UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Estudio de la producción de pellets a partir de borra de café

Angélica María Vargas Lazo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de ingeniería
Bogotá, Colombia
2018

Estudio de la producción de pellets a partir de borra de café

Angélica María Vargas Lazo

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Química

Director:
Dr.-Ing. Juan Carlos Serrato Bermúdez

Línea de Investigación:
Biorrefinerías y biocombustibles
Grupo de Investigación:
Procesos químicos y bioquímicos

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de ingeniería
Bogotá, Colombia
2018

A mis padres, mi mayor motivación siempre.

La ciencia será siempre una búsqueda, jamás un descubrimiento real. Es un viaje, nunca llegada.

Karl Raimund Popper

Agradecimientos

Gracias a Dios, a mis padres y hermanos por permitirme alcanzar mis metas y ser mi apoyo incondicional en momentos de dificultad.

Especial agradecimiento al Dr.-Ing. Juan Carlos Serrato Bermúdez por su confianza, apoyo y comprensión siempre. Por su colaboración y ayuda en el desarrollo de este trabajo y por siempre brindarme oportunidades de crecimiento personal y profesional.

Expreso mis más sinceros agradecimientos a mis amigos y especialmente a Matthias Aschenbrenner, quienes siempre fueron un apoyo fundamental y me impulsaron a continuar con mis proyectos personales y profesionales.

A la Dr.-Ing. Sonia Rincón por permitirme trabajar en el laboratorio de Transferencia de Calor.

A todas las personas administrativas y compañeros de laboratorio con las cuales compartí extensas jornadas de trabajo e hicieron parte de este proyecto.

Gracias a la Universidad Nacional de Colombia por permitirme crecer profesionalmente y brindarme todas las herramientas para lograrlo.

Resumen

En este trabajo se elaboraron pellets a partir de borra de café, para esto inicialmente se evaluaron tres borras de diferente origen. Después de esto se seleccionó la biomasa más apropiada para ser utilizada como combustible, de acuerdo con tres criterios: contenido de humedad, contenido de cenizas y poder calorífico superior. Con la borra seleccionada se realizaron todos los ensayos de este proyecto.

Posteriormente, se evaluó el efecto de la humedad y el uso de tres aglomerantes en la elaboración de los pellets: glicerina, aceite crudo de palma y biodiesel. Después de realizar varios experimentos exploratorios, se definieron los intervalos de concentración para la humedad y los agentes aglomerantes (2 - 8% para aglomerantes y 4- 8% para la humedad). Seguido a esto, se realizó un diseño factorial completo que definió las combinaciones más relevantes de humedad – aglomerante, obteniéndose 27 ensayos finales. Los pellets obtenidos se caracterizaron física, química y mecánicamente, de acuerdo con los estándares internacionales para biocombustibles sólidos. Los parámetros evaluados fueron contenido de cenizas, materia volátil, humedad, presión de peletización, poder calorífico superior y dureza de los pellets. Finalmente se encontró que los mejores pellets fueron aquellos elaborados con un contenido de humedad del 4% y 2% de aceite de palma como aglomerante, estos reportaron un poder calorífico de 23,54 MJ/Kg y una dureza de 3,13 Kg, la cual fue medida como la resistencia a la compresión de los pellets.

Palabras clave: Borra de café, pellets, biomasa, biocombustible sólido, energía.

Abstract

In this work pellets were made from spent coffee grounds. Initially, three spent coffee grounds from different sources were evaluated. After this, the most suitable biomass was selected to be used as fuel, according to three selection criteria: moisture content, ash content and higher calorific value. All the experiments of this project were made with the selected spent coffee ground.

The effect of moisture and using three binders in the preparation of the pellets was evaluated; glycerin, crude palm oil and biodiesel. After performing several exploratory experiments, the concentration ranges for moisture and binding agents (2- 8% binder and 4- 8% moisture 2) were defined. Following this, a complete factorial design was carried out that defined the most relevant combinations of moisture - binder, obtaining 27 final tests. The pellets obtained were characterized physical, chemical and mechanical, according to international standards for solid biofuels. The parameters evaluated were ash content, volatile matter, moisture, pressure pelletizing, higher calorific value and durability of the pellets. Finally it was obtained that the best pellets were those made with a moisture content of 4% and 2% of palm oil as binder, this reported a calorific value of 23.54 MJ / Kg and a hardness of 3.13 Kg, which was measured as the compressive strength of the pellets.

Keywords: Spent coffee ground, pellets, biomass, solid biofuel, energy.

Contenido

Pág.

Resumen ..... **IX**

Lista de figuras ..... **XIII**

Lista de tablas **1**

Introducción **1**

1. Generalidades **1**
1.1 Producción de café a nivel mundial 1
1.2 Producción de café en Colombia 3
1.3 Residuos del café 3
1.4 Borra de café 5
1.4.1 Usos de la borra de café 6
1.5 Peletización de la borra de café 7
1.6 Mercado global de pellets 9
1.7 Proceso de Peletización 10
1.7.1 Parámetros de elaboración de pellets 10
1.7.2 Dimensiones del pellet 13
1.7.3 Humedad 14
1.7.4 Temperatura de peletización 15
1.7.5 Presión de peletización 15
1.7.6 Tamaño de partícula 15
1.7.7 Dureza 16
1.7.8 Aglomerantes 16
1.8 Normatividad de pellets 17

2. Objetivos **1**
2.1 Objetivo General 1
2.1.1 Objetivos específicos 1

3. Metodología de la peletización **1**
3.1 Caracterización materias primas 1
3.1.1 Análisis próximo 1
3.1.2 Análisis Último 2
3.1.3 Tamaño de partícula 3
3.2 Secado de la biomasa 3
3.3 Peletización 4
3.3.1 Maquina peletizadora 4
3.3.2 Protocolo de peletización 6

3.3.3 Modelo de optimización 6
3.4 Caracterización de los pellets producidos 8
3.4.1 Dimensiones de los pellets obtenidos 8
3.4.2 Determinación del contenido de humedad de los pellets de borra de café. 8
3.4.3 Determinación del contenido de cenizas y temperatura final de los pellets de borra de café 8
3.4.4 Poder Calorífico 9
3.4.5 Dureza 9
3.4.6 Resistencia al impacto 9
3.4.7 Presión de peletización 10

4. Resultados 11
4.1 Caracterización de materias primas 11
4.1.1 Determinación del tamaño de partícula de la borra de café 14
4.2 Secado de la borra de café 16
4.3 Presión de peletización 19
4.4 Modelo de optimización 22
4.5 Caracterización fisicoquímica de los pellets obtenidos 24
4.5.1 Dimensiones de los pellets 24
4.5.2 Determinación del contenido de humedad final de los pellets obtenidos 25
4.5.3 Determinación del contenido de cenizas y temperatura final de fabricación de los pellets. 31
4.5.4 Análisis elemental 33
4.5.5 Determinación del poder calorífico de los pellets 34
4.6 Caracterización mecánica de los pellets obtenidos 37
4.6.1 Dureza de los pellets 37
4.6.2 Resistencia al impacto de los pellets obtenidos 42

5. Conclusiones y recomendaciones 44
5.1 Conclusiones 44
5.2 Recomendaciones 46

Bibliografía 47

A. Anexo: Especificaciones de equipos utilizados 57

B. Anexo: Comportamiento de la presión de peletización 61

C. Anexo: Especificaciones de los aglomerantes 75

D. Anexo: Resultados del ANOVA 77

E. Anexo: Cromatogramas del análisis elemental. 78

Lista de figuras

Pág.

Figura 1-1. Sección transversal y longitudinal de un grano de café [33]. Adaptado de Wintgens, 2012. 4
Figura 1-2. Interacciones de las características físicas/mecánicas del combustible y las características químicas de la biomasa [37]. Adaptado de Döring, 2013. 11
Figura 1-3. Dimensiones de los pellets según la EN14961-1. 14
Figura 3-1. Diagrama general de la máquina peletizadora. 1) recámara con émbolo superior, 2) Columnas de apoyo, 3) émbolo, 4) camisa, 5) base, 6) sistema hidráulico, 7) entrada de aceite al émbolo superior, 8) salida de aceite al émbolo superior, 9) tanque de aceite [32]. 5
Figura 3-2. Sección transversal de la máquina peletizadora. 1) émbolo, 2) camisa, 3) dado, 4) base [32]. 5
Figura 4-1. Distribución del diámetro de partícula de la borra de café. 15
Figura 4-2. Curva de secado de la borra de café. 17
Figura 4-3. Pérdida de masa de la borra de café durante el secado. 18
Figura 4-4. Presión de peletización de los pellets elaborados con aceite de palma como aglomerante. 20
Figura 4-5. Presión de peletización de los pellets elaborados con biodiesel como aglomerante. 21
Figura 4-6. Presión de peletización de los pellets elaborados con glicerina como aglomerante. 22
Figura 4-7. Pellets elaborados con una humedad del 20%. 23
Figura 4-8. Pellets elaborados con una concentración de aceite de palma del 2% y un contenido de humedad del 4%. 24
Figura 4-9. Longitud de un pellet promedio. 25
Figura 4-10. Vista frontal del dado de peletización utilizado. 25
Figura 4-11. Efecto de la humedad en los pellets elaborados con aceite de palma como aglomerante. 27
Figura 4-12. Efecto de la humedad en los pellets elaborados con biodiesel como aglomerante. 28
Figura 4-13. Efecto de la humedad en los pellets elaborados con glicerina como aglomerante. 30
Figura 4-14. Poder calorífico de los pellets elaborados con borra de café. 35
Figura 4-15. Dureza de los pellets elaborados con aceite de palma como aglomerante. 39
Figura 4-16. Dureza de los pellets elaborados con biodiesel como aglomerante. 40

Figura 4-17. Dureza de los pellets elaborados con glicerina como aglomerante..... 40
Figura 4-18. Resistencia al impacto de todos los pellets obtenidos con diferentes aglomerantes. 42
Figura A-1. Especificaciones técnicas de la balanza de humedad AMB. Tomado del manual de la balanza..... 57
Figura A-2. Especificaciones técnicas del termómetro infrarrojo EXTECH INSTRUMENTS. Tomado del manual del termómetro. 59
Figura A-3. Especificaciones técnicas de la peletizadora. Tomado del manual de mantenimiento de la peletizadora. 60
Figura B-4. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra A58..... 61
Figura B-5. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra A84..... 61
Figura B-6. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra A56..... 62
Figura B-7. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra A86..... 62
Figura B-8. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra A28..... 63
Figura B-9. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra A88..... 63
Figura B-10. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra A24..... 64
Figura B-11. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra A26..... 64
Figura B-12. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra A54..... 65
Figura B-13. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra B88..... 65
Figura B-14. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra B58..... 66
Figura B-15. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra B54..... 66
Figura B-16. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra B28..... 67
Figura B-17. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra B84..... 67
Figura B-18. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra B56..... 68
Figura B-19. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra B86..... 68
Figura B-20. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra B24..... 69
Figura B-21. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra B26..... 69
Figura B-22. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra G24. 70
Figura B-23. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra G28. 70
Figura B-24. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra G54. 71
Figura B-25. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra G88. 71
Figura B-26. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra G58. 72
Figura B-27. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra G26. 72
Figura B-28. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra G86. 73
Figura B-29. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra G56. 73
Figura B-30. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra G84. 74
Figura C-31. Especificaciones del biodiesel de soya..... 76
Figura E-32. Cromatograma de la muestra Borra 3..... 78
Figura E-33. Cromatograma de la muestra A24. 78
Figura E-34. Cromatograma de la muestra B24. 79
Figura E-35. Cromatograma de la muestra G24..... 79

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1-1. Balance mundial cafetero. Año cafetero 2012/13 – 2017/18*. Millones de sacos de 60Kg [20]. 2
Tabla 1-2. Tabla comparativa de diferentes biomasas y su respectivo poder calorífico [30, 6]. 8
Tabla 1-3. Características de combustión de diferentes biocombustibles sólidos. Adaptado de [34]..... 8
Tabla 1-4. Caracterización química de la borra de café. Adaptado de [8, 9, 33]..... 9
Tabla 1-5. Composición y Características Cualitativas de los Pellets de Biomasa y sus efectos en la Combustión [37]. Adaptado de Döring, 2013. 11
Tabla 1-6. Principales normas europeas para la elaboración de pellets y briquetas [43, 44]. 18
Tabla 3-1. Datos diseño de experimentos. 7
Tabla 4-2. Resultados de la caracterización experimental de las materias primas..... 11
. **Tabla 4-3:** Determinación del contenido de cenizas y temperatura final de los pellets elaborados con aceite de palma como aglomerante. 31
Tabla 4-4: Determinación del contenido de cenizas y temperatura final de los pellets elaborados con biodiesel como aglomerante..... 32
Tabla 4-5: Determinación del contenido de cenizas y temperatura final de los pellets elaborados glicerina como aglomerante. 32
Tabla 4-6. Análisis elemental de la borra de café y los mejores pellets obtenidos en el diseño experimental..... 34
Tabla 4-7. Poder calorífico calculado y experimental de los pellets de borra de café..... 36
Tabla 4-1. Tabla comparativa de los pellets obtenidos experimentalmente y los pellets comerciales. 45
Tabla C-1. Especificaciones del aceite crudo de palma. Reportado por palmar Guaicaramo..... 75
Tabla C-2. Especificaciones de la glicerina. Reportado por el proveedor. 76
Tabla D-3. ANOVA del experimento factorial de la interacción de la humedad, aglomerantes y tipo de aglomerante en la elaboración de pellets de borra de café..... 77

Introducción

El agotamiento de los recursos fósiles y los impactos ambientales generados por el uso de los mismos, han dado origen a la implementación y estudio de nuevas fuentes de energía renovable como la biomasa. Estas nuevas alternativas intentan además lograr por lo menos parcialmente la independencia energética de los derivados del petróleo y desplazar o modificar los métodos actuales de obtención de energía [1].

En los últimos años se ha incrementado la implementación de energías como la solar, eólica, hidráulica, mareomotriz, uso de biocombustibles, biomasa y el hidrógeno [2]. Una de las alternativas que está tomando mayor relevancia a nivel mundial es el uso de la biomasa [3], la cual se considera como una fuente renovable de energía porque su valor energético proviene del sol.

La biomasa comprende una gran gama de desechos agroindustriales y domésticos, los cuales se generan en todo el mundo. Países como India, Estados Unidos, los pertenecientes a la Unión Europea, Brasil, Argentina y específicamente Colombia, incrementaron su uso en un 6% en el 2016, desde el año 2007 [4]. Tan solo en nuestro país se generan 71.943.813 t/año de desechos agrícolas de cosecha y agroindustriales, de los cuales 5.051.248 t/año corresponden a los desechos de la industria del café [5].

Los residuos del café producidos desde el cultivo hasta el uso del producto final se han convertido en una problemática que está afectando a las regiones productoras del grano, puesto que sus suelos, fuentes hídricas y atmósfera se han visto contaminadas [6]. En el proceso del café se estima que menos del 5% de la biomasa generada se aprovecha en la elaboración de la bebida, el resto se convierte en residuos lignocelulósicos como hojas, ramas, tallos, cascarillas, pulpas, borra y granos defectuosos [7].

Aunque existen avances y desarrollos a nivel industrial en procesos de transformación térmica, química o física donde se utilizan estos residuos [6], aún existen otras posibles alternativas de aprovechamiento para desechos como la borra de café.

La borra, también conocida como fondos o cuncho del café, se produce después de la preparación de la bebida o como un residuo de la extracción del grano de café a nivel industrial. Actualmente está siendo utilizada para la producción de biodiesel [8], sustrato de crecimiento para hongos, compostaje, combustible, alimento para animales [9] y producción de biocombustibles sólidos como pellets [10].

Aunque la borra tiene diferentes usos, la peletización resulta ser una opción interesante puesto que no existen muchos reportes o investigaciones que muestren resultados específicos de composición, aglomeración y funcionalidad del producto final (pellet). Mediante la peletización se obtienen biocombustibles sólidos, los cuales son una materia prima densificada que da solución al problema del requerimiento energético. Con la densificación no solo se logra ayudar al proceso de combustión (aumentando el poder calorífico), sino también ayudar a solucionar los problemas asociados a la carga, transporte y almacenamiento del producto (aumentando la densidad) [11].

Por tanto, los pellets son biocombustibles sólidos que pueden ser utilizados en la generación de energía a nivel doméstico e industrial. Un ejemplo de ello es la demanda de pellets generada por Europa (75% a nivel mundial, equivalente a 19Mton) durante el 2016, para la calefacción durante el invierno de países como Italia, Alemania, Suecia y Francia [12]. Para que los pellets puedan ser utilizados como un producto comercial, deben cumplir con las normas internacionales (ASTM, DIN, EU, etc.) que definen parámetros como la humedad, poder calorífico, resistencia a la abrasión, tamaño de partícula y forma de los pellets.

