altas (10%) donde la mejora en el parámetro de poder calorífico comparado con el blanco, obtiene un incremento significativo, de los tres aglomerantes, mayor al porcentaje de adición con los siguientes resultados: para la vela de cebo se tuvo un incremento del 13,20%, para la cera 13,11% y para el alcohol cetílico 10,34%. Es decir, para la vela y la cera se tuvo una diferencia de más de tres puntos porcentuales respecto al porcentaje de adición (10%), solo el alcohol cetílico tuvo una diferencia menor a un punto porcentual.

Con el análisis realizado anteriormente, una adición de 10% en peso del aglomerante es una cantidad ya considerada para obtener un mejoramiento significativo en el parámetro de poder calorífico.

Figura 5

Gráfica tipo aglomerante - contenido de aglomerante vs poder calorífico de estudio preliminar.



4.2.2 Durabilidad

En la Figura 6 se grafican los resultados de durabilidad para cada tratamiento dentro del diseño experimental. A nivel general se puede evidenciar una disminución en el índice de durabilidad con dos de los tres tipos de aglomerantes (vela de cebo y alcohol cetílico) al aumentar su contenido dentro de la muestra. Sin embargo, al analizar el comportamiento de los pellets con cera de abeja se observó que difiere de los otros, ya que estos aumentan su durabilidad cuando se aumenta el contenido de aglomerante, lo cual resulta inusual, Arzola et al. (2014) concluyó en su trabajo que el uso de aglomerante en un bajo porcentaje, melaza al 4%, fue el más beneficioso para sus comprimidos en términos de sus características mecánicas.

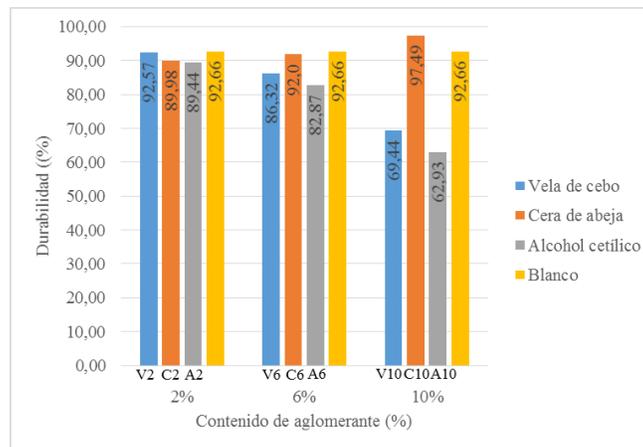
Ahora, al estudiar el valor de durabilidad de los diferentes tratamientos frente al obtenido por el blanco (sin aglomerante) es perceptible que este último es superior frente al resto en la mayoría de los casos y solo la cera de abeja al 10% de contenido dentro de la muestra tiene mayor valor de durabilidad (97.49 %) frente a este. Esto es atribuible a la heterogeneidad en su composición (Sillard, 2002), en la cual la presencia de los grupos funcionales como ácidos carboxílicos y ésteres, debido a su electronegatividad, permiten la formación de puentes de hidrógeno y junto a su parte polimérica aumentan la cohesión de las partículas. La vela de cebo por su parte es una mezcla entre parafina y grasa animal, la parafina está conformada por

hidrocarburos, estos son no polares por consiguiente no forman puentes de hidrógeno y la grasa animal al tener propiedades lubricantes no beneficia la cohesión entre las partículas. Por último, el alcohol cetílico, su electronegatividad se encontraría entre la de los ácidos carboxílicos y los ésteres, pero al ser un alcohol de cadena larga esta disminuye (Ophardt, 2003), por lo cual sus enlaces con hidrógeno son más débiles, situación que no favorece la cohesión de las partículas.

Sintetizando, a pesar de que V10 y C10 presentan valores similares de poder calorífico, observamos que, el índice de durabilidad de V10 es del 69,44% y en comparación con los otros resultados lo cataloga como un valor bajo, lo que físicamente ocasionará que estos pellets tengan inconvenientes en el transporte y almacenamiento de los mismos.

Figura 6

Gráfica tipo de aglomerante – contenido de aglomerante vs durabilidad de estudio preliminar.



Basándonos en los resultados tanto de la prueba de poder calorífico, como para la prueba de durabilidad, los pellets C10 (Cera de abeja al 10%) fueron catalogados como la mejor opción dentro de las estudiadas, debido a que presentó el mejor valor de durabilidad (97,49%), siendo el único tratamiento que superó a los pellets blancos (92,66%) en este ítem y, además, obtuvo un

incremento significativo en el parámetro de poder calorífico llegando a un valor de 21380,10 KJ/Kg. Siendo el segundo tratamiento, después de V10, con mejor valor en esta propiedad.

Los tratamientos con alcohol cetílico se descartaron ya que fueron los comprimidos con menor índice de durabilidad y en la propiedad de poder calorífico fue tercero por lo cual no fue recomendado como aglomerante para la siguiente fase de estudio.

4.3 Resultados estudio principal

Para el estudio principal se realizó el mismo procedimiento descrito en la sección 4.2 para la elaboración de los comprimidos. En cuanto a las diferentes composiciones de biomasa dentro de los tratamientos estas se escogieron para analizar la viabilidad de utilizar el raquis junto con la fibra en la fabricación de comprimidos y el efecto que tiene utilizar mayor o menor contenido de raquis en las características energéticas y mecánicas de estos con y sin el aglomerante.

Por último, las temperaturas para este estudio fueron seleccionadas tomando como referencia la temperatura de transición vítrea (T_g) de la lignina (T_g entre 60°C y 95°C para biomásas con 8% de humedad) que es un aglomerante natural contenido en la biomasa que mejora la cohesión entre las partículas (Zapata et al., 2017). Por esto se estableció una temperatura dentro de ese intervalo, otra inferior y la tercera superior a este, con el propósito de estudiar su efecto sobre las características energéticas y mecánicas de los comprimidos con y sin el aglomerante. Se elaboraron los tratamientos de la Tabla 9 para comparar el efecto generado por el aglomerante. La leyenda que se encuentra del lado derecho de las figuras 7, 8, 11, 12, 13 y 14 que se encuentran en esta sección hace referencia al porcentaje de raquis dentro de la muestra (15%,50% y 85%)

Tabla 9

Tratamientos elaborados sin aglomerante

Nomenclatura	Temperatura de prensado (°C)	Contenido de raquis (%)
B1	90	15
B2	90	50
B3	135	15
B4	135	50

4.3.1 Durabilidad

La durabilidad fue determinada según lo descrito en el apartado 3.3.1, los resultados se presentan en la Figura 7 para los pellets con aglomerante y en la Figura 8 para los pellets sin aglomerante.

Figura 7

Gráfica temperatura de prensado – contenido de raquis con aglomerante vs durabilidad de estudio principal.