Los pellets pueden estar conformados por mezclas de diferentes tipos de biomasa e incluso requerir el uso de aglomerantes para su compactación. Este trabajo estudia el efecto de la humedad como aglomerante en la elaboración de los pellets, así como también el uso de otros productos con un potencial energético; glicerina, biodiesel y aceite de palma crudo. Tan solo en Colombia se tiene una producción de aproximadamente 400.000 ton/año de biodiesel, una de las razones por las cuales se utilizó este biocombustible [13]. En cuanto al aceite de palma se producen 69 millones de toneladas por año [14] y la glicerina se produce como un residuo del proceso de obtención de biodiesel, siendo

aproximadamente 40.000 ton/año [15]. Estos son aglomerantes poco usados en la producción de biocombustibles sólidos, sin embargo tienen potencial debido a sus características. El aceite crudo de palma tiene un bajo valor agregado pero puede ser estudiado para su uso como aglomerante gracias a sus propiedades químicas como un poder calorífico de 39,19 MJ/Kg, punto de fusión entre 35-39°C, un porcentaje máximo de humedad de 0,5% y de impurezas de 0,15%, entre otras; el biodiesel es un biocombustible con una gran producción en Colombia y la glicerina además de ser un residuo que se produce en grandes cantidades, también tiene un bajo costo [16, 13, 17].

Finalmente se busca obtener un producto competitivo comercialmente, es decir, que se pueda utilizar como combustible sólido en chimeneas, hornos y calderas. Para ello se consideran y estudian los parámetros mencionados anteriormente.

1. Generalidades

Este capítulo resumen los principales aspectos de la producción de café a nivel nacional e internacional, teniendo en cuenta la problemática de sus residuos y posibles usos.

1.1 Producción de café a nivel mundial

Las variedades de café más comercializadas son Robusta y Arábica. De estas, la *Coffea arábica* L. es la más común y constituye alrededor del 60% del café que se comercializa en el mercado internacional [18].

La producción mundial de café se incrementó en el orden del 4% anual para el 2016, alcanzando los 155,8 millones de sacos. Este aumento se debió al crecimiento del café arábico, especialmente en Brasil (23%), además de la recuperación de países como Guatemala, Nicaragua y Costa Rica, lo cuales habían sido afectados por la roya en el 2014 [19]. Por otra parte, la disminución del café robusta se debió a las sequias en la zona de Espíritu Santo en Brasil y en Vietnam en el año 2016 [19].

Respecto al café robusta, se disminuyó su producción en países como Brasil en un 30%, reportando un total de 10 millones de sacos para el periodo 2016/17, mientras que Vietnam tuvo una caída del 2%, llegando a los 26 millones de sacos para el mismo periodo. Esta caída se debe a la mayor producción de café arábico por parte de Brasil, la cual creció en un 3%, pasando de 40,6 millones de sacos en el periodo 2015/16 a 42 millones en el periodo 2016/17 [20].

Para el periodo 2017/18 se espera que la producción mundial de café alcance los 166,8 millones de sacos, de los cuales Brasil produciría 58,5 millones y Vietnam 28 millones. Respecto a Colombia y Centroamérica, se espera que tengan un crecimiento entre el 1% y 2% respectivamente.

A continuación, en la **Tabla 1-1** se presenta el balance mundial cafetero, desde el año 2012 al 2018.

Tabla 1-1. Balance mundial cafetero. Año cafetero 2012/13 – 2017/18*. Millones de sacos de 60Kg [20].

	2012/13	**2013/14**	**2014/15**	**2015/16**	**2016/17**	**2017/18***
Producción	151	147	150	159	157	167
Brasil	55	51	51	56	52	59
Vietnam	24	28	27	28	26	28
Otros	72	68	72	75	79	80
Consumo	144	147	150	153	157	161
Productores	42	43	44	46	47	48
Importadores	102	104	106	108	110	113
Balance	7	0	1	5	0	6
Inventarios finales	35	41	43	34	32	29
Productores	16	20	21	12	10	9
Importadores	19	22	22	22	22	21
% Inv./Consumo	25%	28%	29%	22%	20%	18%

*Estimado

Estos valores de producción están asociados con el consumo de la bebida. Este rompió record en el 2014 con niveles de 147 millones de sacos. Estados Unidos se convirtió en el mayor consumidor para esta fecha con 23 millones de sacos, seguido por Brasil con 21, Alemania y Japón con 10 y 7 millones de sacos respectivamente [6]. También se incrementó el consumo en regiones como África y Medio Oriente en general, como lo es Irán, Egipto y Marruecos, los cuales presentaron tasas de crecimiento de alrededor del 12% en el 2014 [6]. Se estima un aumento del 2,4% en el consumo mundial del periodo 2017/18, con respecto al periodo 2016/17 por parte de los países productores y 2,4% por parte de los países consumidores, impulsado por países no tradicionales como Irlanda, Pakistán y Argentina [20].

1.2 Producción de café en Colombia

Como tercer productor de café a nivel mundial [6], en Colombia más de 563.000 familias se benefician de su cultivo [18], produciendo café 100% arábico lavado. Se logró una producción de 14 millones de sacos (1 saco equivale a 60 kg) en el año 2016 [19] y una producción por hectárea de 15,26 sacos, siendo esta cifra la más alta en los últimos catorce años [6]. El aumento de la producción se debió a los cafetales renovados con variedades resistentes y a una mayor densidad de siembra [19].

Por otra parte, en el país las importaciones de café aumentaron en 86 mil sacos (46%) para el 2016, debido a que los mercados locales dejaron de producir café de menor costo, para producir café de alta calidad (Premium) y poder exportarlo. Con esto, el consumo doméstico creció un 2%, llegando a 1,7 millones de sacos, es decir, un consumo *per cápita* de 2,1 Kg de café verde [19].

Respecto al precio interno del café, en el 2017 se registró un promedio de $818 mil por carga de 125 Kg de café pergamino seco. El precio ha disminuido desde agosto de 2017, cuando se obtuvo un máximo de $923 mil/carga. En cuanto al precio internacional, se redujo en un 18% en 2017 respecto al 2016, al pasar de 148 US¢/lb en enero a 122,1 US¢/lb en diciembre de 2017 [20].

1.3 Residuos del café

El grano de café está compuesto por diferentes capas; pulpa (mesocarpio), película plateada (espermodermo), pergamino (endocarpio), mucílago (mesocarpio) y piel exterior (exocarpio) (**Figura 1-1**). Cada una de estas capas representan un residuo junto con la borra que se produce después de preparada la taza de café [7] o a nivel industrial.

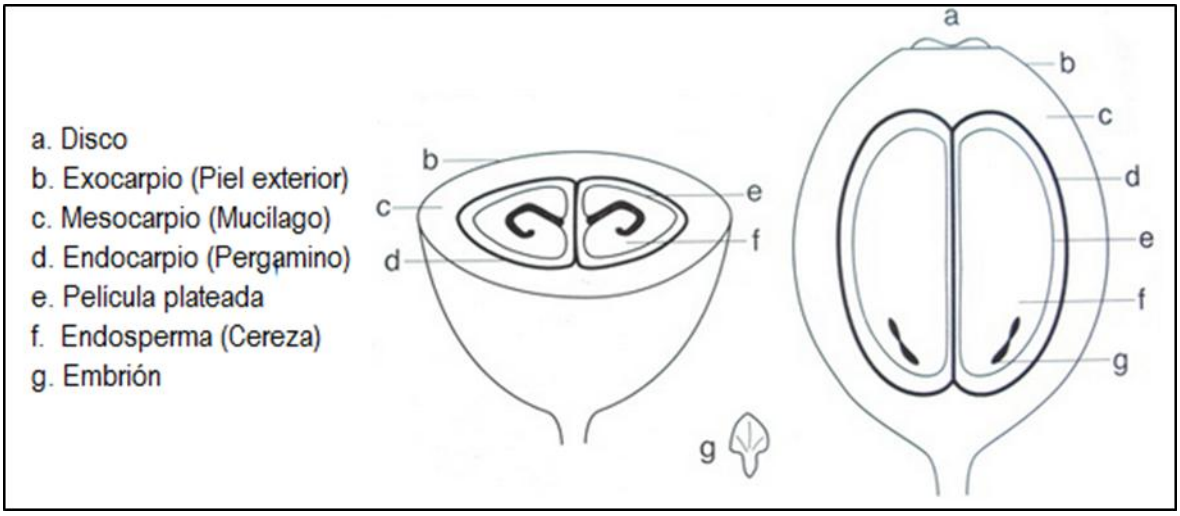

Figura 1-1. Sección transversal y longitudinal de un grano de café [33]. Adaptado de Wintgens, 2012.

La pulpa de café representa el 44% del peso del fruto seco en base húmeda y es el primer producto obtenido en el procesamiento del café [7]. Por cada millón de sacos de 60 kg que Colombia exportó en el 2017 se generaron 1.684.000 t de pulpa fresca, la cual se convierte en un desecho contaminante [7]. El mucílago se genera en la etapa del desmucilaginado y representa alrededor de 15% del peso del fruto fresco en base húmeda. En Colombia por cada millón de sacos de 60 kg de café que se exportan, se generan aproximadamente 575.347 t de mucílago fresco [7]. También se genera cisco de café, el cual está constituido por la cascarilla y la película plateada. El cisco representa en peso el 4,2% del fruto fresco [7] y es rico en materia orgánica y nutrientes, contiene compuestos como cafeína, taninos y polifenoles. Para el año 2017 se produjo 162.178 t de cisco por cada millón de sacos de 60 kg exportados. Debido a la presencia de estos últimos compuestos, estos residuos tienen un carácter tóxico que no solo contribuyen al problema de contaminación ambiental, sino que también limitan su uso como alimento animal [21].

Otro residuo importante es la borra del café, esta representa cerca del 10,4% del peso del fruto fresco [22]. Este residuo es producido a nivel doméstico e industrial, en los procesos de obtención de café soluble. Aproximadamente el 50% del café producido en el mundo se utiliza en la preparación de café soluble. Se estima que una tonelada de café verde genera cerca de 650 kg de borra de café y tan solo en países consumidores como Colombia se produjo 507.000 t para el año 2017 [23].

1.4 Borra de café

Comercialmente la bebida del café genera una cantidad de borra considerable, que finalmente se convierte en un desafío para su disposición debido a la alta demanda de oxígeno para su descomposición y la posible liberación de cafeína residual [24].

Esta biomasa contiene grandes cantidades de componentes orgánicos (ácidos grasos, lignina, celulosa, hemicelulosa, y otros polisacáridos) que pueden ser aprovechados como un producto de valor agregado. Los primeros reportes de investigaciones relacionados con esta biomasa fueron publicados en el año 1973, mientras que a comienzos de la última década, el número de publicaciones se incrementó alrededor de un 50% [24].

La composición de la borra varía de acuerdo con la especie de café del cual es obtenida, por ejemplo Campos *et al* [24] reportan la siguiente composición:

- Carbohidratos: la borra es rica en azúcares polimerizados en estructuras de celulosa y hemicelulosa, las cuales corresponden a casi la mitad (45,3% w/w, peso seco) del material. Contiene 46,8% de manosa, galactosa 30,4%, glucosa 19% y 3,8% de arabinosa, y mananos como principales polisacáridos [24].
- Proteínas: la borra contiene una cantidad significativa de proteínas (13,6% w/w). Los compuestos de nitrógeno son relativamente estables entre las especies de café incluso durante el tostado, estos varían desde 8,5 hasta el 13,6%. La proteína cruda en los residuos del café exprés varía entre 12,8 y 16,9% [24].
- Compuestos nitrogenados no proteicos: son compuestos como aminoácidos libres, péptidos y alcaloides. Contribuyen considerablemente en el desarrollo del sabor del café y calidad durante el tostado. Los aminoácidos contenidos en el café arábico tostado corresponden al 6,4% del peso seco, lo que sugiere que 3,7% en peso seco de los aminoácidos se pueden encontrar en la borra de café [24].
- Cafeína: varias concentraciones de cafeína han sido reportadas dependiendo del proceso de extracción y la fuente de la borra del café. Sin embargo, el contenido de cafeína en la borra para café arábico esta entre 0,9 y 1,6% y para robusta entre 1,4-2,9% [24].
- Lípidos: la borra del café usualmente contiene 10-15% de lípidos [24].
- Compuestos fenólicos: recientemente, el interés en los productos naturales derivados de las plantas ha crecido, principalmente porque los antioxidantes sintéticos tienen varios inconvenientes. La borra del café contiene compuestos relacionados con la salud humana, tales como compuestos fenólicos antioxidantes, antibacterianos, antivirales,

antiinflamatorios y anticancerígenos. Todos las borras de café con la excepción de los de la cafetera moka, tienen cantidades importantes de ácidos cafealquínicos totales que van de 11,05 mg (café espresso) a 13,24 mg (filtro) por gramo de arábico y de 6,22 mg (filtro) a 7,49 mg (café espresso) por gramo de robusta [24].

- Minerales: la borra contiene cenizas (1,6%), que se componen de varios minerales. El potasio es el elemento más abundante, seguido por el fosforo y el magnesio [24].

1.4.1 Usos de la borra de café

En algunas fábricas de café soluble después de llevar la borra hasta una humedad del 15%, es utilizada como combustible en las calderas o para hacer carbón activado. Su valor calorífico esta entre 24,91 MJ/kg y 29,01 MJ/kg. En cuanto a los combustibles derivados de este sustrato se puede mencionar la producción de biogás, donde se han obtenido entre 250 y 300 L/kg de sólidos volátiles de la borra, con un contenido de metano entre 52% y 62%, lo que equivale a un potencial calorífico de 5,90 MJ/kg de borra seca [7]. De otro lado, en la producción de bioetanol se estima un volumen de 207,61 ml de etanol por kilogramo de borra seca, equivalentes a un poder calorífico de 4,38 MJ/kg. En cuanto a la producción de biodiesel, se reportan rendimientos entre 10% y 15% en peso, con una conversión del 100% del aceite en biodiesel, el cual tiene una capacidad calórica de 38,4 MJ/kg, equivalente a un poder calorífico de 5,76 MJ/kg de borra seca [7, 25].

Existen otro tipo de usos domésticos e industriales de la borra, por ejemplo como fertilizante, alimento animal, uso cosmético y sustrato para algunos hongos. Incluso existen reportes de algunas industrias [10] que están haciendo pellets para ser utilizados en la calefacción residencial, gracias a esto surge la idea de obtener un producto que puede ser llevado a la combustión y generación de energía. En el caso específico de Colombia, no se tienen reportes de la peletización de borra de café como una tecnología que genere un producto energéticamente valioso. Sin embargo, hay avances como la ley 1715 del 13 de mayo de 2014, *"Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional"* [26], que permite el desarrollo de nuevos proyectos de integración energética y aprovechamiento de los residuos de diversas agroindustrias representativas del país.

1.5 Peletización de la borra de café

El proceso de peletización se define como la aglomeración de una biomasa en partículas más grandes o pellets, mediante esfuerzos mecánicos, presión, calor y humedad [27]. Se realiza usualmente con biomasas lignocelulósicas como residuos de madera y agrícolas. Dentro de los factores que afectan la peletización está la humedad de la biomasa, la presión de peletización, la temperatura del proceso y el tamaño de grano de la materia prima utilizada. El pellet que se produce es un biocombustible sólido, de geometría cilíndrica, obtenido a partir de la extrusión de biomasa como virutas, aserrín, astillas, cascarillas etc., procedente de diferentes industrias. La peletización se realiza mediante extrusión, siendo la propia lignina de la biomasa la que actúa como aglomerante, aunque en algunas ocasiones es necesario utilizar un porcentaje de otras biomasas o sustancias que actúen como pegamentos [28], tales como almidones, aserrín, lignosulfato, entre otros [29].

El proceso de elaboración de pellets de borra de café está siendo implementado en países como Inglaterra, donde los fondos de café se utilizan para desarrollar productos de gran interés energético [10]. Esta constituye una de las mejores alternativas, puesto que las biomasas tradicionales como el cuesco de palma, bagazo de caña, etc., tienen deficiencias energéticas debido a su bajo poder calorífico y se hace difícil cumplir los requerimientos energéticos que usualmente satisfacen los combustibles fósiles [11].

En el mercado usualmente se consiguen pellets de diferentes materias primas y calidades. Los más comunes son los pellets de madera y sus derivados. Los principales sectores donde se usan son:

- Sector de generación de electricidad. Los pellets son quemados en centrales eléctricas a base de carbón, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero [30].
- Calefacción residencial en hornos y pequeñas calderas [30].

También se están estudiando otras materias primas para la elaboración de pellets como residuos de la industria azucarera, palma de aceite, carbón y recientemente la industria cafetera (borra de café) [31]. De la utilización de los fondos de café como biocombustible sólido existe muy poca información publicada e incluso aun es desconocido el proceso de elaboración de los pellets de borra de café a nivel industrial.

La borra de café es una biomasa interesante para ser peletizada debido a su alto poder calorífico. Sin embargo, es importante resaltar que también posee un porcentaje de humedad elevado en el momento de su recolección, el cual varía entre el 60% y 80% de humedad. Debido al alto contenido de humedad es necesario diseñar un proceso de secado antes de ser llevada a la peletizadora. Varios autores recomiendan una humedad de peletización entre 8% y 15% de humedad [32].

A continuación se muestra en las tablas **Tabla 1-2** y **Tabla 1-3** el poder calorífico de diferentes tipos de biomasa, allí se puede observar que la borra de café es competitiva a nivel energético con otras materias primas. En la

Tabla 1-4 se puede observar la caracterización química de la borra de café en base seca [8, 9, 33].

Tabla 1-2. Tabla comparativa de diferentes biomasas y su respectivo poder calorífico [30, 6].