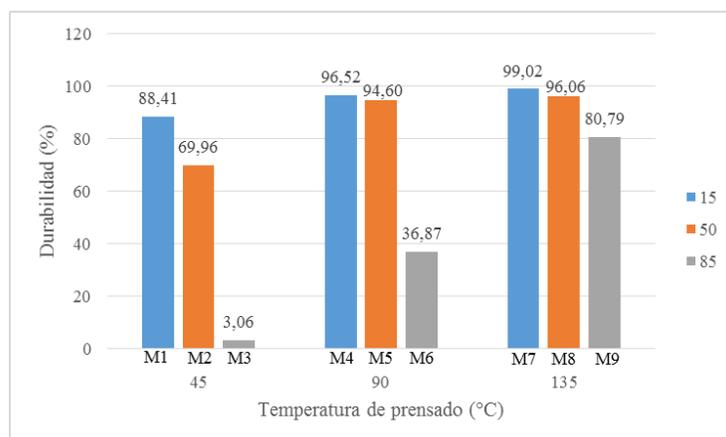
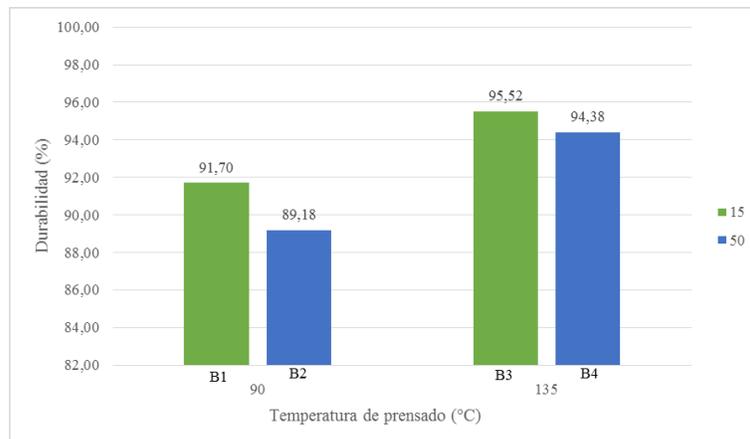


Figura 8

Gráfico de temperatura de prensado – contenido de raquis sin aglomerante vs durabilidad de estudio principal.



En la Figura 7 se puede observar que los valores bajos de durabilidad principalmente en M3 (3,06%), M6 (36,87%) y M9 (80,79%) se presentan debido a los contenidos altos de raquis dentro de la muestra (85%), esto es atribuible a la estructura fibrosa del raquis lo cual no permite una buena compactación del material. Debido a esto resulta preferible elaborar comprimidos con valores \leq al 50% de contenido de raquis dentro de la muestra dado que fueron estos los que obtuvieron los resultados más altos para las diferentes temperaturas de prensado.

Por otra parte, al estudiar el efecto de la temperatura de prensado se evidencia que esta tiene un papel importante en la durabilidad del producto, ya que al incrementar la temperatura aumenta también la durabilidad en los tratamientos tanto como los que contienen aglomerante como los que no. Este aumento de la durabilidad con respecto a la temperatura se asocia a los aglomerantes presentes como la lignina y la cera de abeja, que por medio de la presión ejercida durante el proceso y al alcanzar o sobrepasar su temperatura de transición vítrea (60-95°C) (Zapata et al., 2017) y de fusión (62-65°C) (Tinto et al., 2017) respectivamente, cambian de estado (se funden) penetrando los espacios entre los enlaces de enclavamiento mecánico, generados por el entrecruzamiento o pliegue entre las partículas durante el proceso de compresión, y posteriormente al enfriarse después del proceso de densificación se endurecen creando puentes sólidos que refuerzan estos enlaces incrementado de esta forma la cohesión entre estas partículas (Kaliyan et

al., 2009). Los más favorecidos con la adición del aglomerante fueron M4 (presentado en la Figura 9) y M5 (que se encuentra en el Apéndice C), elaborados a una temperatura de prensado de 90°C y con 15% y 50% de contenido de raquis respectivamente, pasando de un valor de 91,70% (B1) y 89,18% (B2) a 96,52% y 94,60% respectivamente.

Al analizar las tendencias al cambiar la temperatura de prensado en la Figura 7 el aumento más representativo en los valores de durabilidad se da al pasar de 45°C a 90°C para los tratamientos M1 pasando de 88,41% a 96,52%, M2 pasando de 69,96% a 94,60% y M3 pasando de 3,06% a 36,87%. En cuanto al cambio de una temperatura de prensado de 90°C a 135°C se tiene que el cambio más visible fue solo para M6 pasando de 36,87% a 80,79% por lo cual elevar la temperatura a 135°C no es recomendable dado al alto gasto energético que implica llegar a dicha temperatura. M4, M7 y M8 fueron los tratamientos que cumplieron con el valor de durabilidad en la norma UNE-EN ISO 17225-6 ($\geq 96\%$) (AENOR, 2014).

Adicionalmente, los tratamientos M1 y M2 elaborados con a una temperatura de prensado de 45°C, con 15% y 50% de raquis respectivamente, después de tres semanas de su fabricación aumentaron su tamaño como se puede observar en la Figura 10, esto se relaciona con una mala compactación debido a que la temperatura de prensado no fue lo suficiente elevada como para permitir a los aglomerantes (lignina y cera de abeja) crear puentes sólidos entre las partículas, de modo que su integridad se preservara por un tiempo más prolongado.

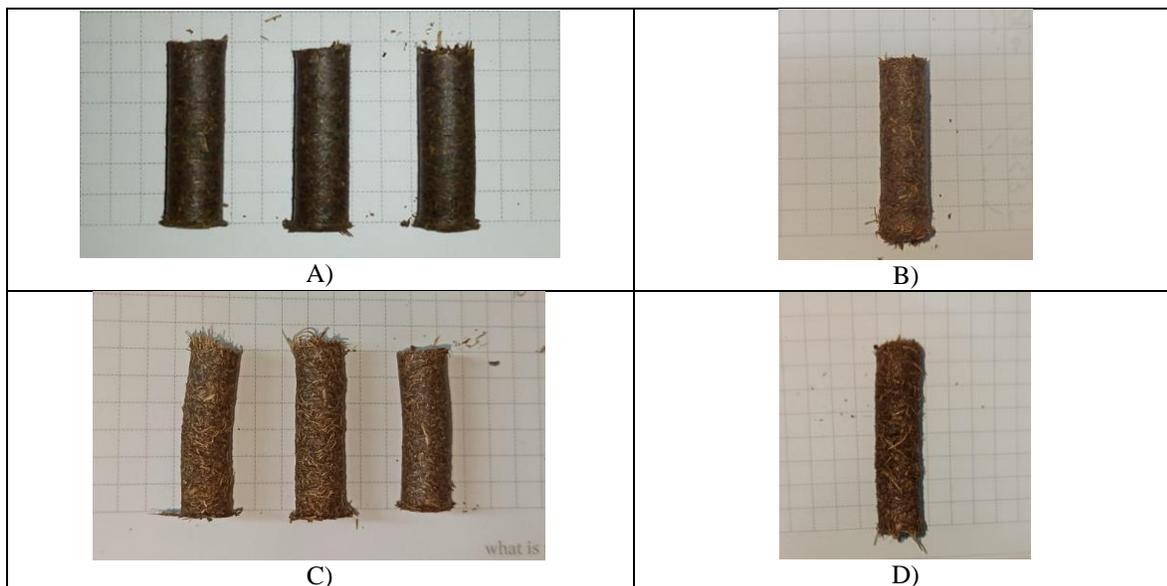
Figura 9

Pellets correspondientes al tratamiento M4 del estudio principal.



Figura 10

Pellets correspondientes al tratamiento M1 (A) y M2 (C) del estudio principal y pellets del tratamiento M1 (B) y M2 (D) después de tres semanas.



4.3.2 Densidad

En la Figura 11 se presentan los resultados de la densidad para los pellets con aglomerante y en la Figura 12 para los pellets sin aglomerante. La longitud de los pellets estuvo entre valores de 22,83 mm y 35,64mm. El diámetro de estos por su parte estuvo entre valores de 8,27 mm y 8,36 mm.

Figura 11

Gráfica temperatura de prensado – contenido de raquis con aglomerante vs densidad.

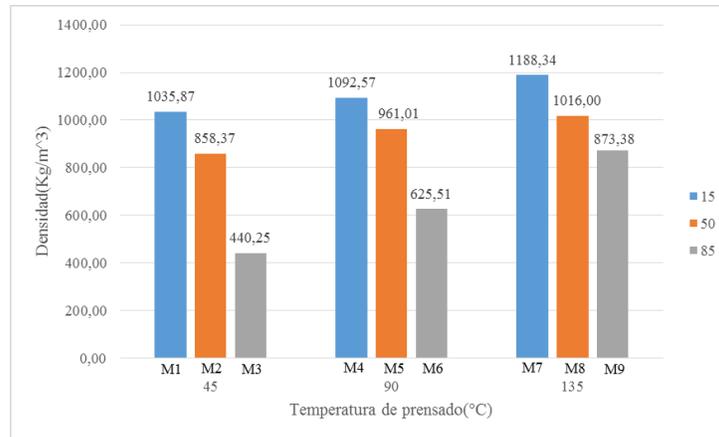
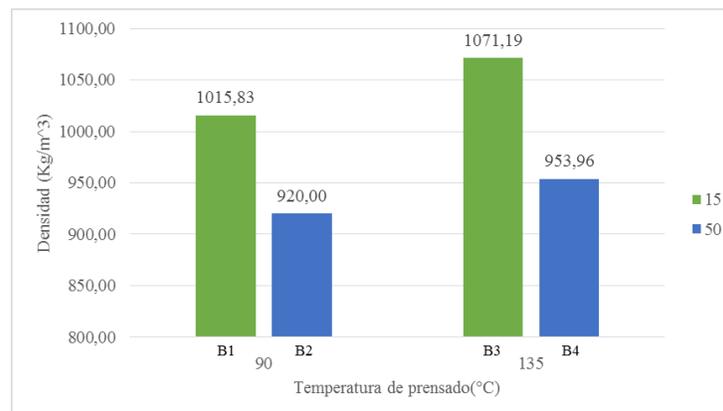


Figura 12

Gráfica temperatura de prensado – contenido de raquis sin aglomerante vs densidad.



El comportamiento de los resultados de densidad representados en la Figura 11 y Figura 12 evidencia que, al igual que en la durabilidad, al aumentar el contenido de raquis dentro de la muestra se presenta una disminución en su densidad, lo cual se asocia al valor de densidad aparente del raquis ($311,45 \text{ Kg/m}^3$) lo que provoca que los pellets con mayor contenido de este sean más livianos provocando que su densidad sea menor, situación que se repite al aplicar cualquiera de las temperaturas de prensado, esto es observable en los tratamientos M3 ($440,245 \text{ Kg/m}^3$), M6 ($625,510 \text{ Kg/m}^3$) y M9 ($873,38 \text{ Kg/m}^3$) todos ellos contienen 85% de raquis y son el menor valor en su respectiva temperatura. Ahora bien, al analizar el efecto de la temperatura de prensado se tiene que influye de manera positiva sobre la densidad, esta influencia se puede apreciar de mejor

manera en los pellets con un contenido de raquis \geq al 50% al elevar la temperatura de prensado. A 135°C se repite la situación presentada en la durabilidad a esta misma temperatura ya que los valores de densidad de los tratamientos con mayor contenido de raquis (85%) son los más favorecidos (Figura 11). Por otro lado, los pellets fabricados a 45°C con un contenido de raquis del 15% tienen una densidad cercana a los que se fabricaron a 90°C, sin embargo, debido a la situación presentada en la Figura 10, no se recomienda la elaboración de pellets a esta temperatura ya que su integridad se ve comprometida en un corto periodo de tiempo. En cuanto a la adición del aglomerante, al contrastar los valores de la Figura 11 con los de la Figura 12 se puede presenciar un ligero aumento. Todos los tratamientos a excepción de M3 cumplen con el parámetro consignado en la norma UNE-EN ISO 17225-6 ($\geq 600 \text{ Kg/m}^3$) (AENOR, 2014).

Al comparar los resultados de durabilidad y densidad de este estudio con los mejores resultados obtenidos por los comprimidos fabricados por Rincón y González (2014) quienes usaron para esta fibra de mesocarpio como biomasa, una presión de peletizado de 4 Mpa y tamaño de partícula menores a 0,30 mm se tiene que estos últimos obtuvieron mayor valor de densidad (1280 Kg/m^3) que cualquiera de los tratamientos realizados en este estudio. Sin embargo, al observar el mayor valor de durabilidad alcanzado por los pellets de Rincón y González (2014)(69,15%) solo supera a los resultados de M3 (3,06%) y M6 (36,87%) que fueron los más bajos dentro del estudio, esto demuestra que, si bien un aumento en la presión y un menor tamaño de partícula en la elaboración de los comprimidos aumenta la densidad de estos, es necesario aplicar una temperatura de calentamiento al realizar el proceso de densificación para obtener mejores resultados de durabilidad.

Adicionalmente, se tiene la comparación de los resultados obtenidos por las muestras con alto contenido de raquis (85%) con el comprimido elaborado por Cabrales et al.(2020), compuesto

solo por raquis cuyo contenido de humedad fue de 8%, tamaño de partícula de 85 mm, tiempo de compactación de 40 s, presión de compactación de 62 MPa y temperatura de prensado de 90°C, este obtuvo un valor de densidad del 934,4 Kg/m³ y durabilidad del 99,05%, ambos valores mayores a los presentados por M3, M6 y M9 demostrando nuevamente que tanto la presión como la temperatura tienen influencia positiva sobre la durabilidad y densidad de los comprimidos.

Un aumento en la presión tiene como resultado un incremento en la durabilidad ocasionado por el mejoramiento de los enlaces de enclavamiento mecánico, ya que al disminuir el espacio entre las partículas no solo crea entrecruzamientos o pliegues más compactos entre estas sino que también permite que se formen puentes sólidos más fuertes por el efecto de fundición y posterior enfriamiento de los aglomerantes, además, también mejora mecanismos de cohesión secundarios como lo son los puentes de hidrógeno que aumentan su magnitud al disminuirse la distancia entre las partículas (Kaliyan, 2009). En cuanto a la densidad, una mayor presión, principalmente en el caso de que se fabriquen los comprimidos por prensado y que el molde o equipo utilizado para este lo permita, densificaría más biomasa y esta ocuparía un menor volumen.