Biomasa	**Poder calorífico (MJ/Kg)**	
	H_o[1]	H_s[2]
Cuesco de palma	22,3	21,1
Cascarilla de café	18,7	17,5
Bagazo de caña	17,9	16,9
Madera de Haya	18,3	17,1
Borra de café	26,96	24,91

[1] Poder calorífico superior

[2] Poder calorífico inferior

Tabla 1-3. Características de combustión de diferentes biocombustibles sólidos. Adaptado de [34].

Biocombustibles sólidos	**Contenido de humedad (%)**	**Cenizas (%)**	**HHV[1] (MJ/Kg)**	**LHV[2] (MJ/Kg)**
Phalaris arundinacea	4,7	5,5	19,5	-
Paja de trigo	8,6	7,9	17,617	-
Residuos de algodón	4,8	3,1	19,652	-
Residuos de soya	5,8	4,7	18,770	-
Residuos sólidos municipales	-	4,4	-	17,2
Pellets de madera	7,6	0,5	-	19,0

Biocombustibles sólidos	Contenido de humedad (%)	Cenizas (%)	HHV[1] (MJ/Kg)	LHV[2] (MJ/Kg)
Pellets de cortezas	7,8	3,7	-	20,1
Troncos de madera	15, 26, 28	0,3	-	19,0
Carbón	4,6	4,7	26,070	-

[1]HHV: Poder calorífico superior.

[2]LHV: Poder calorífico inferior.

Tabla 1-4. Caracterización química de la borra de café. Adaptado de [8, 9, 33].

Componente	Borra de café
C (%)	74
H (%)	9,8
N (%)	2,6
S (%)	0,17
0 (%)	13,4
Lignina	27,7
Celulosa	8,6
Hemicelulosa	61,7

Ventajas de la peletización

- Disminuye la dependencia de los combustibles fósiles.
- El producto final es un biocombustible económico.
- La materia prima utilizada es un desecho.
- Los pellets tienen alta densidad, requiriendo poco espacio de almacenamiento y facilitando el transporte.
- Se obtiene un biocombustible con menor cantidad de humedad que la inicial.
- Homogenización de la materia prima [32].
- Aplicación en equipos de conversión modernos como lechos fluidizados, spray, etc, [32].

1.6 Mercado global de pellets

El mercado de los pellets de madera se ha incrementado en un promedio del 14% por año desde el 2011. Este crecimiento se debe al ingreso al mercado de países del sudeste de

Europa y el consumo de países de Asia, los cuales se han visto impulsados por las políticas y objetivos de consumo bioenergéticos en Europa, según la FAO [35].

Los canales comerciales están controlados por la relación entre los Estados Unidos y el Reino Unido. Por otra parte, Japón y Corea del Sur son los principales consumidores del continente asiático [30].

Los países pertenecientes a la Unión Europea constituyen los mayores productores de pellets a nivel mundial (54%), seguidos de América del Norte (35%), quienes son líderes exportadores. Por otro lado, Asia, Australia y América Latina presentan producciones inferiores (11%).

Respecto a los precios de los pellets, es difícil obtener un promedio puesto que los grandes consumidores lo mantienen en confidencialidad, debido a que estos precios están sujetos a contratos a largo plazo y no se hacen públicos. Sin embargo, se tienen precios de pellets para consumidores residenciales (en Europa), los cuales están entre 200 €/ton y 300 €/ton, a excepción de Suiza y Francia, donde los precios son superiores. En 2013 se alcanzaron los más altos precios en Austria, Alemania, Suecia e Italia, mientras que en el 2014 aumentaron para los consumidores suizos, franceses y españoles. En el año 2016 los precios cayeron en todos los países debido a un exceso de oferta en los mercados de pellets pequeños, medianos e industriales [30].

1.7 Proceso de Peletización

Esta sección aborda las características más relevantes para la elaboración de pellets usados como biocombustibles sólidos, teniendo en cuenta los parámetros básicos exigidos por la normatividad internacional.

1.7.1 Parámetros de elaboración de pellets

Antes de la elaboración de los pellets, es importante determinar la biomasa que se utilizará y las propiedades que tiene la misma, puesto que el objetivo final es llevarla a una combustión lo más limpia posible. De estas propiedades existen unas más relevantes que otras, las cuales se deben ajustar a la normatividad internacional para poder llegar a la manufactura del producto final.

La **Figura 1-2** muestra la relación e influencia entre varias características de la biomasa y el producto final (biocombustible sólido). En ella se puede observar cómo el contenido del agua (humedad) es uno de los factores más importantes y cómo influye en otras propiedades [36].

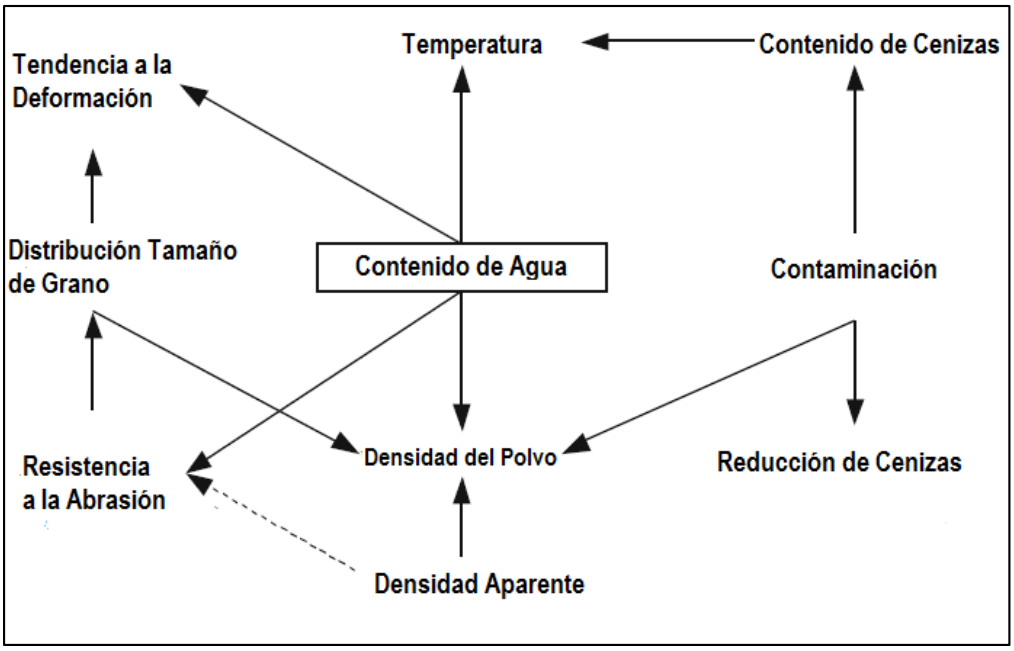

Figura 1-2. Interacciones de las características físicas/mecánicas del combustible y las características químicas de la biomasa [37]. Adaptado de Döring, 2013.

Características como la densidad, humedad, resistencia a la abrasión, temperatura, tamaño de grano y contenido de cenizas, están conectadas entre sí, dependiendo una de la otra. Razón por la cual es necesario tener en cuenta estos parámetros, los cuales deben asegurar que el biocombustible sólido obtenido ayuda a reducir los niveles de contaminación.

A continuación se presentan en la **Tabla 1-5** algunos de los parámetros más relevantes de los pellets y sus posibles efectos si no se controlan.

Tabla 1-5. Composición y Características Cualitativas de los Pellets de Biomasa y sus efectos en la Combustión [37]. Adaptado de Döring, 2013.

Parámetros	Efectos
Características físicas/mecánicas del combustible	

Parámetros	Efectos
Número/tamaño de las piezas del combustible (dimensiones, geometría)	Correlación con sistemas mecánicos (sistemas de transporte) y tipos de sistemas de combustión; inflamabilidad, tiempo de agotamiento.
Partícula y fibra	Número/tamaño de las piezas, molienda (selección y diseño del sistema de molienda para la peletización y alimentación en la cámara de combustión).
Tamaño/finura	Homogeneidad del combustible, tendencia a la deformación, daños en los sistemas de transporte (bandas transportadoras), continuidad operacional, características de la combustión, producción de polvo, riesgo de explosión.
Resistencia al desgaste	Características del transporte, riesgo de deformación, producción de polvo y pérdidas en el trasporte.
Densidad de almacenamiento (densidad aparente/densidad de apilamiento)	Selección, dimensionamiento y complejidades del almacenamiento, transporte, tecnología de trasporte y de los contenedores de almacenamiento.
Densidad (densidad de partícula)	Densidad de almacenamiento, selección y dimensión de los sistemas de transporte; características específicas de la fuente de energía (conductividad térmica específica, tiempo de combustión/tasa de desgasificación, etc.)
Características químicas del combustible	
Contenido de agua	Requisitos para el secado del combustible; capacidad de almacenamiento (crecimiento de hongos, pérdidas en el almacenamiento). Para el combustible; riesgo de auto inflamación, poder calorífico, temperatura de combustión, tiempo de combustión.

Parámetros	Efectos
Poder calorífico	Contenido de energía del combustible; dimensionamiento del sistema de calefacción.
Componentes volátiles	Descomposición térmica, características de la combustión, inflamabilidad del combustible.
Contenido de cenizas	Emisiones de partículas (polvo), dimensionamiento del sistema de calefacción, ceniza generada, utilización y disposición de la ceniza.
Carbón (C)	Contenido de energía del combustible, aire requerido para la combustión.
Hidrógeno (H)	
Oxígeno (O)	Composición de los productos de conversión (producto/gas residual) y ceniza.
Nitrógeno (N)	Emisiones de gases residuales (NO_X, NO_2, NH_3).
Azufre (S)	Emisiones de gases residuales (SO_X, SO_2, SO_3/H_2SO_4), formación de aerosoles (polvo fino), mayor riesgo de corrosión.
Cloro (Cl)	Reacción con metales alcalinos.
Fósforo (P)	Incorporación de contaminantes en la utilización de cenizas (como fertilizantes).

1.7.2 Dimensiones del pellet

Es importante diferenciar un pellet de una briqueta, debido a que muchas veces se pueden confundir estos dos combustibles sólidos. En el caso del pellet hecho de biomasa diferente a la madera, su diámetro no debe superar los 0,025 m, siendo los más habituales entre 0,006 y 0,022 m. De la misma forma, la longitud también es variable, entre 0,035 y 0,5 m según la norma EN14961-1. En cuanto a las briquetas, estas tienen un diámetro ≥0,025 m [37].

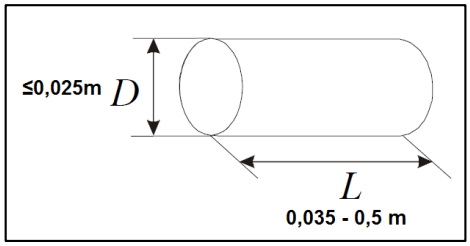

Figura 1-3. Dimensiones de los pellets según la EN14961-1.

1.7.3 Humedad

La humedad es quizás uno de los parámetros más importantes en la elaboración de los pellets [38]. De ella dependen características como el poder calorífico del biocombustible, la estructura del pellet, su resistencia a la deformación, la aglomeración de la biomasa, entre otras propiedades. La humedad de la biomasa se debe controlar en dos momentos del proceso, cada uno dependiente de la otra. La primera etapa es la humedad inicial de la biomasa, es decir, la cantidad de agua que tiene la materia prima en el momento de su recolección. Materias primas como la borra de café contienen un porcentaje de humedad de aproximadamente 70%, razón por la cual es necesario secarla hasta obtener un porcentaje apropiado para la elaboración de los pellets. En la segunda etapa, el proceso de peletizado, es necesario controlar nuevamente la humedad puesto que también se deben considerar pérdidas de agua al momento de utilizar la maquina peletizadora, la cual ha sido precalentada previamente a una temperatura recomendada por el fabricante.

Se recomienda adecuar la biomasa a utilizar, de tal manera que después de un proceso de secado, esta tenga un porcentaje de humedad entre el 8-12% [37]. Esto con el fin de poder utilizar la misma en el proceso de compactación. Está demostrado por estudios previos que en algunas ocasiones el agua actúa como agente aglomerante y lubricante, evitando el uso de otros agentes aglomerantes [32].

Existen ventajas y desventajas de un bajo o alto contenido de agua. Cuando el contenido es muy bajo, es posible que el biocombustible empiece a captar humedad del ambiente, favoreciendo al crecimiento de hongos o debilitamiento del material. Por otro lado, también se tienen ventajas respecto a la conversión termoquímica, puesto que a un valor muy bajo se tendrá mayor energía utilizable del combustible. Si por el contrario el contenido de humedad es muy alto se requiere mayor energía, primero para adecuar la biomasa y segundo, disminuye el poder calorífico del biocombustible en el momento de la combustión.

En cualquiera de los dos casos, un porcentaje de humedad muy alto o muy bajo genera deformación del pellet; cuando la humedad es demasiado alta, la dureza del pellet disminuye y se deforma, cuando por el contrario si es muy baja, las partículas de la biomasa no se adhieren entre sí porque no hay suficiente humedad que actúe como aglomerante, motivo por el cual es indispensable determinar un rango apropiado de humedad dependiendo de la materia prima.

1.7.4 Temperatura de peletización

Este parámetro hace referencia a la temperatura de la chaqueta que recubre la recámara donde es alimentada la biomasa, permitiendo el incremento de la temperatura de la borra de café, en este caso. Algunos autores reportan un efecto significativo en el aumento de la temperatura de la máquina peletizadora [39]. Es decir, a mayor temperatura, componentes como la lignina sufren cambios estructurales que permiten aglomerar la biomasa. Adicionalmente se produce un aumento de la temperatura por el roce entre las partículas debido a la presión ejercida por la máquina.

Se tienen reportes en donde la temperatura de peletización es 90°C y la mayoría de los autores reportan que se obtienen pellets de mejor calidad a temperaturas mayores de 60°C, sin importar el tipo de biomasa [32].

1.7.5 Presión de peletización

La presión de peletización es un parámetro importante debido a que de ella depende la densidad a granel de los pellets, después de facilitar la aglomeración de las partículas de la biomasa (borra de café). La presión que influye en el proceso de peletización es la ejercida por el émbolo en el momento de empujar la biomasa a través de la recámara de alimentación (**Figura 3-1**). Algunos autores reportan presiones de peletización entre 5MPa y 800MPa para diferentes tipos de biomasa [32].

1.7.6 Tamaño de partícula

El tamaño de partícula determina los espacios libres entre las partículas que forman el pellet, así mismo, su durabilidad y resistencia mecánica. Cuando el tamaño de partícula es menor, el área superficial aumenta, facilitando la densificación [11]. Las partículas grandes son un punto de fractura del material. El tamaño de los granos debe tener un diámetro

medio, determinado en procesos de adecuación previos de la biomasa, como lo es la molienda y tamizado. El intervalo de tamaño recomendado oscilan entre 0,5 – 0,7 mm [40].

1.7.7 Dureza

La dureza es la carga máxima que un pellet puede soportar antes de romperse o fracturarse [40]. Esta se mide a través de una prueba por compresión diametral, esta consiste en un solo pellet ubicado entre dos superficies planas, con un área mayor a la del producto a analizar. Posteriormente se aplica una fuerza constante, a una distancia determinada, según el equipo y modelo a utilizar. Los parámetros de la prueba dependen del tipo de material a estudiar y su uso final [40], sin embargo, esta prueba se puede adaptar de las normas ASTM E4 y DIN 512.

1.7.8 Aglomerantes

Algunas materias primas tienen en su composición sustancias que actúan como aglomerantes mediante fuerzas químicas y físicas. Por otro lado, el agua presente en ciertas biomasas es suficiente para lograr la compactación. Las fuerzas que se aplican en la densificación de biomasa se dividen en cinco grupos: (I) puentes de hidrógeno, (II) fuerzas de atracción entre partículas sólidas, (III) enlaces mecánicos, (IV) fuerzas de adhesión y cohesión y (V) fuerzas interfaciales y presión capilar [40]. Los aglomerantes utilizan estas fuerzas para adherir las partículas y así dar resistencia al material.

La selección del aglomerante depende de la compatibilidad de los materiales a ser aglomerados y su uso final. Además de ser sustancias que ayuden a garantizar que el producto final sea comparable con la normatividad alemana, austriaca y estadounidense, según las reportadas en este trabajo (**Tabla 1-6**). Existen diferentes tipos de aglomerantes, clasificados en orgánicos e inorgánicos; entre los más comunes están: almidones, azucares, cemento, bitumen, brea o alquitrán, arcillas, miel, melaza, etc., [32].

Para la selección de los aglomerantes utilizados en este proyecto se realizó una revisión bibliográfica de aquellos productos que además de ser compatibles con la borra de café, también ayudaran en el incremento del poder calorífico de los pellets obtenidos, puesto que su uso final es la combustión. Adicionalmente, se quiso utilizar un aglomerante que fuese un residuo industrial o una materia prima de bajo costo.

Finalmente se seleccionaron los siguientes aglomerantes:

- *Aceite crudo de palma:* Este aceite es extraído mecánicamente del fruto de la palma africana. Es de color rojo debido a su alta concentración de carotenos. Sus principales usos son alimenticios, aunque también es utilizado en la industria cosmética, en la producción de biocombustibles, productos oleoquímicos, entre otros [14]. Además tiene un bajo costo en el mercado de $1.968 por kilogramo de aceite crudo de palma [17] .
- *Biodiesel:* Es un biocombustible obtenido de la reacción de un ácido graso vegetal o animal, con un alcohol (etanol o metanol). Usualmente es mezclado con el diésel de petróleo para obtener una mayor eficiencia energética [13].
- *Glicerina:* Es un compuesto obtenido de la industria oleoquímica. Es producida mediante la transesterificación con metanol para producir esteres metílicos o a través de la hidrolisis de grasas y aceites. Es una sustancia con propiedades químicas y físicas únicas. Se han obtenido más de 1.500 usos, entre cosméticos, alimenticios, energéticos y farmacéuticos, convirtiéndose en un producto con exceso de oferta y precios bajos [41].