4.3.3 Poder calorífico

El comportamiento de los resultados de poder calorífico representados en la Figura 13, evidencia que, a medida que aumenta la temperatura, el valor del poder calorífico de los comprimidos disminuye. Lo cual se le atribuye a una pérdida de aglomerante que se presentó al elaborar los comprimidos a temperaturas altas de prensado y fue más notoria para la temperatura de 135°C. Esta pérdida se considera que ocurre debido a que la cera pierde adherencia a la superficie de las partículas al elevar la temperatura a valores muy por encima de su punto de fusión (62-65°C) (Tinto et al., 2017), causando que parte de esta fluye a través del material y se deposite en el fondo de molde. Esto también explica porque los valores de durabilidad a 135°C no se

favorecieran del mismo con la adición de aglomerante frente a los de los comprimidos elaborados sin aglomerante como los de 90°C. Por otro lado, al tener, la fibra, mayor poder calorífico que el raquis, altos contenidos de este último, disminuyen el poder calorífico.

Este comportamiento se puede observar si comparamos, por ejemplo, M1 (21835,42 KJ/Kg), M2 (20734,88 KJ/Kg) y M3 (20464,61 KJ/Kg) los cuales presentan la misma temperatura de prensado (45°C), a distintos porcentajes de raquis dentro de la muestra (15%, 50% y 85% respectivamente). A pesar de la pérdida del aglomerante los valores de poder calorífico de todos los tratamientos de la Figura 13 siguen siendo mayores a los de la Figura 14. Todos los tratamientos cumplen con el valor consignado en la norma UNE-EN ISO 17225-6 (PCI \geq 14500 KJ/Kg) (AENOR, 2014). Esto se demuestra calculando el poder calorífico inferior para B4 el cual tiene el menor valor de poder calorífico superior de todos los tratamiento mediante la ecuación 5 (utilizada por Casanova et al. (2017)) y da como resultado un PCI de 17929,42 KJ/Kg.

$$PCI = PCS - (CH * L_c) \quad (\text{Ec.5})$$

Donde: PCI es el poder calorífico inferior de la muestra (KJ/Kg), PCS es el poder calorífico superior de la muestra (KJ/Kg), CH es el contenido de humedad de la muestra expresado en decimales y Lc es el calor latente de condensación del vapor de agua liberado durante la combustión de la muestra (Lc=2257 KJ/Kg)

Figura 13

Gráfica temperatura de prensado – contenido de raquis con aglomerante Vs poder calorífico de estudio principal.

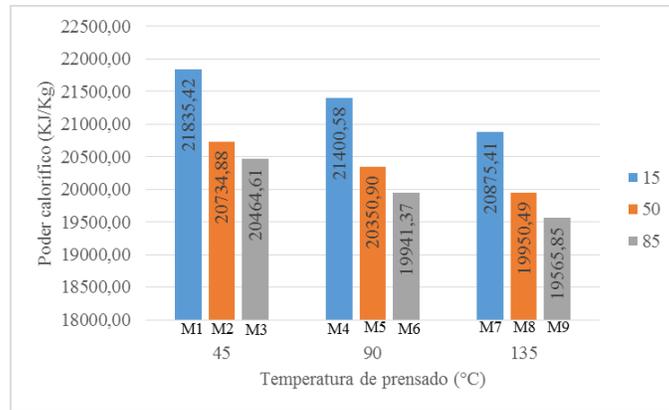
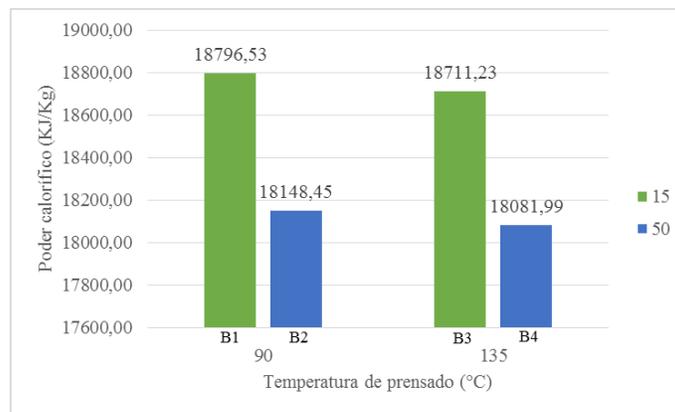


Figura 14

Gráfica temperatura de prensado – contenido de raquis sin aglomerante Vs poder calorífico de estudio principal.



4.3.4 Humedad final

La determinación de la humedad final de los pellets se hizo según lo descrito en la sección 3.1.2, los resultados se presentan en la Tabla 10 para los pellets con aglomerante y sin aglomerante.

Tabla 10

Humedad final de los diferentes tratamientos.

Nomenclatura	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	B1	B2	B3	B4
Temperatura de prensado (°C)	45	45	45	90	90	90	135	135	135	90	90	135	135

Contenido de raquis (%)	15	50	85	15	50	85	15	50	85	15	50	15	50
Humedad (%)	5,0	4,9	4,9	5,0	4,9	4,9	3,5	3,2	3,2	7,7	7,9	6,9	6,8

El comportamiento de la humedad en los pellets elaborados presenta una tendencia a disminuir relacionada a la temperatura, es decir, a mayor temperatura aplicada, menor es el porcentaje de humedad contienen los pellets, lo cual es lo más lógico que se podría presentar, ya que altas temperaturas permiten mayor evaporación del agua contenida dentro de los pellets, ocasionando una disminución de su humedad. Los valores de contenido de humedad de los pellets con aglomerante son menores a los obtenidos por los tratamientos sin aglomerante debido a la preparación de las muestras de estos, en las cuales se calentó la mezcla de biomásas correspondiente a cada tratamiento para que se incorporará con el aglomerante (en fase líquida) de una mejor manera. El contenido de humedad de todos los tratamientos cumple con el valor establecido en la norma UNE-EN ISO 17225-6 ($\leq 15\%$) (AENOR, 2014).

4.3.5 Termogravimetría (TGA)

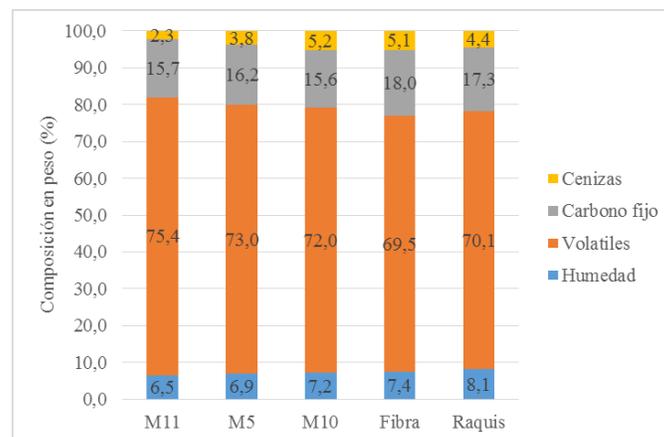
En la Figura 15, se presentan muestra los resultados en composición porcentual del análisis termogravimétrico para las materias primas (raquis y fibra) y los tratamientos M5 (90°C-50% de raquis), M10 (90°C-0% de raquis) y M11 (90°C-100% de raquis), las gráficas individuales de los resultados se encuentran en el Apéndice D. Del comportamiento de los resultados en cuanto a las cenizas se evidencia que la adición del aglomerante favorece a que el raquis disminuya su contenido de estas, esto se puede observar al comparar los resultados del raquis (4,4%) y el tratamiento M11 (2,3%), por ende, al aumentar el contenido de raquis dentro de los comprimidos estos disminuirán su contenido de cenizas, como lo es el caso de M5 (50% de raquis) que tiene un menor contenido de ceniza que M10 (0% de raquis).

Este es un parámetro importante ya que las cenizas pueden acumularse hasta el punto de que el flujo de gas de combustión se vea restringido, lo que podría causar daños mecánicos a los componentes del quemador y a elevadas temperaturas estos depósitos de cenizas se asocian con la corrosión. Por lo cual para evitar estas situaciones se requiere de apagados prematuros del equipo para realizarle mantenimiento (Nunes et al., 2016). Los volátiles por su parte presentan un ligero aumento al adicionar el aglomerante y se da principalmente en el raquis pasando de 70,1% a 75,4% (M11). Un mayor contenido de volátiles es beneficioso para el proceso de ignición y combustión, dado que facilita el encendido de la biomasa, provoca una mejor quema de la misma y mejora la estabilidad de llama (Miller, 2014).

En el parámetro de humedad, M5 que se elaboró con una temperatura de prensado de 90°C aumentó su humedad de 4,91% a 6,9% por la absorción de humedad del ambiente durante el tiempo en que se tardaron en realizar las pruebas. M10 y M11 fueron elaborados con la misma temperatura de M5 y se enviaron junto con esta para su análisis de TGA por lo cual se asume que tuvieron el mismo comportamiento en cuanto al cambio de humedad.

Figura 15

Resultados del análisis de TGA para diferentes tratamientos.



5. CONCLUSIONES

Fue posible elaborar comprimidos de biomasa residual sólida de la extracción de aceite de palma con propiedades energéticas y mecánicas adecuadas para su aprovechamiento como biocombustible sólido.

El análisis de las 3 diferentes composiciones del material utilizadas en la fabricación de los comprimidos evidencian que el raquis, residuo no aprovechado como biocombustible sólido de la extracción del aceite palma, puede ser utilizado al mezclarse con la fibra de mesocarpio hasta en un 50% de porcentaje en peso de la muestra total sin que afecte de manera significativa las características energéticas y mecánicas de los comprimidos elaborados.

Se estudiaron 3 temperaturas de prensado para la elaboración de los comprimidos y se evidenció que los valores de 90°C y 135°C beneficiaron los resultados de densidad y durabilidad de estos debido al mejoramiento de los enlaces de enclavamiento mecánicos como resultado de la penetración entre los espacios de estos por parte de los aglomerantes al fundirse a las temperaturas mencionadas. No obstante, el gasto energético para llegar a 135°C no es justificable, dado que el mejoramiento de las propiedades mecánicas y energéticas que se observan a 135°C en comparación a 90°C no es significativa. Por dicha razón, dentro de las temperaturas estudiadas, la de 90°C es la más favorable para el proceso.

Después de estudiar los tres aglomerantes usados (vela de cebo, cera de abeja y alcohol cetílico) se evidencio que solo la cera de abeja al 10% presentó efectos positivos tanto para las características energéticas como mecánicas de estos, ocasionando un aumento en su poder calorífico, durabilidad y densidad. Además, provocó una disminución en el contenido de cenizas y aumentó el contenido de volátiles del raquis. Sin embargo, el gasto energético para lograr su

homogenización con la biomasa y las pérdidas ocasionadas al elevar la temperatura de prensado reducen sus beneficios como aglomerante.

6. RECOMENDACIONES

Realizar un estudio de factibilidad económica para estimar a detalle el factor beneficio/costo, es decir, el beneficio que trae el uso de los comprimidos obtenidos como combustibles sólidos en las calderas generadoras de vapor de la industria aceitera con relación al costo monetario que implica poder elaborarlos.

Debido a limitaciones con el molde usado para la elaboración de los comprimidos, no fue posible estudiar la influencia de la presión, por lo tanto, queda abierta la posibilidad de realizar una investigación análoga a la presente donde se estudie la influencia de esta variable en la caracterización de los comprimidos obtenidos.

A pesar de los buenos resultados de la cera de abeja en relación con el mejoramiento de las características mecánicas y energéticas de los comprimidos, se recomienda continuar con la búsqueda de otros aglomerantes que también beneficien las características mencionadas, pero a un costo mucho menor, ya que este aglutinante presenta un costo elevado en el mercado.

BIBLIOGRAFÍA

- Arzola, N., Gómez, A., & Rincón, S. (2012). The effects of moisture content, particle size and binding agent content on oil palm shell pellet quality parameters. *Ingeniería e Investigación*, 32(1), 24-29.
- Arzola, N., Gómez, A., & Rincón, S. (2014). Experimental study of the mechanical and thermal behavior of pellets produced from oil palm biomass blends. *Global NEST Journal*, 16(1), 179-187.
- Asmar, S. (2020). Colombia ocupa la cuarta posición en el escalafón mundial de países más productores de aceite de palma. *agronegocios.co*. Recuperado 31 de abril de 2021, de <https://www.agronegocios.co/agricultura/colombia-cuarto-en-el-escalafon-mundial-de-paises-mas-productores-de-aceite-de-palma-3071339>
- Asociación Española de Normalización. (2014). Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 6: Clases de pélets de origen no leñoso (ISO 17225-6)
- Asociación Española de Normalización. (2016). Biocombustibles sólidos. Determinación de la distribución de tamaño de partícula para combustibles sin comprimir. Parte 2: Método del tamiz vibratorio con abertura de malla inferior o igual a 3,15 mm. (ISO 17827-2).
- Asociación Española de Normalización. (2016). Biocombustibles sólidos. Determinación de la durabilidad mecánica de pélets y briquetas. Parte 1: Pélets. (ISO 17831-1)
- Asociación Española de Normalización. (2016). Biocombustibles sólidos. Determinación de la densidad a granel. (ISO 17828)
- Bemgba, B. N., Anwar, J., & Arshad, A. (2012). Analysis of the pyrolytic fuel properties of empty fruit bunch briquettes. *Journal of Applied Sciences*, 12(24), 2527-2533.

- Brunerová, A., Müller, M., Šleger, V., Ambarita, H., & Valášek, P. (2018). Bio-pellet fuel from oil palm empty fruit bunches (EFB): Using European standards for quality testing. *Sustainability*, 10(12), 4443.
- Cabrales, H., Arzola, N., & Araque, O. (2020). The effects of moisture content, fiber length and compaction time on African oil palm empty fruit bunches briquette quality parameters. *Heliyon*, 6(12), e05607.
- Cárdenas, A. G. (2016). La agroindustria de la palma de aceite en América. *Revista Palmas*, 37, 215-228.
- Casanova, P., Solís, K., & Carrillo, T. (2017). Propiedades térmicas y fisicoquímicas de pellets con fines energéticos elaborados a partir de residuos de aserradero. *Ingeniería. Revista de la Universidad de Costa Rica*, 27(1), 57-74.
- Castillo, Y. A. G., Rincón, S. N. R., Vargas, G. C., Isiordia, G. E. D., & Vargas, F. E. S. (2014). Caracterización de Materiales lignocelulósicos residuales de palma de aceite y palma de coco para la fabricación de pellets. *Avances: Investigación en Ingeniería*, 11(1), 83-91.
- Chen, W. H., Kuo, P. C., Liu, S. H., & Wu, W. (2014). Thermal characterization of oil palm fiber and eucalyptus in torrefaction. *Energy*, 71, 40-48.
- De Lucas Herguedas, A., Del Peso Taranco, C., Rodríguez García, E. and Prieto Paniagua, P. (2012). *Biomasa, combustibles y sostenibilidad*. [Palencia]: ITAGRA, pp.9-10.
- Elbersen, W. (2013). Residuos de aceite de palma disponibles para la bioeconomía, junto con el reciclaje de nutrientes. *Revista Palmas*, 34, 56-65.
- Faizal, H. M., Rahman, M. R. A., & Latiff, Z. A. (2016). Review on densification of palm residues as a technique for biomass energy utilization. *Jurnal Teknologi*, 78(9-2).