1.8 Normatividad de pellets

La normatividad aplicable para los pellets depende del uso final, del país donde se producen o exportan y del tipo de biomasa. Los mayores países productores de pellets tienen sus propias normas, bajo las cuales se rigen otros países como Colombia, cuya normatividad no es tan clara respecto a la producción y comercialización de biocombustibles sólidos elaborados con biomasas diferentes a la madera [42].

Algunas de las normas existentes a nivel mundial son [32]:

- Pellet Fuel Institute (PFI) [USA].
- European Common Standard for Solid Fuel (CEN) (CEN/TC 335) [Europa].
- ÖNORM 7135, Compressed wood or com – pressed bark in natural state – pellets and briquettes [Austria].
- Pellsam [Suecia].
- DIN 51731 (Testing of solid fuels – compressed untreated wood) [Alemania].

- SN 166000 (Testing of solid fuel – compressed untreated wood) [Suiza].

En la **Tabla 1-6** se puede observar una comparación entre algunas de las normas más importantes. La mayoría hacen referencia al uso final de los pellets como combustible sólido para combustión [32].

Tabla 1-6. Principales normas europeas para la elaboración de pellets y briquetas [43, 44].

Norma	**Austria ÖNORM M7135**	**Suecia SS 18 71 20**			**Alemania DIN 51731**	**Estados Unidos ASTM**
División		G1	G2	G3		
Diámetro (mm)	4-20	< 4	< 5	< 6		
Longitud (mm)	< 100					
Densidad a granel (Kg/m3)		> 600	> 500	> 500		
Finos (%)		< 0,8	< 1,5	< 1,5		
Contenido de humedad (%)	< 12	< 10	< 10	< 12	< 12	1,29-21,66
Contenido de cenizas (%)	< 0,5	< 0,7	< 1,5	< 1,5	< 1,5	2,93-16,73
Poder calorífico (MJ/Kg)	> 18	> 16,9	> 16,9	> 16,9	17,5-19,5	21,86 – 27,68
Azufre (%)	< 0,04	< 0,08	< 0,08		< 0,08	
Nitrógeno (%)	< 0,3				< 0,3	
Cloro (%)	< 0,02	< 0,03	< 0,03		< 0,03	
Arsénico (mg/Kg)					< 0,8	
Cadmio (mg/Kg)					< 0,5	
Cromo (mg/Kg)					< 8	
Cobre (mg/Kg)					< 5	
Mercurio (mg/Kg)					< 0,05	
Plomo (mg/Kg)					< 10	
Zinc (mg/Kg)					< 100	
Finos antes de entrega al cliente	<1				< 1	
Aditivos	<2	Registrar	Registrar	Registrar		

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Estudiar el proceso de peletización de la borra de café para la producción de biocombustibles sólidos.

2.1.1 Objetivos específicos

- Caracterización de diferentes tipos de borra con miras a su aprovechamiento energético.
- Determinación del efecto de la humedad de la borra de café sobre la elaboración de pellets.
- Estudio de los cambios en las propiedades físicas y químicas de los pellets debido al uso de aglomerantes.
- Determinación de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los pellets obtenidos como producto final, para ser comparados con productos comerciales.

3. Metodología de la peletización

Este capítulo presenta las etapas de la elaboración de pellets de borra de café, desde la caracterización inicial de la biomasa, hasta la caracterización final del producto terminado (pellet).

Debido a que las propiedades de la biomasa cambian según el lugar de origen, se tomaron tres muestras (15 Kg en total), cada muestra procedente de tres de las tiendas de café más populares en Colombia. Para el tratamiento de los datos, cada muestra recolectada se llamará Borra 1, Borra 2, y Borra 3, procedentes de las tiendas Juan Valdez ®, Starbucks ® y Oma ®, respectivamente. De estas muestras de borra, se seleccionó una, la cual cumpliera con tres criterios de selección; humedad, cenizas y poder calorífico. De acuerdo a los resultados obtenidos, se escogió la borra de café con parámetros más cercanos a lo exigidos por la normatividad austriaca, alemana y estadounidense. Con la muestra seleccionada, se realizaron las siguientes pruebas.

3.1 Caracterización materias primas

Con el fin de identificar los componentes químicos de la biomasa (borra de café) y establecer el potencial energético de la misma, se realizó un análisis próximo y último a las muestras de biomasa recolectadas.

3.1.1 Análisis próximo

Este análisis está compuesto por tres pruebas: contenido de cenizas, contenido de humedad y materia volátil.

- *Contenido de cenizas:* Las cenizas son compuestos inorgánicos que pueden actuar como catalizadores propiciando las reacciones químicas en procesos termoquímicos [45]. Se determinan mediante la norma ASTM D-482. La muestra

es colocada en una capsula de porcelana dentro de una mufla a 775 ± 25 °C, durante 30 min. Posteriormente se deja enfriar la muestra en un desecador durante 24 h. Se registra el peso de la muestra antes y después del calentamiento, en una balanza con una precisión de 0,1 mg. Finalmente se utiliza la **Ecuación (3.1)** para determinar el contenido de cenizas en base seca.

$$\% \, Cenizas = \frac{m_f}{m_i} * 100 \, \% \quad (3\text{-}1)$$

Dónde:

mf = Masa final de la muestra (g)

mi = Masa inicial de la muestra (g)

- *Contenido de humedad:* La humedad en la biomasa es un compuesto que no es aprovechable energéticamente, por el contrario incrementa los consumos de energía por lo que se hace necesario mantener los niveles de humedad al mínimo. Esta es medida en la *Balanza de Humedad AMB (AMB50)* con una desviación estándar de 0,1. Por cada ensayo realizado, se utilizan 0,4 g de muestra.

  Respecto al contenido de humedad de los aglomerantes, se tomaron los datos reportados por el Palmar de Guaicaramo S.A., bajo la normatividad de los biocombustibles líquidos NTC 287 [46].

3.1.2 Análisis Último

Consiste en el análisis del contenido de Carbono (C), Nitrógeno (N), Hidrógeno (H) y Oxígeno (O). A continuación se presenta el poder calorífico, el cual hace parte de uno de los parámetros que inciden en el aprovechamiento energético de la biomasa.

- **Análisis elemental.** El análisis se hace a través de un analizador elemental Flash Smart de The Thermo Scientific, disponible en el laboratorio de servicios a posgrados de química.

- **Poder calorífico.** Es el contenido de energía liberada, cuando una biomasa es quemada en el aire; este puede ser expresado de dos formas, poder calorífico superior (H_o) y poder calorífico inferior (H_s). El poder calorífico superior es la energía total liberada después de la combustión en presencia de aire, teniendo en cuenta el calor latente del vapor de agua. Este representa la máxima cantidad de energía que se puede obtener de un combustible [45]. Por otro lado, el poder calorífico inferior es la energía total liberada después de la combustión, sin incluir el calor latente contenido en el vapor de agua [45]. El poder calorífico se calcula bajo la norma ASTM D240-09.

3.1.3 Tamaño de partícula

Se determinó con el equipo analizador de tamaño de partícula LS 13 320 Laser Diffraction, disponible en el Departamento de Materiales de la Universidad Técnica de Berlín. Los tamaños de partícula se calcularon como si fuera una distribución de frecuencia, con el porcentaje de volumen (o porcentaje de área de superficie) en un canal de un tamaño determinado.

3.2 Secado de la biomasa

Debido al alto contenido de humedad presente en la borra de café recolectada (aproximadamente 60%), fue necesario implementar un protocolo de secado hasta una humedad recomendada.

Para este proyecto se realizaron pruebas de prensado en la Prensa Hidráulica Sobremesa 15 Ton Mega KSC-15A, disponible en los laboratorios de ingeniería química de la Universidad Nacional, sede Bogotá. Se logró obtener una remoción de alrededor del 10% de la humedad, para una muestra de 100 g. Debido a la poca eficiencia de este sistema, se procedió al secado de toda la borra en un horno de convección natural con aire indirecto Daihan Labtech LDO-080N. La temperatura de secado fue 80°C. Las bandejas de aluminio utilizadas, fueron llenadas con 200 g de borra cada una. Se realizó el seguimiento de la humedad y pérdida de peso de cada muestra, con el fin de obtener una curva de secado. Este seguimiento se hizo en la *Balanza de Humedad AMB (AMB50).*

3.3 Peletización

3.3.1 Maquina peletizadora

Una máquina peletizadora también es conocida como una extrusora. Consiste en un sistema que usa una gran cantidad de presión para alimentar la biomasa a través de los agujeros en la matriz metálica. Al aumentar la presión y la fricción, también aumenta la temperatura de la borra del café en este caso. Esto permite que la lignina o el aglomerante que se utilice se ablande y permita la formación del pellet [32].

Dependiendo de la biomasa, se hacen ajustes en la maquina peletizadora. Por ejemplo el tamaño de los orificios en la placa metálica y la presión aplicada. Si un troquel proporciona demasiada presión al material que se peletizará, se puede quemar. Por otra parte, si la presión es muy poca, la biomasa no se comprimirá y simplemente no pasará a través de los agujeros. Dicha presión se ajusta cambiando el tamaño de los agujeros, la conicidad o el número de orificios de la placa metálica [32].

Para la peletización de la borra de café se utilizó la máquina peletizadora disponible en el Laboratorio de Transferencia de Calor de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá; diseñada y construida en proyectos anteriores, la cual funciona como una prensa hidraúlica [47]. La peletizadora produce baches de siete pellets por corrida. La borra de café es introducida en una recámara cilíndrica (36,1 mm de diámetro y 150 mm de longitud). Posteriormente, una prensa hidráulica acciona un émbolo que extruye la biomasa a través de un dado de 7 orificios de 6 mm de diámetro. La temperatura es controlada gracias a una camisa con resistencias y un lazo de control que mantiene la temperatura constante durante los ensayos [32], sin embargo, es importante que por cada corrida se revise que el sensor de temperatura esté en la medida deseada, puesto que durante el proceso de extracción de los pellets, la camisa que envuelve la recámara de peletización pierde temperatura.

A continuación, se puede observar el diagrama general de la máquina peletizadora **Figura 3-1** y la sección transversal en la **Figura 3-2** [32].

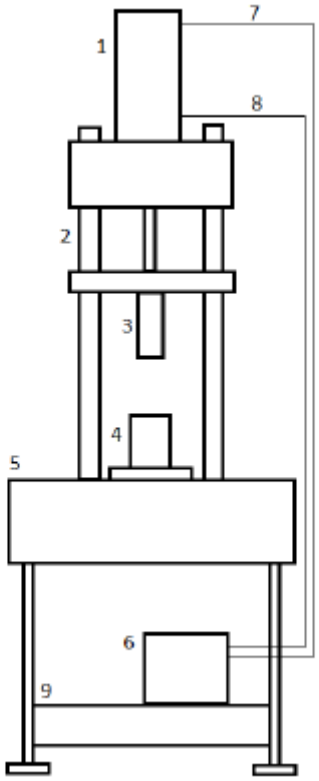

Figura 3-1. Diagrama general de la máquina peletizadora. 1) recámara con émbolo superior, 2) Columnas de apoyo, 3) émbolo, 4) camisa, 5) base, 6) sistema hidráulico, 7) entrada de aceite al émbolo superior, 8) salida de aceite al émbolo superior, 9) tanque de aceite [32].

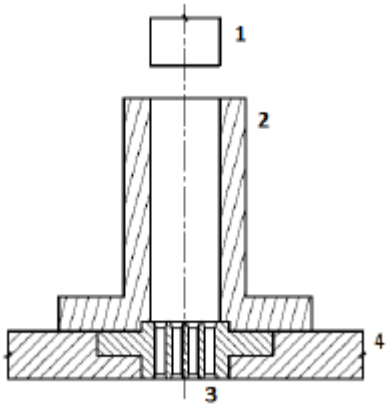

Figura 3-2. Sección transversal de la máquina peletizadora. 1) émbolo, 2) camisa, 3) dado, 4) base [32].

3.3.2 Protocolo de peletización

A continuación se describen los pasos más importantes para la peletización de un bache de pellets de borra de café.

1. Determinación del tamaño de partícula, sin embargo, debido al tamaño granular de la borra de café (apróximadamente 0,5 mm), no se tamizó la biomasa.
2. Como sistema de adquisición de datos se utilizó un arduino UNO, el cual es una plataforma electronica de código abierto, que conecta el hardware con el software. Este utiliza un lenguaje de programación Arduino y un software Arduino (IDE) [48] que registra la posición y presión del émbolo. La programación utilizada fue realizada por Zapata *et al* [32]. La posición fue medida mediante un sensor de resistencia y la presión mediante un sensor piezo eléctrico [32]. Los datos fueron registrados cada 0,25 s.
3. La temperatura de peletización fue 90 °C. Es decir, la temperatura de la chaqueta. Esta temperatura se mantuvo constante durante todo el proyecto por varias razones; cuando la temperatura es superior a 100°C se degradan algunos de los componentes de la biomasa, por otro lado, uno de aglomerantes utilizados para la peletización es biodiesel, el cual es altamente inflamable [32, 49].
4. Se alimenta la recámara de peletización con 50 g de muestra.
5. Las muestras son extraídas manualmente del dado de peletización, proceso que incrementa las posibilidades de deformación de los pellets obtenidos.
6. Finalmente los pellets se dejan enfriar a temperatura ambiente y son almacenados en recipientes de vidrio.

3.3.3 Modelo de optimización

Antes de definir un diseño de experimentos se realizaron ensayos preliminares. Debido a que se quería estudiar el efecto de la humedad y de tres aglomerantes utilizados en la formación de los pellets, era necesario definir un intervalo de concentración de los mismos.

Primero se definieron los límites superiores e inferiores de humedad, es decir, según la bibliografía los pellets se deberían formar con contenidos de humedad entre 8 – 15% [9]. Con estos referentes, se peletizó borra de café con concentraciones de humedad desde 2% hasta 20%. Se obtuvieron pellets consistentes en un intervalo entre 4-15%. Los pellets obtenidos con contenidos de humedad inferiores al 4% y mayores al 15% se deformaban

después de ser extraidos del dado de la peletizadora. Posteriormente se repitió el mismo procedimiento con cada uno de los aglomerantes (aceite crudo de palma, biodiesel y glicerina). Se probaron concentraciones de aglomerantes en un intervalo de 2-50%, por cada uno. Finalmente se concluyó que los pellets se formaban en un rango entre 2 y 8%, por encima de estos valores los pellets tenían una consistencia blanda y heterogénea. Para realizar las diferentes mezclas de biomasa – aglomerante, se pesaron 100 g de borra de café por cada una de las muestras que se iban a utilizar, estas muestras fueron mezcladas con la cantidad de aglomerante determinada, utilizando una espátula. La mezcla se hizo manualmente, en un recipiente de aluminio, hasta que la biomasa se observara homogeneizada en su totalidad por el agente aglomerante utilizado. Las cantidades se pesaron en una balanza de precision de 0,1 mg.

Después de definir los limites de los intervalos de humedad y aglomerantes, se realizó un diseño de experimentos para conocer el efecto del tipo de aglomerante, la concentración de los mismos y el contenido de humedad sobre algunas características de los pellets. Para esto se utilizó el software Minitab 17.2.1., en el cual se implementó un modelo factorial completo con 27 ensayos y tres puntos centrales.

Los parámetros utilizados en el diseño de experimentos son los presentados en la **Tabla 3-1**.

Tabla 3-1. Datos diseño de experimentos.

Factor	Nombre	Unidades	Nivel [1-A]	Nivel [2-A]	Nivel [3-A]
A	Tipo de Aglomerante	N/A	Glicerina	Aceite de palma	Biodiesel
B	Concentración Aglomerante	%	2-5-8	2-5-8	2-5-8
C	% Humedad	%	4-6-8	4-6-8	4-6-8

Con el fin de optimizar simultáneamente algunos parámetros definidos por la normatividad de los pellets, se implementó una función objetivo en la cual se combinaron los resultados de los siguientes parámetros; poder calorífico y dureza. Posteriormente, se utilizó la **Ecuación (3-3)** como respuesta al diseño de experimentos creado, la cual se empleó para su optimización. Los parámetros con mayor ponderación fueron poder calorífico y dureza, debido a que en este trabajo se consideraron como los más importantes a la hora de definir un biocombustible sólido.

$$Función\ Objetivo = (0{,}5 * DU) + (0{,}5 * H_o) \quad (3\text{-}2)$$

$\mathcal{DU}$ = Dureza normalizada

H_o = Poder calorífico superior normalizado

3.4 Caracterización de los pellets producidos

Con el fin de comprobar la calidad de los pellets obtenidos, se realizaron las siguientes pruebas basadas en las norma ASTM para posteriormente comparar los resultados con otras normas internacionales.

3.4.1 Dimensiones de los pellets obtenidos

Se tomó un promedio de los diámetros y longitudes de los pellets obtenidos y se comparó con la normatividad austriaca (ÖNORM) y alemana (DIN) para pellets. Estas dimensiones fueron medidas utilizando un pie de rey con precisión de 0.05 mm.