- Faizal, H. M., Shamsuddin, H. S., Heiree, M. H. M., Hanaffi, M. F. M. A., Rahman, M. R. A., Rahman, M. M., & Latiff, Z. A. (2018). Torrefaction of densified mesocarp fibre and palm kernel shell. *Renewable Energy*, 122, 419-428.
- Gilvari, H., de Jong, W., & Schott, D. L. (2019). Quality parameters relevant for densification of bio-materials: Measuring methods and affecting factors-A review. *Biomass and Bioenergy*, 120, 117-134.
- González Martínez, I. D. (2013). Potencial del aserrín generado en la transformación primaria de *Pinus Patula* para la fabricación de Pellets (Doctoral dissertation, Tesis de Maestría en Ciencias Forestales. Chapingo, México. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Chapingo).
- Johari, A., Tuan Abdullah, T. A., Hassim, M. H., Kidam, K., Kamaruddin, M. J., Zakaria, Z. Y., & Sulaiman, W. R. W. (2015). Effect of fluidization number on the combustion of empty fruit bunch in a fluidized bed. In *Advanced Materials Research* (Vol. 1125, pp. 301-305). Trans Tech Publications Ltd.
- Kabe, T., Ishihara, A., Qian, E. W., & Putu, I. (2004). Methods of classification and characterization of coal. *Studies in surface science and catalysis*, 150, 1-79.
- Kaliyan, N., & Morey, R. V. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and bioenergy*, 33(3), 337-359.
- Lam, P. S., Lam, P. Y., Sokhansanj, S., Lim, C. J., Bi, X. T., Stephen, J. D., Pribowo, A., & Mabee, W. E. (2015). Steam explosion of oil palm residues for the production of durable pellets. *Applied Energy*, 141, 160–166.
- Loh, S. K. (2017). The potential of the Malaysian oil palm biomass as a renewable energy source. *Energy conversion and management*, 141, 285-298.

MaquinPRO de Colombia S.A.S. (2022, Febrero) (s. f.). Peletizadora Maquin Pro de Colombia

1. Scribd. Recuperado 5 de febrero de 2022, de <https://es.scribd.com/document/321642003/Peletizadora-Maquin-Pro-de-Colombia-1>

Mekhilef, S., Saidur, R., Safari, A., & Mustaffa, W. E. S. B. (2011). Biomass energy in Malaysia: current state and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(7), 3360-3370.

Miller, B. (2013). Fuel considerations and burner design for ultra-supercritical power plants. In *Ultra-Supercritical Coal Power Plants* (pp. 57-80). Woodhead Publishing.

Mutsaers, H. J. W. (2019). The challenge of the oil palm: using degraded land for its cultivation. *Outlook on Agriculture*, 48(3), 190-197.

Nasrin, A. B., Ma, A. N., Choo, Y. M., Mohamad, S., Rohaya, M. H., Azali, A., & Zainal, Z. (2008). Oil palm biomass as potential substitution raw materials for commercial biomass briquettes production. *American Journal of Applied Sciences*, 5(3), 179-183.

Nielsen, N. P. K., Gardner, D. J., Poulsen, T., & Felby, C. (2009). Importance of temperature, moisture content, and species for the conversion process of wood residues into fuel pellets. *Wood and Fiber Science*, 41(4), 414-425.

Nunes, L. J. R., Matias, J. C. O., & Catalão, J. P. S. (2016). Biomass combustion systems: A review on the physical and chemical properties of the ashes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 235-242.

Nyakuma, B. B., Wong, S., & Oladokun, O. (2019). Non-oxidative thermal decomposition of oil palm empty fruit bunch pellets: fuel characterisation, thermogravimetric, kinetic, and thermodynamic analyses. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-20.

- Ophardt, C. (2003). Polarity of Simple Inorganic Compounds. Chemistry.elmhurst.edu. Recuperado 13 de febrero de 2022, de <http://chemistry.elmhurst.edu/vchembook/214organicchain.html>
- Ozbayoglu, G. (2018). 3.19 Energy Production From Coal. *Comprehensive Energy Systems*, 788–821.
- Pérez, C. I. T., & Lopez, L. A. Q. (2019). Análisis de residuos sólidos de palma africana, como alternativa de aprovechamiento de energías renovables en el departamento del Cesar. *Ingenierías USBMed*, 10(1), 8-18.
- Rashid, S. R. M., Saleh, S., & Samad, N. A. F. A. (2017). Proximate analysis and calorific value prediction using linear correlation model for torrefied palm oil wastes. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 131, p. 04002). EDP Sciences.
- Redagícola. (2021, marzo). Producción de aceite de palma llegaría a 1,6 millones de toneladas. Recuperado 9 de enero de 2022, de <https://www.redagricola.com/co/produccion-de-aceite-de-palma-alcanzaria-este-ano-16-millones-de-toneladas-esta-campana/>
- Rincón, S., & González, A. (2014). Estudio de factibilidad para la fabricación de pellets a partir de material lignocelulósico proveniente de palma de aceite. [Tesis de grado, Universidad Libre]. Repositorio Institucional – Universidad Libre.
- Ritchie, H., & Roser, M. (2021). Palm Oil. *Our World in Data*. Recuperado 27 de noviembre de 2021, de <https://ourworldindata.org/palm-oil>
- Sillard Pérez, S. A. (2002). Residuos de fluvalinato en cera de abejas de colmenares de la Décima Región (Doctoral dissertation, Tesis. Escuela Ing. en Alimentos, Facultad de Ciencias Agraria, Universidad Austral de Chile, Valdivia).

- Subramaniam, V. (2013). Nueva tecnología para la recuperación de aceite de la fibra de prensa. *Revista Palmas*, 34, 19-25.
- Subramaniam, V., Chow, M. C., & Ma, A. N. (2004). Energy database of the oil palm. *Palm Oil Bulletin*, Kuala Lumpur, Malaysia, 70, 15-22.
- Temmerman, M., Rabier, F., Jensen, P. D., Hartmann, H., & Böhm, T. (2006). Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes. *Biomass and Bioenergy*, 30(11), 964-972.
- Tinto, W. F., Elufioye, T. O., & Roach, J. (2017). Waxes. In *Pharmacognosy* (pp. 443-455). Academic Press.
- Yan, M., Hantoko, D., Susanto, H., Ardy, A., Waluyo, J., Weng, Z., & Lin, J. (2019). Hydrothermal treatment of empty fruit bunch and its pyrolysis characteristics. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 9(4), 709-717.
- Zafar, S. (2021, 11 septiembre). Energy Potential of Palm Kernel Shells. *BioEnergy Consult*. Recuperado 11 de diciembre de 2021, de <https://www.bioenergyconsult.com/palm-kernel-shells/>
- Zapata, A., Rojas, G. T., Prat, S. R., & Hassig, A. G. (2017). Peletización de tusa y fibra de palma africana torrefacta: evaluación del efecto de la temperatura de peletización y de torrefacción en la peletización y la calidad de los pélets. *Revista Palmas*, 38(2), 64-82.

APÉNDICES

Apéndice A. Molde utilizado para la elaboración de los pellets

El molde utilizado para la elaboración de los pellets fue un molde cilíndrico de acero galvanizado, el molde consiste principalmente en un cuerpo cilindro con dimensiones de 100 mm de largo, 44 mm de diámetro y un orificio en el centro de este con un diámetro de 8,25 mm en el cual se cargaba la biomasa a comprimir, esto se muestra en la Figura 16, y una guía o varilla que era la encargada de realizar la compresión para que se formara el pellet, las dimensiones de la tapa fueron las siguientes 38mm de largo y 44mm de diámetro, en cuanto a las dimensiones de la varilla fueron las siguientes 80mm de largo y 7,9 mm de diámetro, esto se encuentra ilustrado en la Figura 17.

Figura 16

Cilindro del molde para la elaboración de pellets.

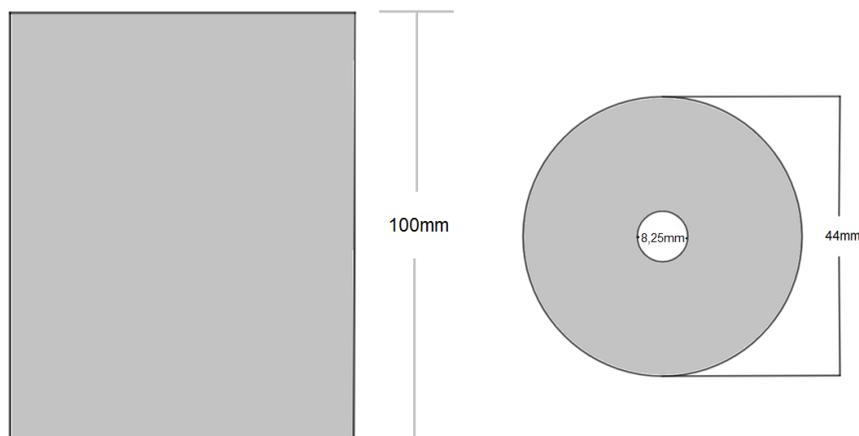


Figura 17

Tapa del molde para la elaboración de pellets.

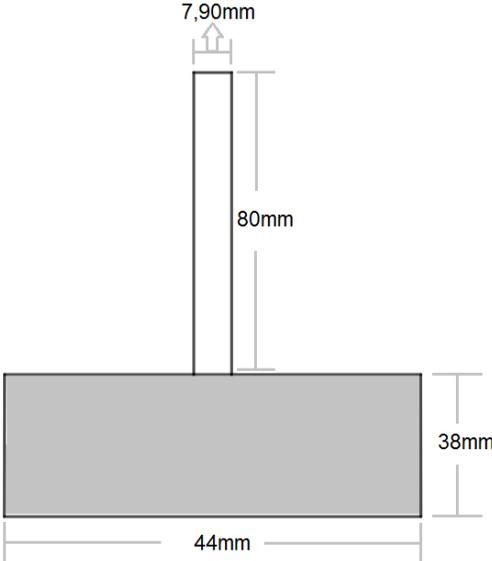


Figura 18

Montaje de molde para la elaboración de pellets.

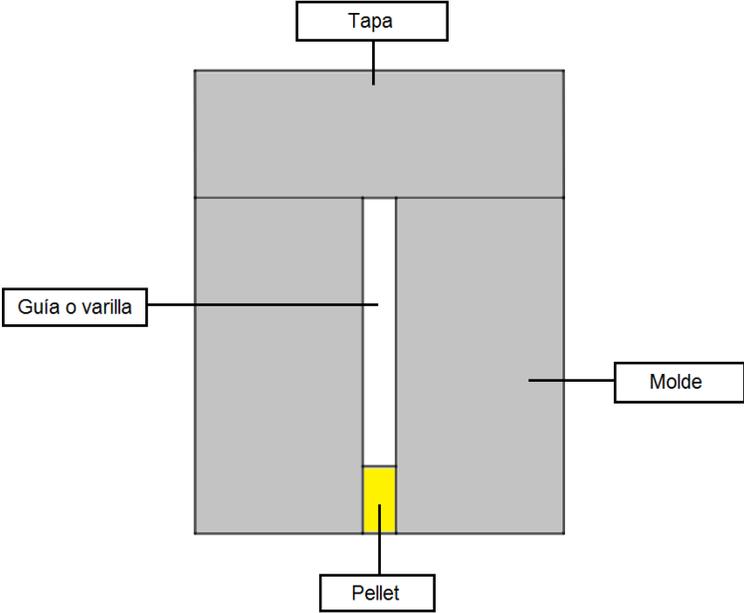


Figura 19

Imagen real del molde para la elaboración de pellets.



Apéndice B. Tambor rotatorio usado en la prueba de durabilidad

Figura 20

Tambor cerámico utilizado para determinar la durabilidad de los pellets.



Figura 21

Deflectores de madera adaptados al tambor cerámico para las pruebas de durabilidad.



Figura 22

Montaje del tambor rotatorio cerámico para la determinación de la durabilidad.



Apéndice C. Imágenes de los comprimidos de biomasa elaborados**Figura 23**

Pellets correspondientes al tratamiento M1.

**Figura 24**

Pellets correspondientes al tratamiento M2.

**Figura 25**

Pellets correspondientes al tratamiento M3.



Figura 26

Pellets correspondientes al tratamiento M5.



Figura 27

Pellets correspondientes al tratamiento M6.



Figura 28

Pellets correspondientes al tratamiento M7.



Figura 29

Pellets correspondientes al tratamiento M8.



Figura 30

Pellets correspondientes al tratamiento M9.



Apéndice D. Gráficas de termogravimetría

Figura 31

Análisis de termogravimetría correspondientes al tratamiento M10.

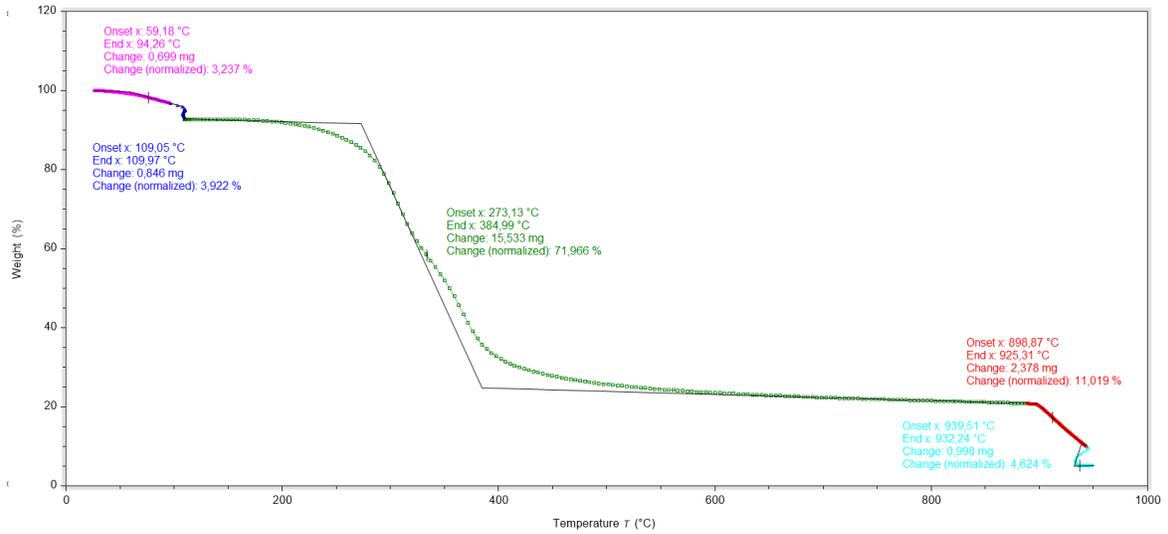


Figura 32

Análisis de termogravimetría correspondientes al tratamiento M11.