3.4.2 Determinación del contenido de humedad de los pellets de borra de café.

Para la determinación de la humedad de los pellets obtenidos se repitió el procedimiento mencionado en la sección 3.1.1.

3.4.3 Determinación del contenido de cenizas y temperatura final de los pellets de borra de café.

Esta medida de temperatura hace referencia a la reportada por los pellets después de ser extraídos del dado de la máquina peletizadora. La temperatura se midió con un termómetro infrarrojo modelo 42515, marca EXTECH Instruments. El termómetro hace las lecturas con un puntero láser, midiendo hasta 800 °C (Anexo A).

Para la determinación de las cenizas se repitió el procedimiento reportado en la sección 3.1.1. Para estas pruebas se utilizaron los fragmentos que algunos pellets generaron en el momento de su fabricación.

3.4.4 Poder Calorífico

Para la determinación del poder calorífico de las muestras se tomó aproximadamente 0,7 g y se repitió el procedimiento explicado en la sección 3.1.2. Por cada muestra se realizaron tres réplicas y finalmente se obtuvo un promedio.

3.4.5 Dureza

Este parámetro se puede determinar mediante diferentes pruebas de resistencia al impacto o deformación reportadas por autores como Zapata [32] o Sierra *et al* [47]. Sin embargo, para este proyecto se utilizó la texturometría como técnica de evaluación de la dureza del material (resistencia a la compresión). Para ello, se utilizó el texturómetro TA.XTPlus disponible en el instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos ICTA, el cuál funciona bajo las normas ASTM E4 y DIN 512.

Para la caracterización de los pellets se utilizó una sonda cilíndrica de aluminio de 25 mm de diámetro. Las mediciones fueron hechas bajo los parámetros del módulo de briquetas para concentrado animal. Se utilizó una carga de 5 g y compresión de 3,5 mm a una velocidad de 2 mm/s.

3.4.6 Resistencia al impacto

Es un método que mide la resistencia a la deformación después de aplicado un impacto. Esta fue medida de acuerdo a la adaptación de la norma ASTM D440-86. Consiste en dejar caer la muestra desde una altura de 1,85 m sobre una superficie plana y sólida. Posteriormente, se pesa el residuo de mayor tamaño, el cual se considera como la masa final del pellet. El cálculo de la resistencia al impacto se hace mediante la **Ecuación (3-4).**

$$RI = \frac{m_f}{m_i} * 100 \qquad (3\text{-}3)$$

mf = Masa final de la muestra (g)

mi = Masa inicial de la muestra (g)

3.4.7 Presión de peletización

La presión de peletización hace referencia a la presión con la cual la biomasa es totalmente extruida a través del dado de la máquina peletizadora, permitiendo la formación de los pellets. Esta presión es calculada con la **Ecuación (3-5)**, donde, P_e es la presión del émbolo, P_a la presión del aceite registrada por el Arduino, A_S área de la recámara superior y A_e es el área de la cara del émbolo.

$$P_e = \frac{P_a * A_S}{A_e} \tag{3-4}$$

4. Resultados

Este capítulo presenta los resultados obtenidos desde el proceso de selección de la materia prima, hasta la obtención de los pellets de borra de café. Inicialmente, se realizó la caracterización de la borra de café recolectada. Seguido a esto se escogió la borra que cumpliera con los parámetros de selección: cenizas, poder calorífico y contenido de humedad.

Gracias al diseño experimental también se pudo determinar las tres mejores muestras (A24, B24 y G24) de acuerdo a ciertos parámetros de evaluación. Las muestras fueron nombradas con esta nomenclatura en el desarrollo del proyecto, la cual consiste en una letra o vocal y dos números. La letra representa el tipo de aglomerante (A=Aceite, B=Biodiesel y G=Glicerina) y los números la concentración de aglomerante y humedad respectivamente. En el caso de la muestra A24, se tiene un pellet elaborado con un contenido de humedad del 4% y una concentración del 2% de aceite de palma. La muestra B24 fue elaborada con un contenido de humedad del 4% y 2% de biodiesel como aglomerante. Finalmente, la muestra G24 corresponde a los pellets elaborados con un contenido de humedad del 4% y 2% de glicerina.

4.1 Caracterización de materias primas

En la **Tabla 4-1** se observa la caracterización de las tres materias primas empleadas, así como de los aglomerantes (aceite crudo de palma, biodiesel y glicerina).

Tabla 4-1. Resultados de la caracterización experimental de las materias primas.

	Humedad[1] (%)	**Cenizas[2] (%)**	**Poder Calorífico[3] (MJ/kg)**
Biomasa	***w***	**a**	**H_u**
Borra 1	69,44	2,84	21,64

Borra 2	61,39	1,30	22,51
Borra 3	58,90	1,99	23,08
Aceite crudo de palma	0,5	-	39,19
Biodiesel	0,04	-	39,50
Glicerina	0,4	-	17,90

[1] El contenido de humedad reportado hace referencia a la humedad de la biomasa después de ser recolectada en las tiendas de café soluble. Es decir, la biomasa que usualmente es recogida por la empresa recolectora de residuos sólidos de la ciudad. En el caso de las sustancias liquidas, hace referencia al contenido de agua.
[2] Contenido de cenizas en base seca.
[3] Poder calorífico superior determinado en base seca.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se definió la **Borra 3** como la más apropiada para la elaboración de los pellets, puesto que cumple con algunos de los criterios de selección, siendo el poder calorífico superior H_u el más elevado (23,08 MJ/Kg). Adicionalmente, los resultados de los otros criterios de selección no varían mucho al ser comparados, razón por la cual no fueron determinantes en la selección de la borra de café.

Al comparar el poder calorífico obtenido de la Borra 3, con otros resultados de biomasas utilizadas en peletización, como lo son las mencionadas en las tablas **Tabla 1-2** y **Tabla 1-3** se tiene que la borra de café tiene un poder calorífico superior, similar e incluso mayor que el de algunas biomasas ya utilizadas a nivel industrial como el cuesco de palma con un valor de 22,3 MJ/Kg, bagazo de caña con 17,9 MJ/Kg, madera de haya 18,3 MJ/Kg e incluso la cascarilla de café con un valor de 18,7 MJ/Kg [50]. Estos datos demuestran que la borra tiene un gran potencial energético.

Por otro lado, el contenido de cenizas también es importante cuando se quiere obtener un combustible sólido. De esta manera, la biomasa seleccionada es comparable con otro tipo de materias primas utilizadas en combustión; residuos como la paja de trigo tienen contenidos de cenizas de 7,9%, carbón 4,7%, *Phalaris arundinacea 5,5%,* entre otros [34]. Al tener un contenido de cenizas de 1,99% es posible reducir este valor hasta lo requerido por la norma y llegar a intervalos <1,5 como lo requiere la DIN 51731. Dependiendo del tipo de ceniza; inherente o foránea, estas pueden disminuir su concentración en los pretratamientos de la biomasa que incluyan incremento de la temperatura. Por ejemplo, algunos metales alcalinos que componen las cenizas se pueden volatilizar durante el

secado de la borra e incluso, durante la peletización [51, 52], reduciendo así la concentración de las mismas. Adicionalmente, dependiendo de la composición química de la biomasa, algunos óxidos que conforman las cenizas pueden reaccionar entre sí e incluso se puede presentar la fragmentación de partículas con estos compuestos por choque térmico, evaporándose antes de convertirse en cenizas [51, 52].

Respecto al uso de aglomerantes, dependiendo del tipo de biomasa que se peletizará, se selecciona un aglomerante apropiado, que además de ser compatible química y físicamente, también tenga buenas propiedades energéticas. Existen diferentes tipos de mezclas y proporciones, por ejemplo Barbanera *et al* [53] estudiaron el uso de cascarilla de oliva, mezclada con los residuos de la cosecha del árbol de olivo. En este caso, se aprovechó el aceite de oliva residual presente en la cascarilla como aglomerante. Garcia *et al* [54] utilizó glicerina como aglomerante, en concentraciones de 10, 20 y 30%, para la peletización de aserrín de pino. En este proyecto se seleccionaron tres aglomerantes con un poder calorífico alto, el cual varía entre 17 y 40 MJ/Kg. Dos de ellos son aceites, los cuales ya han sido usados en trabajos previos como lo reporta *Wattana et al* [55], quien hizo pellets con los residuos de los árboles de caucho, utilizando aceite de palma como aglomerante.

El aceite crudo de palma fue extraído por la plantación de palma Guaicaramo, ubicada en el municipio de Barranca de Upía, Meta. Dentro de sus especificaciones se encuentran un contenido de humedad del 0,5%, un índice de yodo entre 54-56 g I_2/100 g y un punto de fusión entre 35 - 39 °C.

El biodiesel fue obtenido en un proyecto de doctorado de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, a partir de soya y tenía un contenido de humedad del 0,04%.

La glicerina empleada es un producto comercial con un contenido de agua de 0,4% y una densidad relativa de 1,218 g/mL. No se utilizó glicerina cruda debido al alto contenido de contaminantes, además de un alto porcentaje de humedad que oscila entre 5 – 20% y un contenido de cenizas entre 2 – 5% [41, 56, 57]. Para información complementaria sobre las especificaciones de los aglomerantes consultar el Anexo C.

4.1.1 Determinación del tamaño de partícula de la borra de café

La distribución de tamaño de partícula para las borras empleadas se muestra en la **Figura 4-1**. Se encontró una media de 0,37 mm para la Borra 1. La Borra 2 no presenta una distribución normal del tamaño de las partículas, con tamaños entre 0,1 y 1,8 mm. Por otro lado, la Borra 3 y la que se utilizó en este proyecto, tiene un tamaño medio de 0,34 mm.

Para la Borra 3 se espera que los pellets hechos con ella tengan una mayor resistencia, puesto que autores como Franke y Rey [58] afirman que pellets hechos con tamaños de particula mayores a 1 mm presentan puntos de quiebre estructurales en estas partículas.. Además, debido a un tamaño de partícula <1 mm, no es necesario tamizar la biomasa, disminuyendo costos de producción y pretratamiento [59].

El tamaño de partícula influye en la calidad y densidad de los pellets, contribuyendo significativamente a la resistencia de los mismos. Durante la peletización, las primeras capas de partículas que tienen contacto con el émbolo, hacen que las siguientes interactúen entre sí, haciendo que se llenen los espacios entre las partículas del material.

Cuando se tienen tamaños pequeños, como los obtenidos en la **Figura 4-1**, se genera mayor resistencia debido a la ausencia de estos espacios interpartículas. Cuando los tamaños de partícula son mayores a 1 mm, se afecta la resistencia al flujo de la biomasa y por ende la peletización [60]. Incluso, autores como Zapata [32] y Rezaei *et al* [61], determinaron que a tamaños de grano mayores a 0,5 mm no hay un flujo constante de la biomasa a través de la recámara [32], haciendo que sea necesario incrementar la temperatura de peletización y a su vez la presión del émbolo. Además, Zapata [32] y Rezaei *et al* [61] también utilizaron concentraciones similares de agua en sus biomasas (cuesco de palma y astillas de pino), cuyos tamaños de partícula también fuerón tamizados hasta el mismo tamaño de la borra de café, haciendo comparables estos trabajos.

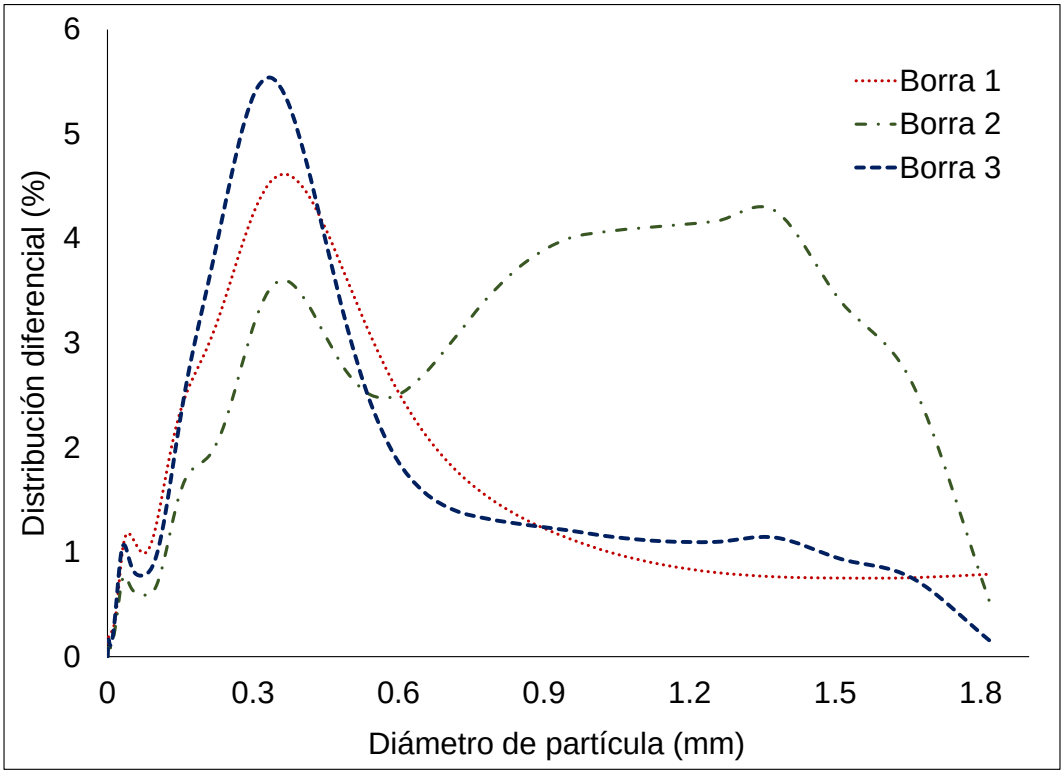

Figura 4-1. Distribución del diámetro de partícula de la borra de café.

Del tamaño de particula de la biomasa a peletizar dependen otros factores como el adecuamiento de los equipos en los cuales se realizará el proceso. Por ejemplo, cuando se tienen dados con diámetros de pellets menores a 5 mm, la biomasa tendrá mayor resistencia al flujo a través de estos, provocando el atascamiento de la prensa y por ende un mayor consumo energético [62], aunque en nuestro caso no es pertinente puesto que el dado que se utilizó tiene orificios con un diámetro aproximado de 6 mm. Sin embargo, cuando se emplearon altas concentraciones de humedad y aglomerante, se observó cómo las partículas de borra se adherían a las paredes de la recámara de alimentación y no permitian que se llenara de manera uniforme y rápida. En este caso, era necesario utilizar una espátula para hacer fluir la biomasa y redistribuirla en la recámara, lo que ocasiona dificultades operacionales que fueron un factor más a considerar para eliminar estas concentraciones en las pruebas posteriores.

Por otro lado, Zapata [32] reporta una interacción entre el tamaño de partícula o grano, con el contenido de humedad de la muestra y la temperatura a la cual se hace la peletización. Según este trabajo, por un lado, la humedad actua como aglomerante de las particulas de café y la temperatura ayuda a la deformación de los polímeros que constituyen la borra,

facilitando el flujo de la biomasa a traves de los canales del dado. Efecto que se pudo observar después de un tiempo de residencia mayor a dos minutos de la borra de café dentro la recámara de alimentación a una temperatura de 90°C. La borra fluía de manera mas rápida y era mucho mas fácil de añadirla a la peletizadora.

Autores como Serrano *et al.* [63] y Ishii *et al.* [64] reportan que el tamaño de particula tambien se ve afectado por la temperatura de peletizacion puesto que la biomasa tiene en su composicion lignina. La lignina tiene una temperatura de transición vítrea entre 100 – 200 °C, la cual es afectada por el contenido de humedad. A mayor humedad, menor es la temperatura de transición vitrea de la lignina [65, 66]. En este proyecto se utilizó una temperatura de peletización de 90°C, razón por la cual es posible que hayan sido afectados componentes como la lignina presente en la biomasa, cuya concentración es aproximadamente del 28% como se reporta en la **Tabla 1-5**, ademas de tener diferentes concentraciones de humedad, las cuales pudieron haber disminuido la temperatura de transición vítrea. Al modificarse este factor, tambien se vieron afectados otros parámetros como la dureza del pellet y el poder calorífico del mismo, resultados que se presentarán en las siguientes secciones.

4.2 Secado de la borra de café

Como se mencionó anteriormente, el contenido de humedad de la borra de café es determinante para la elaboración de los pellets, razón por la cual fue necesario realizar varias pruebas de secado a diferentes temperaturas, ya que la borra recolectada tenía un porcentaje de humedad de 58,9%, lo cual era una desventaja para el desarrollo del proyecto. Se realizaron curvas de secado a 80, 90 y 100°C, obteniéndose una pérdida de masa proporcional al incremento de temperatura. Finalmente, se determinó que una muestra de borra de café de 5 g, requiere 59 min, a 100°C para secarse hasta una humedad de 1,38% y una masa final de 2,05 g. A 90°C se requieren 62 min para secarse hasta una humedad de 1,89% y una masa de 2,20 g. A 80°C son necesarios 80 min para obtener una humedad de 1% y una masa final de borra de 2,04 g, como se observa en la **Figura 4-2**.

También se quiso comparar el tiempo de secado a diferentes temperaturas y se obtuvo por ejemplo, que cuando la borra tenía un 50% de humedad, la muestra secada a 100°C

requirió 33 min, a 90°C 36 min y finalmente 52 min para el secado a 80°C, demostrando que el tiempo de secado si difiere entre sí a diferentes temperaturas.

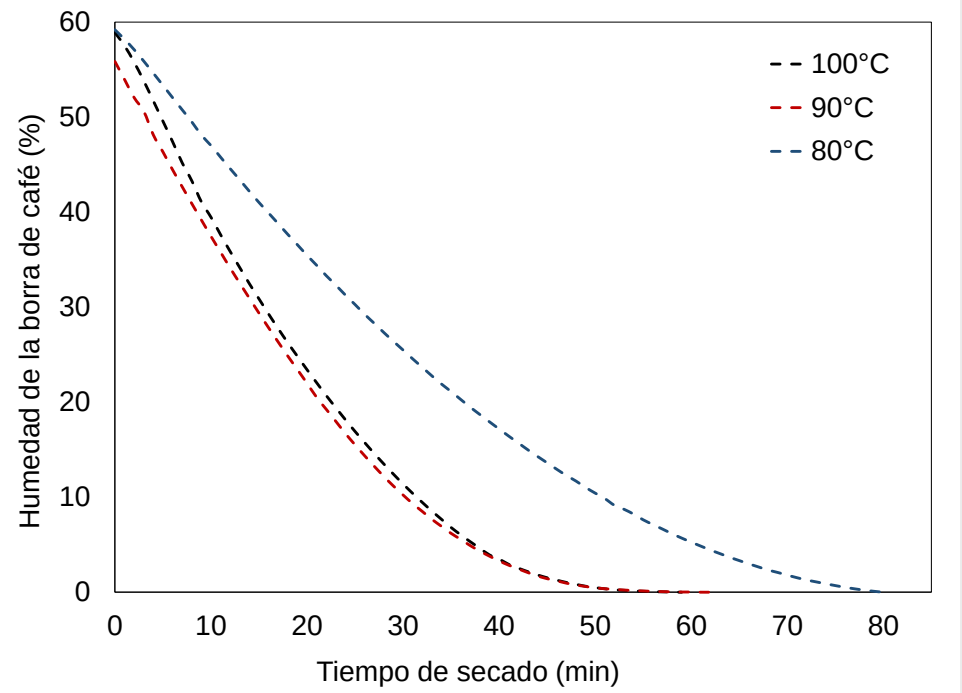

Figura 4-2. Curva de secado de la borra de café.

Para la adecuación de la borra antes del secado fue necesario distribuir la muestra en un recipiente de vidrio con el mismo espesor de biomasa, de tal manera que se pudiera obtener uniformidad en el desarrollo del proceso. Posteriormente, se seleccionó un intervalo de temperatura entre 80 y 100°C debido a que varios de los componentes de la borra de café; entre ellos la lignina, tienen propiedades químicas que por encima de 100°C son desnaturalizadas y por debajo de los 80°C el proceso se torna ineficiente energéticamente [67, 68].

En la **Figura 4-3** se puede observar como la borra de café pierde masa a medida que aumenta el tiempo de secado. Cuando se realizó el secado a 90 y 100°C, se obtuvo que la humedad superficial se removía aproximadamente hasta los 25 min, con una pérdida de masa de 2,1 g. La humedad no ligada se evapora entre los 6 y 55 min del secado, con una pérdida de masa de 2,06 g. Finalmente, la humedad ligada se empieza a eliminar aproximadamente en los minutos 60 y 80 respectivamente [69]. En el caso de la curva de secado a 80°C, se obtuvo un comportamiento diferente. El secado se realizó de una manera constante y lenta durante 80 min, donde se puede evidenciar que

aproximadamente hasta los 10 min de secado, se removió la humedad superficial de la borra de café. Mientras que durante los minutos 11 y 80 min se evaporó la humedad no ligada y ligada. Esta suposición se hace debido a que se espera que la humedad superficial presente como líquido, ejerza su presión de vapor completa y se evapore rápidamente, mientras que la humedad no ligada es aquella que está libre en contacto con el aire saturado, haciendo que la borra se comporte como un sólido higroscópico y que la velocidad de secado se mantenga constante [69, 70]. Sin embargo, se determinó que la biomasa lograba el equilibrio de la humedad después de 80 min a 80°C y a los 60 min para las otras temperaturas.

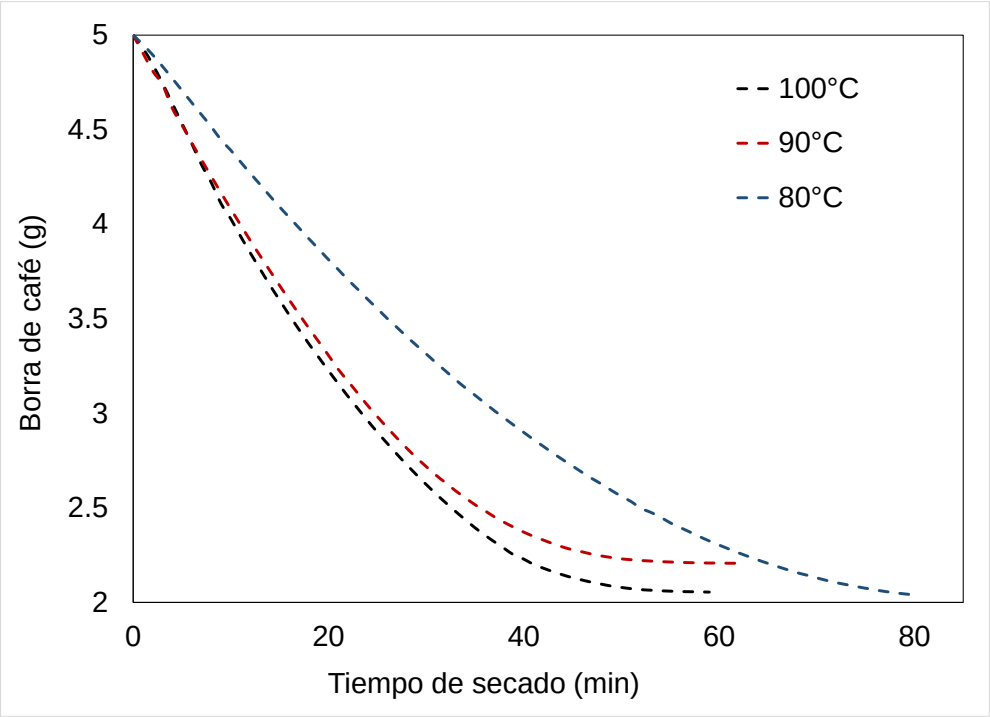

Figura 4-3. Pérdida de masa de la borra de café durante el secado.

Después de elaborar las curvas de secado, se determinó que el secado de toda la borra utilizada en el proyecto se realizaría a 80°C, con el fin de evitar alteraciones en la estructura cristalina de la biomasa [71, 72]. Por otra parte, en el caso de procesos de secado a nivel industrial, se tiene que biomasas lignocelulósicas con tamaños de partícula menores a 10 mm no deben exceder los 210°C, debido a que pueden auto inflamarse [73].

4.3 Presión de peletización

La presión de peletización es una variable independiente, sin embargo factores como el tamaño de grano de la muestra, temperatura de peletización y humedad pueden interferir en su medida. En las **Figura 4-4**, **Figura 4-5** y **Figura 4-6** presentadas a continuación se muestran las diferentes presiones de peletización requeridas por las muestras de borra de café, las cuales contenían un tipo de aglomerante diferente.

Como ya se había mencionado, la presión de peletización es afectada por otros factores del proceso. En el caso de la humedad, se presentan fenómenos de interacción molecular entre las superficies de las partículas, permitiendo no solo la aglomeración entre ellas, sino también el desplazamiento a través de la recámara de la prensa peletizadora. Adicionalmente, la temperatura de la cámara influye en la deformación de componentes como lignina, celulosa y hemicelulosa presentes en la borra, ayudando a reducir la presión necesaria para su desplazamiento [32]. Estos efectos se ven reflejados en resultados como la **Figura 4-4** donde la muestra con menor presión de peletización tiene un alto contenido de humedad del 8% y concentración del 5% de aceite de palma. Teniendo en cuenta que el punto de fusión del aceite de palma oscila entre 34 – 40°C y que la temperatura de peletización es de 90°C [74], se puede afirmar que la muestra presenta menor resistencia a la presión debido a la viscosidad del aglomerante que es aproximadamente de 30 cP a 50°C [74]. Por otro lado, en el caso de la muestra con un contenido de humedad del 8% y 8% de aceite crudo de palma, es posible que el aglomerante se haya solidificado [75], causando una mayor resistencia a la peletización o se haya presentado un fenómeno de inmiscibilidad del agua o de las cadenas de lípidos del aceite [76, 77].

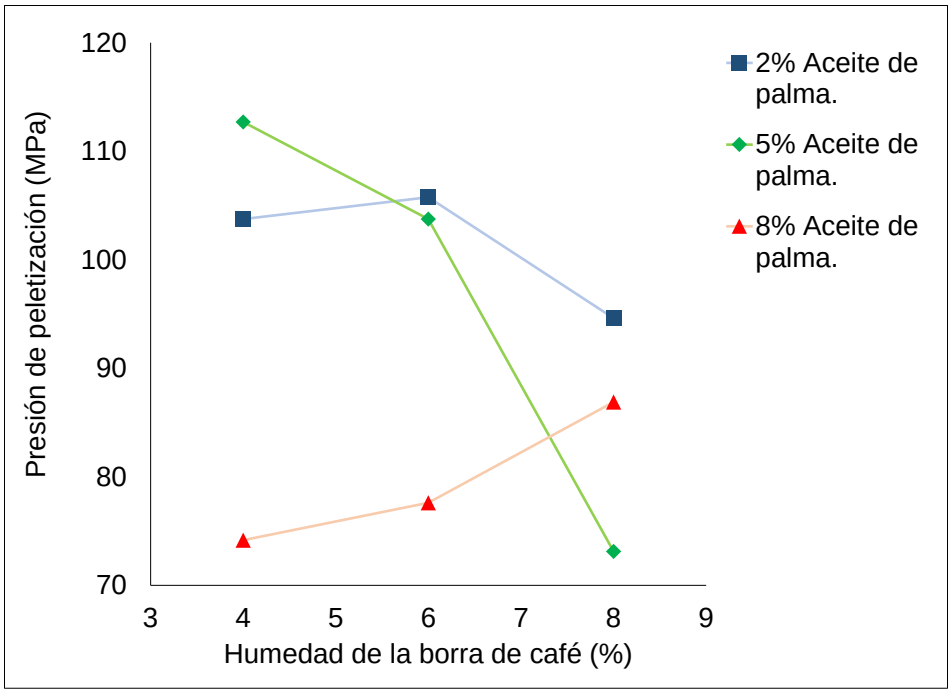

Figura 4-4. Presión de peletización de los pellets elaborados con aceite de palma como aglomerante.

Cosas tan simples como la limpieza de las partes, modifican la presión en el momento de la extrusión. Si quedan partículas de la biomasa utilizada entre el émbolo y las paredes de la recamara, la prensa se obstruirá y su recorrido será incompleto, arrojando datos inconsistentes.

Las muestras mezcladas con biodiesel arrojaron resultados similares para los pellets elaborados con bajas concentraciones de aglomerante (2 y 5%) como se observa en la **Figura 4-5**. Sin embargo es importante resaltar las muestras con mayores contenidos de biodiesel, las cuales demuestran que una mayor concentración de humedad y aglomerante hacen el pellet menos resistente y fácil de extrudir.

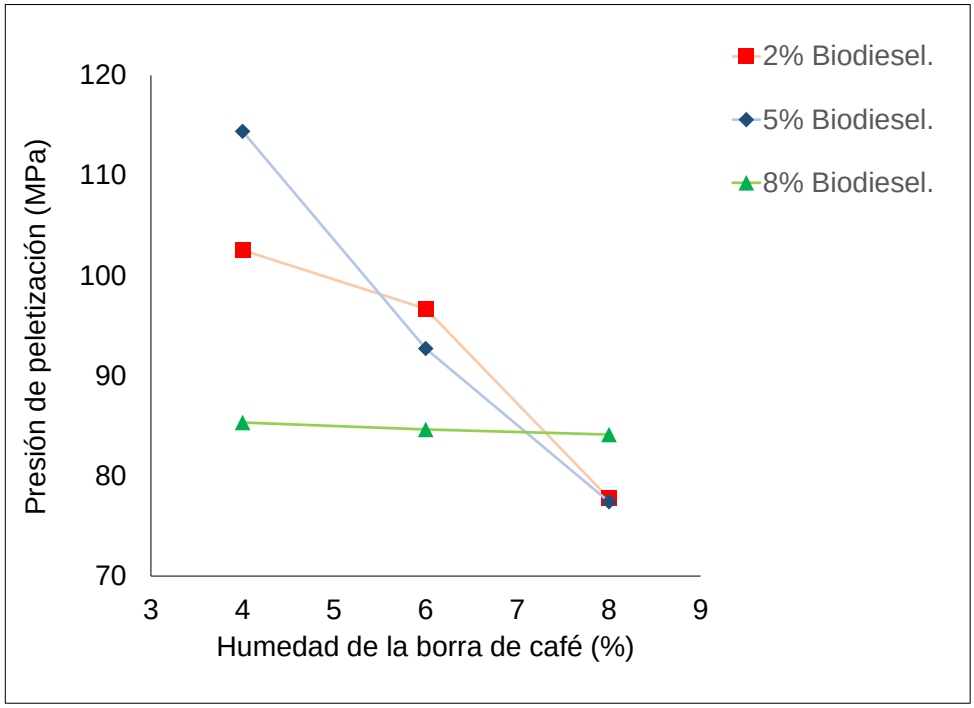

Figura 4-5. Presión de peletización de los pellets elaborados con biodiesel como aglomerante.

En el caso de las muestras con glicerina (**Figura 4-6**), se evidencia un comportamiento similar a los ensayos previos. A menor concentración de humedad y aglomerante, mayor será la presión de peletización. Esto se debe a que la biomasa presenta enlaces más fuertes debido a los puentes químicos creados por el agua y la glicerina [78]. Por otro lado, también influye la viscosidad del aglomerante que es de 15 cP a 20°C [79], la cual se puede comparar con los otros aglomerantes: 30 cP a 50°C [74] para el aceite crudo de palma y 0,02 cP para el biodiesel de soya [49].

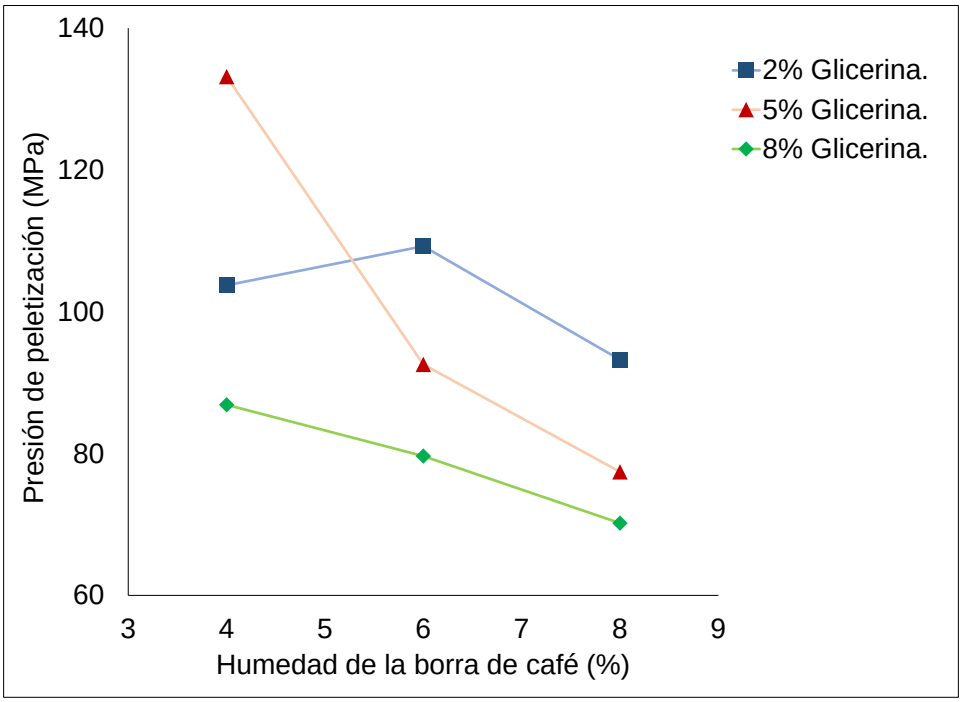

Figura 4-6. Presión de peletización de los pellets elaborados con glicerina como aglomerante.

Es posible que los pellets se hayan visto afectados por el alto contenido de humedad, debido a la formación de puentes de hidrógeno o el cambio de fase de algunos componentes como el aceite crudo de palma que se pudo tornar más duro [80]. Estos fenómenos pueden aumentar debido a la temperatura y presión de peletización. Autores como Demirbas y Yadong *et al.* recomiendan presiones de peletización desde 5 MPa, hasta 800 MPa, para biomasas lignocelulósicas [81, 82].