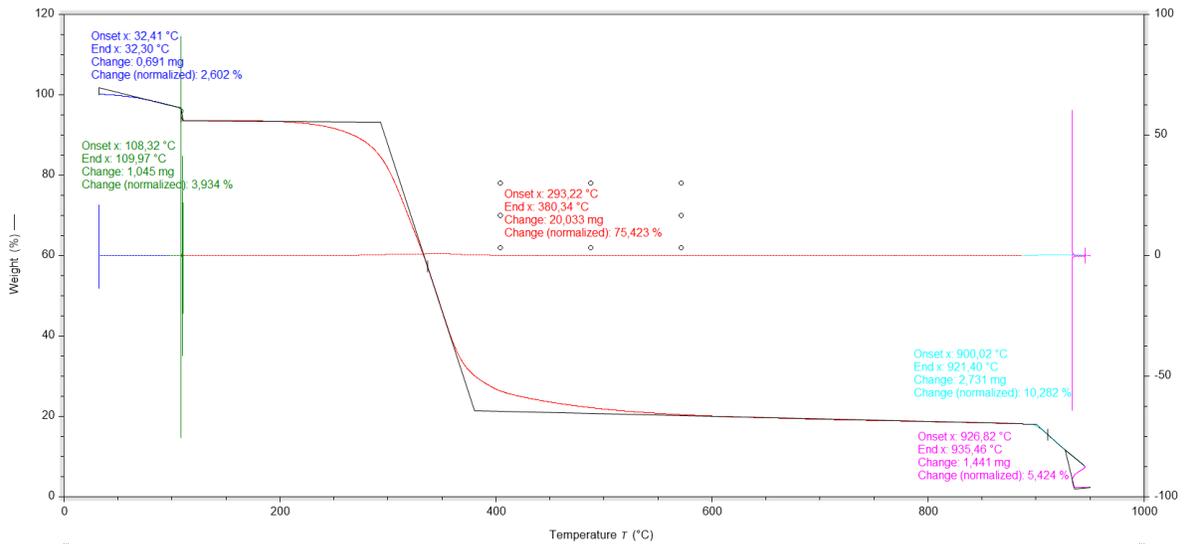


Figura 33

Análisis de termogravimetría correspondientes al tratamiento M5.

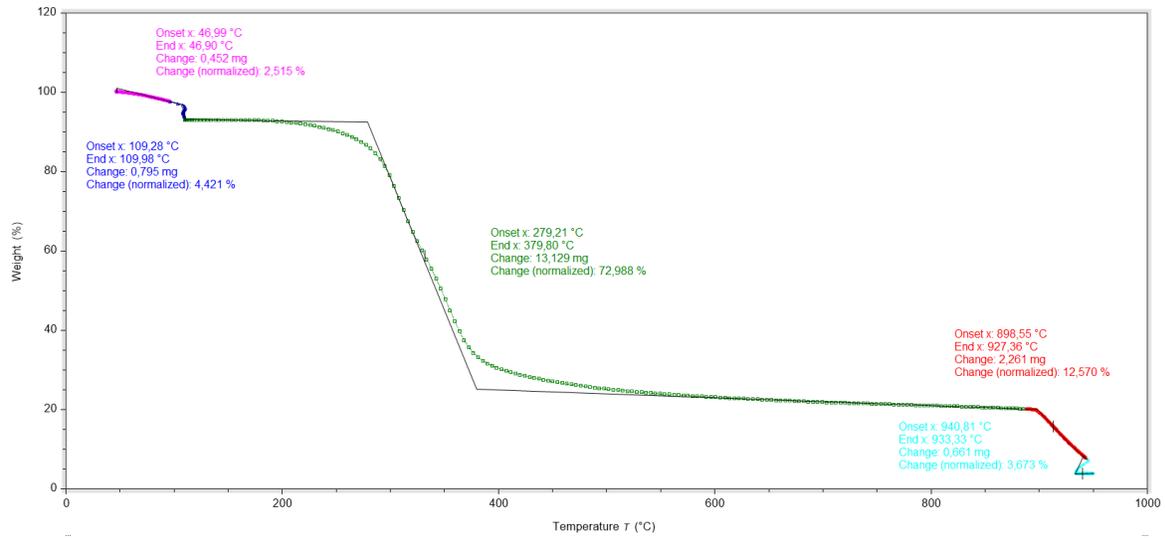


Figura 34

Análisis de termogravimetría correspondientes al Raquis

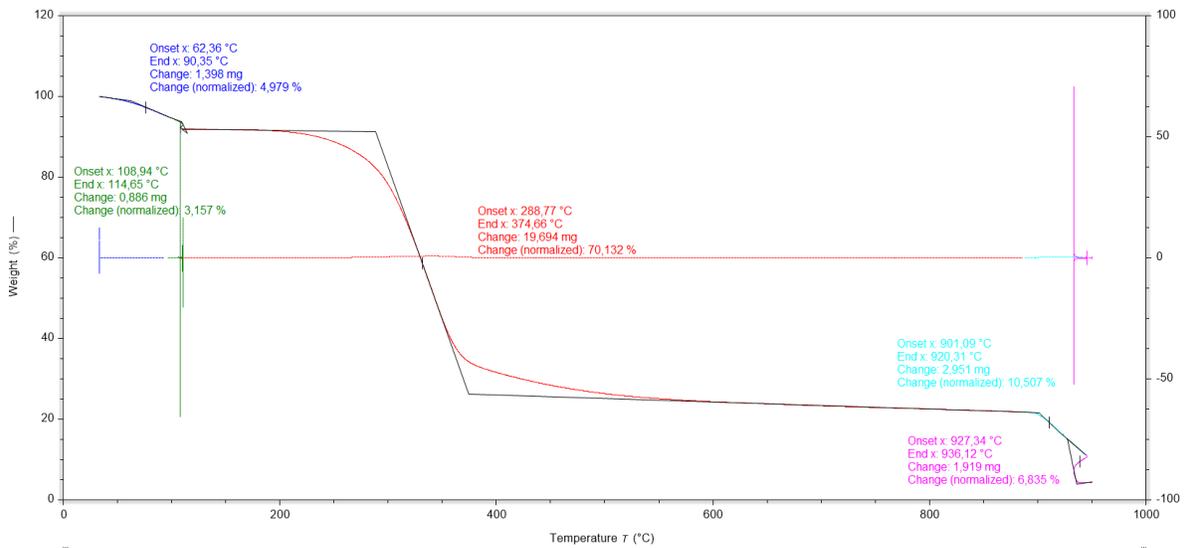


Figura 35

Análisis de termogravimetría correspondientes a la Fibra.