4.4 Modelo de optimización

Como respuesta al diseño de experimentos implementado se seleccionó una función objetivo que involucrara cuatro de los parámetros más importantes en la producción de biocombustibles solidos; poder calorífico, cenizas, humedad y dureza. Las muestras fueron nombradas con una letra y un número (A26), de tal manera que la letra A, B o G representan el tipo de aglomerante (Aceite, Biodiesel y Glicerina). El primer número representa la concentración del aglomerante en porcentaje y el segundo (6) representa el contenido de humedad en porcentaje. Los resultados obtenidos se muestran en el Anexo D.

Los valores de p 0.080 y 0.017, indicaron que el modelo ajustado y la concentración de aglomerantes son significativos, asumiendo una significancia de 95%, con un ajuste r de 78.42%.

Al realizar la optimización se determinó que la muestra de borra de café con una mayor función objetivo fue la A24; es decir, un pellet con una concentración de aceite crudo de palma como aglomerante del 2% y un contenido de humedad del 4%. Esta muestra presentó una deseabilidad del 79%, que a pesar de no ser mayor al 90%, es una respuesta significativa para el objetivo final del diseño; seleccionar los mejores pellets.

A pesar de que el tipo de aglomerante resultó ser no significativo, se seleccionaron las muestras con una deseabilidad cercana a la obtenida con el aceite de palma pero con los otros aglomerantes para la caracterización final, siendo seleccionados los pellets de glicerina y biodiesel con concentraciones de 2% de aglomerante y 4% de humedad respectivamente, con una deseabilidad del 61%.

Los resultados obtenidos en el diseño de experimentos son congruentes con los obtenidos a nivel experimental. A mayores contenidos de humedad se observó que los pellets se fragmentaban o tenían fisuras después de ser extraídos del dado de la peletizadora. La **Figura 4-7** muestra que los pellets con un contenido de humedad del 20% no tienen una homogeneidad en su estructura, además del desprendimiento de partículas de borra de café.

Figura 4-7. Pellets elaborados con una humedad del 20%.

Por el contrario, los pellets elaborados con la concentración óptima de aglomerante y humedad (A24), presentan una consistencia fuerte y apariencia uniforme como se puede observar en la **Figura 4-8**.

Figura 4-8. Pellets elaborados con una concentración de aceite de palma del 2% y un contenido de humedad del 4%.

4.5 Caracterización fisicoquímica de los pellets obtenidos

4.5.1 Dimensiones de los pellets

Después de tomar el promedio de tres replicas por pellet, se determinó que la longitud aproximada es de 25 mm y el diámetro de 5,3 mm. Estas dimensiones cumplen con la norma (**Tabla 1-6**), donde el diámetro debe estar en un intervalo entre 4 – 20 mm y la longitud debe ser menor a 100 mm.

Durante este proyecto se tuvieron inconvenientes con la extracción de los pellets después de ser elaborados, puesto que en el momento de ser extraídos del dado de peletización (**Figura 4-10**), algunos de ellos eran dañados con el impacto del martillo. Por otro lado, los extremos de los pellets removidos no eran planos y este defecto facilitaba la desintegración de las partículas del material. Efectos como estos se pueden evidenciar en la **Figura 4-9** donde se observa como la longitud del pellet no es exacta y tiene una de sus puntas imperfectas. Para evitar este tipo de anomalías en la calidad del producto final, se recomienda utilizar una lámina de corte después de obtener los pellets industrialmente, de tal manera que se pueda asegurar un tamaño constante y sin problemas de asimetría.

Figura 4-9. Longitud de un pellet promedio.

Figura 4-10. Vista frontal del dado de peletización utilizado.

4.5.2 Determinación del contenido de humedad final de los pellets obtenidos

La humedad es uno de los parámetros más importantes en la elaboración de los pellets. Esta tiene que ser controlada desde la adecuación de la materia prima, hasta la producción de los pellets. En las **Figura 4-11**, **Figura 4-12** y **Figura 4-13** se muestra la relación entre la humedad final de los pellets, la concentración de aglomerante utilizado y el contenido de humedad de la borra de café con la cual se elaboraron los pellets (8, 6 y 4%). Las muestras tuvieron un incremento de humedad significativo a medida que se aumentaba la concentración de aglomerante. Sin embargo, es importante destacar que todas las muestras también perdieron humedad cuando la concentración de aglomerante fue del

2%. A pesar del incremento o pérdida de humedad de los pellets, se obtuvo que todas las muestras cumplían con la normatividad, puesto que normas como la alemana DIN 51731 o la austriaca ÖNORM M7135, requieren un contenido de humedad <12% para combustibles sólidos.

Las humedades iniciales de la borra de café con la que se elaboraron los pellets se mantuvieron constantes en el desarrollo de este trabajo, es decir, siempre se utilizaron muestras con el mismo contenido de humedad inicial, según el diseño de experimentos (8, 6 y 4% contenido de humedad). Respecto al contenido de humedad final de los pellets, se presentan algunas variaciones; puesto que esta fue medida una semana después de elaborados. A pesar que los pellets fueron almacenados en recipientes de vidrio, de tal forma que se evitara la mayor absorción de humedad durante su almacenamiento [83], teniendo en cuenta que la humedad relativa de Bogotá oscila entre 80 – 85% [84], es muy probable que la humedad final del pellet se haya afectado durante el periodo de almacenamiento.

Como se esperaba, algunos pellets parecen haber absorbido humedad del ambiente debido a su almacenamiento y otros perdieron humedad durante el proceso de peletización. En este trabajo no se hizo un estudio de la pérdida de humedad en el proceso de peletización, razón por la cual no se tienen los gradientes de concentración desde el momento en que la borra ingresaba a la recámara de alimentación, hasta que el émbolo la extruía.

La **Figura 4-11** muestra que los pellets con mayor concentración de aceite de palma tienen un mayor contenido de humedad final. Sin embargo, los pellets elaborados con una borra de café con un contenido de humedad del 8%, presentaron un incremento de la humedad final del pellet, aun cuando la concentración del aceite de palma era bajo. Este fenómeno puede suceder por varios factores, como absorción de humedad del ambiente debido al almacenamiento de esa muestra en específico, pérdida de humedad en la peletización que se realizó a 90°C o debido a la compleja estructura molecular del aceite de palma. El aceite tiene un punto de fusión entre 34 – 40°C y una temperatura de almacenamiento entre 40 – 50°C [74]. Es probable que durante la peletización haya ocurrido un cambio en la fase del aceite crudo de palma debido a su bajo punto de fusión o durante el almacenamiento a una temperatura ambiente promedio de 14°C [84], incluso, algunos autores reportan la posibilidad de que ocurran fenómenos como histéresis [11, 69, 85]. Debido a la baja

polaridad del aceite por sus grandes cantidades de hidrocarburos de larga cadena y pocos grupos polares, este no es soluble en sustancias polares como el agua o glicerol [74], haciendo que el contenido de agua de las muestras se incremente al tener contacto con la humedad del ambiente, aprovechando su concentración inicial.

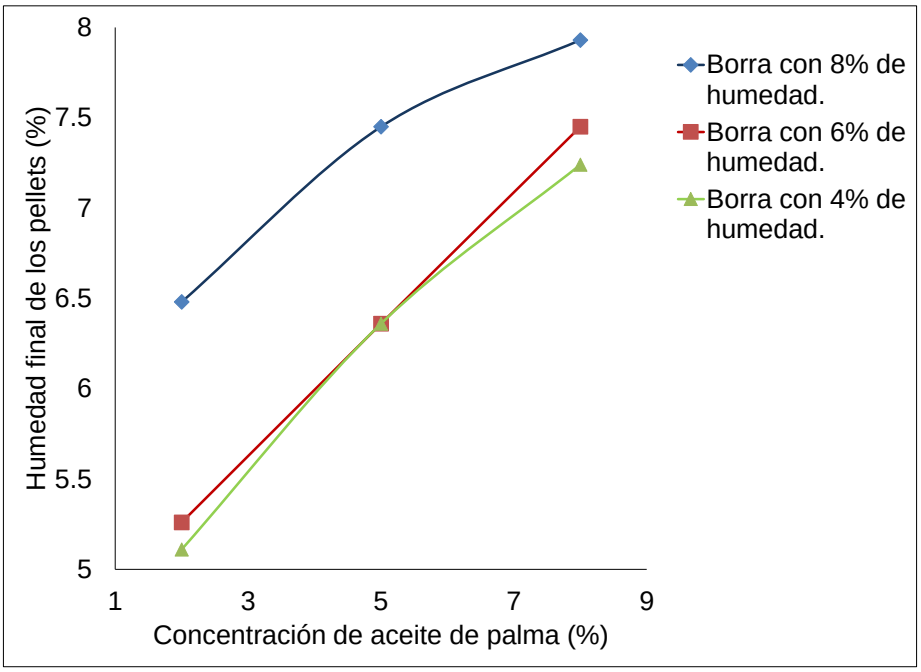

Figura 4-11. Efecto de la humedad en los pellets elaborados con aceite de palma como aglomerante.

Los pellets elaborados con biodiesel como aglomerante presentaron un comportamiento similar a los elaborados con aceite de palma. Las muestras hechas con un contenido de humedad de 8, 6 y 4% debieron haber perdido parte de ésta, al evaporarse durante la peletización. Es posible que algunas muestras hayan tenido un tiempo de residencia diferente dentro de la recámara de peletizado y por esta razón pérdidas de humedad diferentes. Sin embargo, otras muestras ganaron más humedad después de su peletización o almacenamiento, especialmente aquellas muestras con mayor cantidad de humedad inicial y concentración de aglomerante. En este caso, es posible que se hayan debilitado los enlaces de hidrogeno entre los polisacáridos presentes en la biomasa, lo cual ocurre según Mehrotra *et al*. [86] en un intervalo de temperatura de 80-120°C, contribuyendo simultáneamente con la pérdida de agua ligada, evitando a su vez la no evaporación del agua no ligada [87].

En la **Figura 4-12** se observa como los pellets elaborados con una borra de café con un contenido de humedad de 4 y 6% presentaron mayor absorción de humedad del ambiente cuando se tenía una concentración mayor de aglomerante, posiblemente porque habían más espacios intersticiales libres entre el material debido a la baja cantidad de agua, permitiendo un equilibrio con el contenido de humedad del ambiente y así mismo una mayor absorción.

En el caso de la borra de café con 8% de humedad, presentó una disminución de la humedad final del pellet y una concentración de biodiesel alta.

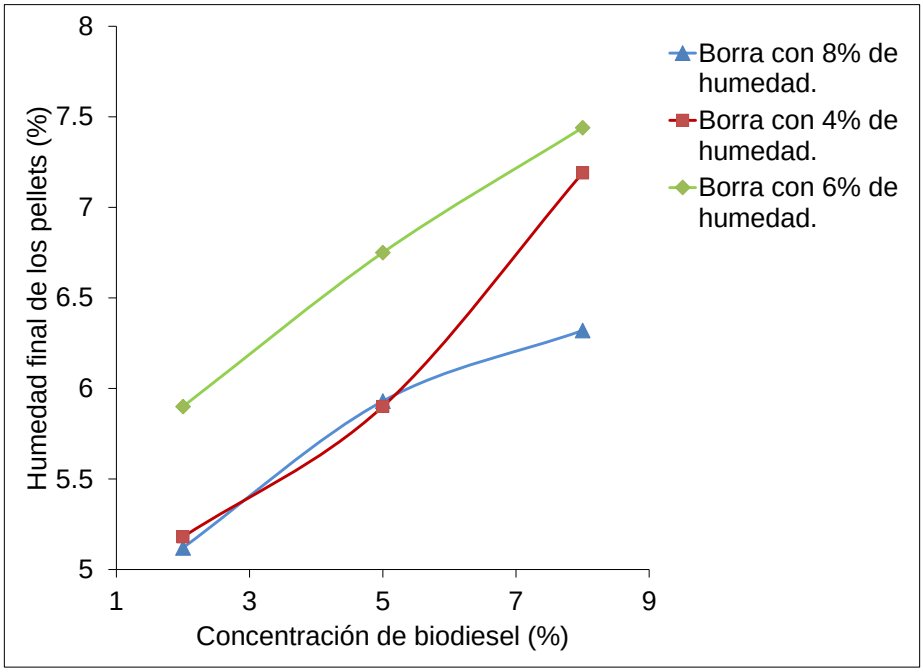

Figura 4-12. Efecto de la humedad en los pellets elaborados con biodiesel como aglomerante.

Además del tipo de aglomerante y contenido de humedad de la materia prima, también hay reportes donde el contenido de extractivos afecta la humedad final del pellet. Los extractivos son compuestos de bajo peso molecular como ácidos grasos, ceras, terpenos y esteroles, etc., algunos de los cuales hacen parte de la composición de los aglomerantes (aceite crudo de palma y biodiesel) utilizados en este proyecto. Estos crean adhesiones fuertes o débiles entre las partículas, haciendo que el material absorba o no más contenido de agua al bloquear los sitios donde se realizan los enlaces de hidrógeno [72, 88]. Sin embargo, el efecto de los aglomerantes también depende de parámetros como la

temperatura y presión de peletización, los cuales pueden modificar la composición química de los mismos [89].

Por otra parte, el efecto de los aglomerantes y la humedad también está relacionado con la porosidad del pellet y las diferentes capas estructurales que tenga el mismo [90]. Por ejemplo, Huang *et al.* [72] reportan que los pellets elaborados con alpiste como materia prima y la humedad como aglomerante, obtuvieron mayor resistencia cuando la capa superficial de los pellets tenía un contenido de humedad del 6.2% y eran sometidas a una presión mayor a 300 MPa. Siendo esta una de las posibles razones por las cuales los pellets elaborados con borra con un bajo contenido de humedad de 4 y 6%, y 8% de biodiesel, presentaron un contenido de humedad final de 7,19 y 7,44%.

En el caso de la glicerina, era de esperarse que los pellets absorbieran mayor humedad debido a la higroscopicidad de la misma [91]. En la **Figura 4-13** se evidencia como las muestras con mayor contenido de glicerina, incrementan a su vez la humedad final de los pellets. Los pellets elaborados con un contenido de humedad del 8 y 4% presentan una tendencia diferente a los elaborados con un contenido de humedad del 6%. Es posible que el agua presente en estas muestras haya sido evaporada durante la peletización. En cuanto a los pellets con mayor contenido de glicerina y humedad, es probable que la borra haya adsorbido más agua debido a la estructura de la glicerina. Cuando los grupos funcionales OH están expuestos en contacto directo con el agua, se incrementa la probabilidad de formación de nuevos enlaces de hidrógeno, aumentando así la cantidad de agua en la biomasa. Esto ocurre principalmente en biomasas con contenidos de carbono mayores a 23% [92].

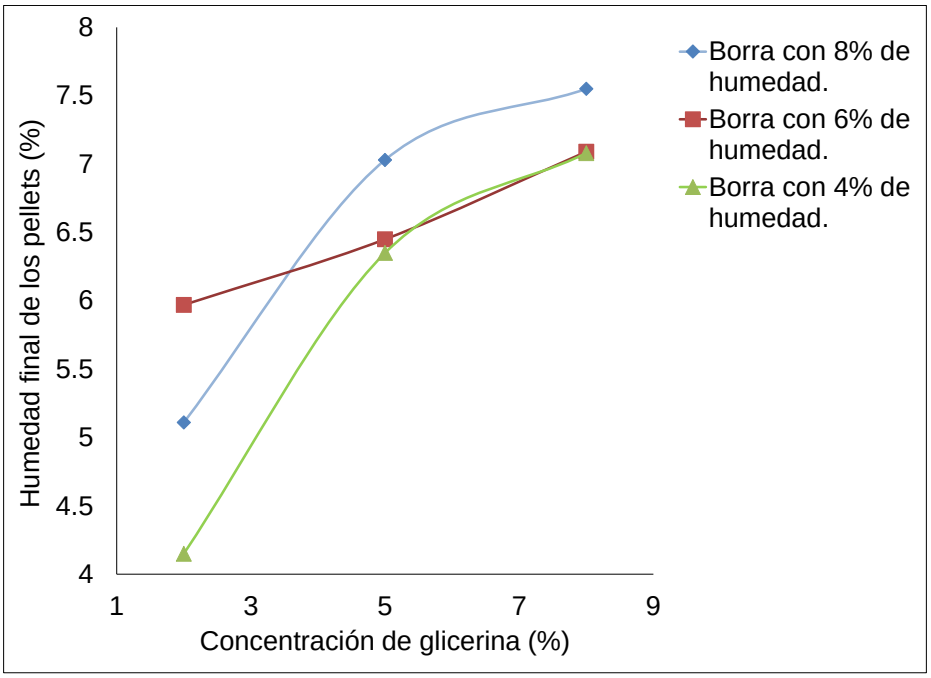

Figura 4-13. Efecto de la humedad en los pellets elaborados con glicerina como aglomerante.

Aunque se evidenció una tendencia (a mayor contenido de humedad inicial de la borra y mayor concentración de aglomerante, mayor es el contenido de humedad de los pellets) en el comportamiento de la humedad de los pellets elaborados con los tres aglomerantes (aceite crudo de palma, biodiesel y glicerina), algunos puntos experimentales no se ajustaron a dicha tendencia. En las figuras **Figura 4-11**, **Figura 4-12** y **Figura 4-13** se observó como algunas muestras que tenían mayor humedad inicial de la borra de café y mayor concentración de aglomerante, obtuvieron un mayor contenido de humedad en los pellets elaborados con estas condiciones. Sin embargo, en el caso de los pellets elaborados con una concentración de biodiesel del 8% y una borra con un contenido de humedad del 8%, no presentaron la misma tendencia que las muestras elaboradas con aceite de palma, por el contrario, la humedad final de sus pellets fue de aproximadamente 6%. Este fenómeno no se repitió con los pellets elaborados con un contenido de humedad del 4% y una concentración de biodiesel del 8%, estos pellets por el contrario incrementaron su contenido de humedad final (7%), a pesar de que la humedad de la borra con la que se elaboraron era la más baja. En el caso de la glicerina, se observó que uno de los puntos experimentales repetía el mismo comportamiento mencionado previamente cuando se elaboraron pellets con un contenido de humedad del 4%. A pesar de utilizar una concentración de glicerina del 8%, la humedad final del pellet fue cercana al 7%, saliéndose

de la tendencia de la mayoría de los puntos experimentales. Respecto a este punto, es probable que la glicerina haya tenido mayor interacción con la humedad del ambiente y por ende, absorber mayor humedad. En cuanto al biodiesel, es importante analizar fenómenos de absorción, adsorción e interacción molecular, que hayan generado al comportamiento que presentaron ciertas muestras específicas.

Por otro lado, el comportamiento de la humedad durante el pretratamiento de la biomasa y después de obtener el producto final, es decisivo para seleccionar los pellets que se comercializarán. Zapata et al [32] reporta en su trabajo humedades menores al 15 % para obtener un pellet de calidad tipo B según la clasificación de la EN 14961-2, mientras si se requiere una mayor calidad (tipo A), los pellets deben tener una humedad final por debajo del 12%. En este proyecto los pellets obtenidos con cada uno de los aglomerantes, cumplen con los estandares de calidad tipo A para la humedad. Para pellets producidos con aceite de palma como aglomerante (**Figura 4-11**), se obtuvo un porcentaje de humedad maxima de 7,93%, los elaborados con biodiesel (**Figura 4-12**) obtuvieron un 7,19% de humedad y finalmente los que contenían glicerina, llegaron a un maximo de humedad de 7.93% (**Figura 4-13**).

Es importante obtener pellets con un contenido de humedad bajo, ya que de este parámetro dependen otros como el poder calorifico y la dureza del biocombustible. Cuando se tiene una mayor concentracion de humedad, se disminuye la eficiencia de la combustion y por el contrario requiere mas energía para quemar el biocombustible sólido, ademas de favorecer el crecimiento de hongos y a su vez la pérdida de calidad del mismo [11].

4.5.3 Determinación del contenido de cenizas y temperatura final de fabricación de los pellets.

Los pellets elaborados con diferentes aglomerantes reportaron un promedio de 1,04% de contenido de cenizas y una temperatura de 45,6°C para cada grupo de muestras. Los resultados obtenidos se presentan en las **Tabla 4-2**, **Tabla 4-3** y

Tabla 4-4.

Tabla 4-2: Determinación del contenido de cenizas y temperatura final de los pellets elaborados con aceite de palma como aglomerante.

Muestras con Aceite de palma	Cenizas (%)	Temperatura final de los pellets producidos (°C)
A24	1.03	45
A26	1.03	38
A28	1.06	42
A54	1.03	46
A56	1.00	43
A58	1.06	42
A84	1.01	40
A86	1.02	39
A88	1.08	45
Promedio	1.04	42

Tabla 4-3: Determinación del contenido de cenizas y temperatura final de los pellets elaborados con biodiesel como aglomerante.

Muestras con Biodiesel	Cenizas (%)	Temperatura final de los pellets producidos (°C)
B24	1.02	48
B26	1.03	40
B28	1.07	39
B54	1.01	43
B56	1.04	45
B58	1.06	46
B84	1.02	44
B86	1.04	45
B88	1.07	40
Promedio	1.04	43

Tabla 4-4: Determinación del contenido de cenizas y temperatura final de los pellets elaborados glicerina como aglomerante.

Muestras con Glicerina	Cenizas (%)	Temperatura final de los pellets producidos (°C)
G24	1.00	45
G26	1.03	46
G58	1.06	43

G28	1.02	41
G54	1.03	43
G56	1.07	45
G84	1.06	39
G86	1.04	43
G88	1.07	48
Promedio	1.04	44

Debido a los bajos contenidos de cenizas de los pellets, estos pueden ser usados en procesos termoquímicos. A temperaturas entre 1240 -1310°C algunos de los componentes de las cenizas se degradan y a temperaturas mayores, se vuelven fluidos [32, 93]. Las bajas concentraciones de cenizas mejoran la calidad de los biocombustibles sólidos debido al aumento del poder calorífico [94] y al incremento de la eficiencia de las conversiones químicas y termoquímicas [95], además de la disminución de incrustaciones, corrosión y erosión [96].

La temperatura con la cual los pellets son extraídos del dado de la peletizadora afecta el almacenamiento de los mismos y a su vez requiere un sistema de enfriamiento cuando se trabaja con escalas muy grandes de producción. En este trabajo no se tomó como un factor importante, puesto que los pellets disminuían su temperatura hasta la temperatura ambiente en aproximadamente 5 min después de ser extraídos. A pesar de que la peletización se realizó a 90°C, el tiempo de residencia de la biomasa dentro de la recámara de peletización fue diferente para todas las muestras, una de las razones por las cuales algunas muestras incrementaron o disminuyeron la temperatura final al ser extraídas, teniendo en cuenta también el tiempo de desmontaje del dado y extracción de las muestras, una por una.

4.5.4 Análisis elemental

Se determinó el contenido de carbono, hidrógeno y nitrógeno. El contenido de oxígeno no se calculó por diferencia, puesto que los pellets analizados tienen varios componentes y no fue posible definir una sola molécula. El contenido de azufre no se determinó puesto que su concentración por lo general es despreciable en biomasas lignocelulósicas [97].

Las muestras analizadas corresponden a la Borra 3, que es la biomasa con la cual se realizó todo el proyecto, las muestras A24, B24 y G24 corresponden a los pellets obtenidos

con las mejores combinaciones de humedad y aglomerantes, según los resultados de la optimización. Respecto a los contenidos de los elementos analizados, se puede tener más información en el Anexo E.

Tabla 4-5. Análisis elemental de la borra de café y los mejores pellets obtenidos en el diseño experimental.

Elemento	Borra 3	Muestra A24	Muestra B24	Muestra G24
Nitrógeno	2.0096	1.9286	1.9811	1.9924
Carbón	51.8276	52.5258	51.7494	50.8659
Hidrógeno	7.0564	6.7692	7.0008	6.9172
Total	60.8937	61.2236	60.7313	59.7755

4.5.5 Determinación del poder calorífico de los pellets

El poder calorífico se seleccionó como uno de los parámetros de evaluación más importante para la producción de pellets de borra de café. Por esta razón se caracterizaron y compararon los valores de poder calorífico superior de cada una de las muestras realizadas, con diferentes tipos de aglomerantes. En la **Figura 4-14** se presentan los diferentes resultados para cada muestra (M), con un tipo de aglomerante diferente. Las diferentes muestras son presentadas de acuerdo al tipo de aglomerante con el cual se elaboraron.

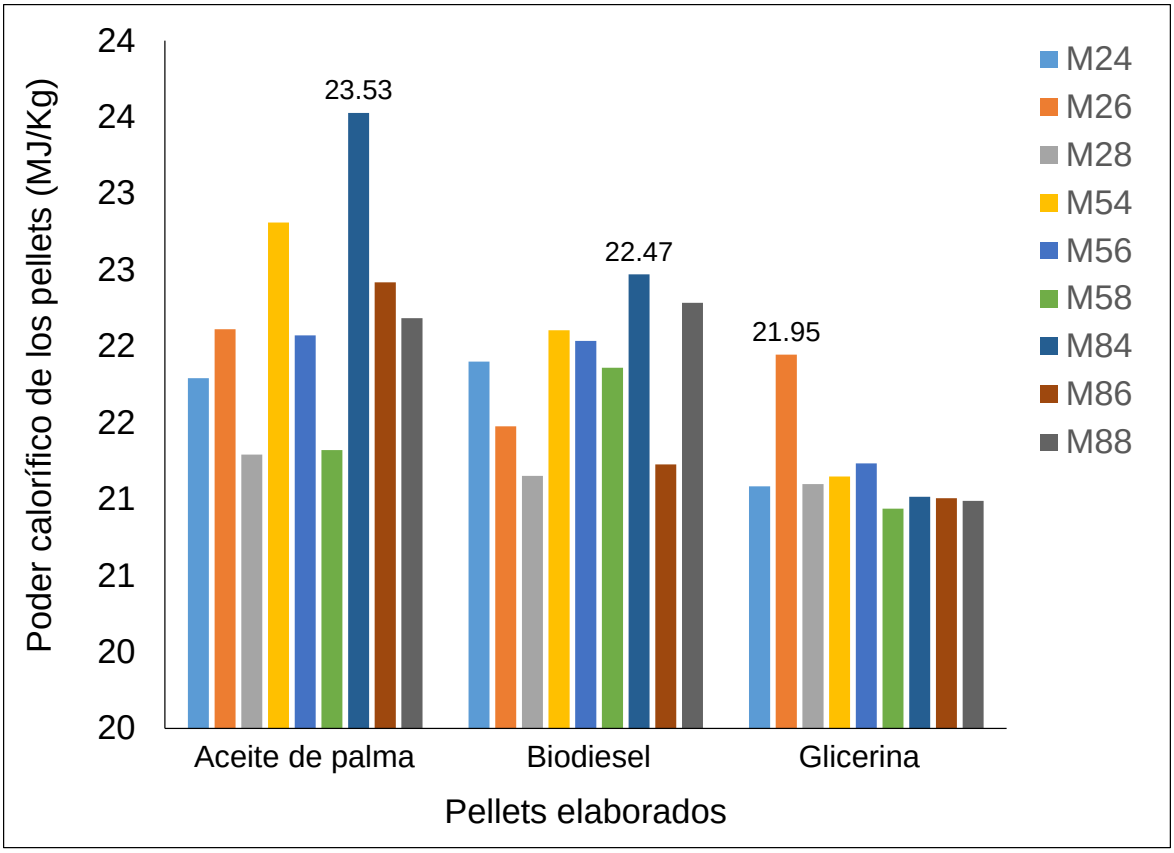

Figura 4-14. Poder calorífico de los pellets elaborados con borra de café.

De acuerdo con los resultados experimentales, se encontró que el mayor poder calorífico obtenido por los pellets de borra de café con glicerina fue de 21,95 MJ/Kg, para los pellets con aceite de palma fue de 23,53 MJ/Kg y 22,47 MJ/Kg para los pellets producidos con biodiesel como aglomerante. De estos datos es importante destacar dos aspectos; los pellets que obtuvieron el mayor valor de poder calorífico superior, fueron los elaborados con aceite de palma, lo cual coincide con la optimización hecha en el diseño de experimentos. Por otro lado, se puede afirmar que el poder calorífico aumenta cuando las muestras de café tienen un menor porcentaje de humedad, además del alto poder calorífico aportado por cada uno de los aglomerantes, el cual oscila entre 17- 40 MJ/Kg (**Tabla 4-1**). Los valores de poder calorífico obtenidos en todas las pruebas están en un intervalo de 20 – 24 MJ/Kg, lo cual se ajusta a la normatividad. Además de ser un valor comparable con los reportados por otras biomasas como el cuesco de palma que posee un poder calorífico superior de 22,3 MJ/Kg o la madera de haya con 18,3 MJ/Kg [50].

Obtener un poder calorífico elevado representa una mayor obtención de energía con menos cantidad de pellets (densidad energética), una de las mayores ventajas de la peletización. Pero también es importante tener en cuenta que este parámetro depende de otros como el contenido de cenizas y humedad de la muestra. Respecto al contenido de cenizas, en algunas ocasiones (procesos termoquímicos) disminuyen el poder calorífico porque requieren mayor energía para la descomposición térmica de los compuestos inorgánicos que las conforman [98, 64].

Para comparar el poder calorífico medido de cada una de las muestras con el de los componentes de los pellets, se realizó un promedio ponderado por composición del poder calorífico (**Tabla 4-6**). Al revisar los resultados obtenidos, se tuvo que algunas muestras variaron su valor de poder calorífico después de ser peletizadas. Por ejemplo la muestra M24, con un contenido de aceite de palma de 2% y 4% de humedad, reportó un poder calorífico final de **21,78 MJ/Kg**, mientras que en el promedio ponderado registró **21,57 MJ/Kg.** Respecto a estas variaciones en los resultados, autores como Özyuguran *et al*. [99], Nunes *et al*. [100], Friedl *et al.* [101], Wang *et al.* [34], Mancini *et al.* [102] y Wattana *et al.* [55], coinciden en que el valor del poder calorífico varía por los resultados del análisis próximo (humedad, materia volátil, fijación de carbón y contenido de cenizas). Estos autores hacen énfasis en el contenido de humedad y cenizas, parámetros que permiten la formación de gases no combustibles como CO_2 y H_2O.

Tabla 4-6. Poder calorífico calculado y experimental de los pellets de borra de café.

Muestras	Poder calorífico de los Pellets con aceite de palma (MJ/Kg)	Balance de energía	Poder calorífico de los Pellets con biodiesel (MJ/Kg)	Balance de energía	Poder calorífico de los Pellets con glicerina (MJ/Kg)	Balance de energía
M24	21.79	21.57	21.90	21.59	21.08	20.51
M26	22.11	22.71	21.48	22.73	21.95	21.65
M28	21.29	23.23	21.15	23.26	21.10	21.53
M54	22.81	22.13	22.11	22.15	21.15	20.42
M56	22.07	22.19	22.04	22.20	21.23	21.77
M58	21.32	21.11	21.86	21.11	20.94	20.68
M84	23.53	21.11	22.47	21.12	21.02	20.68

Muestras	Poder calorífico de los Pellets con aceite de palma (MJ/Kg)	Balance de energía	Poder calorífico de los Pellets con biodiesel (MJ/Kg)	Balance de energía	Poder calorífico de los Pellets con glicerina (MJ/Kg)	Balance de energía
M86	22.42	21.66	21.23	21.67	21.01	20.59
M88	22.18	23.46	22.28	23.48	20.99	21.75

*El poder calorífico calculado corresponde al superior.

El poder calorífico de los pellets de borra de café se vio afectado por varios parámetros, entre ellos el contenido de humedad y de cenizas [103, 104]. Munawar y Subiyanto [98] reportan que pellets hechos con residuos de la palma de aceite obtuvieron bajos valores de poder calorífico de 3,096-3,818 kcal/Kg, debido a contenidos de cenizas de 16.27-18.03%. Aunque en este proyecto se obtuvo un promedio de cenizas de 1,04%, es posible que haya afectado de alguna manera las muestras con bajo contenido de humedad como 4 y 6%.

4.6 Caracterización mecánica de los pellets obtenidos

4.6.1 Dureza de los pellets

La dureza de los pellets se evaluó como la resistencia a la deformación o compresión de los mismos. Para ello, se tomaron datos de dureza de cada una de las muestras; la dureza reportada corresponde a la carga máxima que un pellet puede soportar antes de fragmentarse [47].

Los resultados muestran una interacción entre la concentración de aglomerante y la dureza de los pellets elaborados con un contenido de humedad del 4, 6 y 8%.De acuerdo al diseño experimental realizado **(Sección 3.3.3)**, se obtuvo que las muestras con mayor dureza fueron aquellas que tenían una concentración de aglomerante de 2% y humedad del 4%. Esta tendencia se evidenció en los tres tipos de aglomerantes como se puede ver en las **Figura 4-15**, **Figura 4-16** y **Figura 4-17**.

En la **Figura 4-15** se observa una tendencia en las tres muestras. A medida que aumenta la concentración de aceite de palma, disminuye la dureza de los pellets. La **Figura 4-16** presenta una tendencia similar, a excepción de la muestra con 6% de humedad, la cual

probablemente disminuyó su dureza con un porcentaje demasiado bajo del 2% de biodiesel. Los pellets elaborados con glicerina disminuyeron su dureza al aumentar la concentración del aglomerante; sin embargo, los pellets con una humedad del 8% y una concentración de glicerina del 5% presentaron una baja disminución de la dureza, lo cual pudo ocurrir por un error experimental (**Figura 4-17**).

Los pellets elaborados con aceite de palma obtuvieron una dureza máxima de 7,30 Kg, los elaborados con biodiesel de 6,50 Kg y los pellets con glicerina alcanzaron una dureza de 7,63 Kg.

Es posible encontrar algunas inconsistencias en los resultados debido a la metodología que se siguió para la medición de la dureza. Como se mencionó anteriormente, se utilizó un texturómetro para realizar la medición. La texturometría es muy influenciada por diferentes parámetros, por lo que es necesario realizar muchas réplicas para obtener resultados confiables. Por esta razón se realizaron 5 réplicas por cada muestra, las cuales a pesar de tener las mismas condiciones de elaboración, podían haber cambiado su estructura durante el peletizado o almacenamiento debido a varios factores; pero autores como Shankar [105] y Matus *et al.* [93] reportan que la humedad es el factor que más influye, puesto que al someterse a cambios de temperatura y presión, desarrolla fuerzas iintermoleculares e intefaciales que aumentan o disminuyen la dureza del pellet. Es decir, debido a la temperatura y presión de peletización es probable que se hayan afectado algunos parámetros de las muestras como la lignina, el tamaño de grano, el área superficial, la porosidad de la muestra, la fase del aglomerante, el contenido de humedad, entre otros efectos.

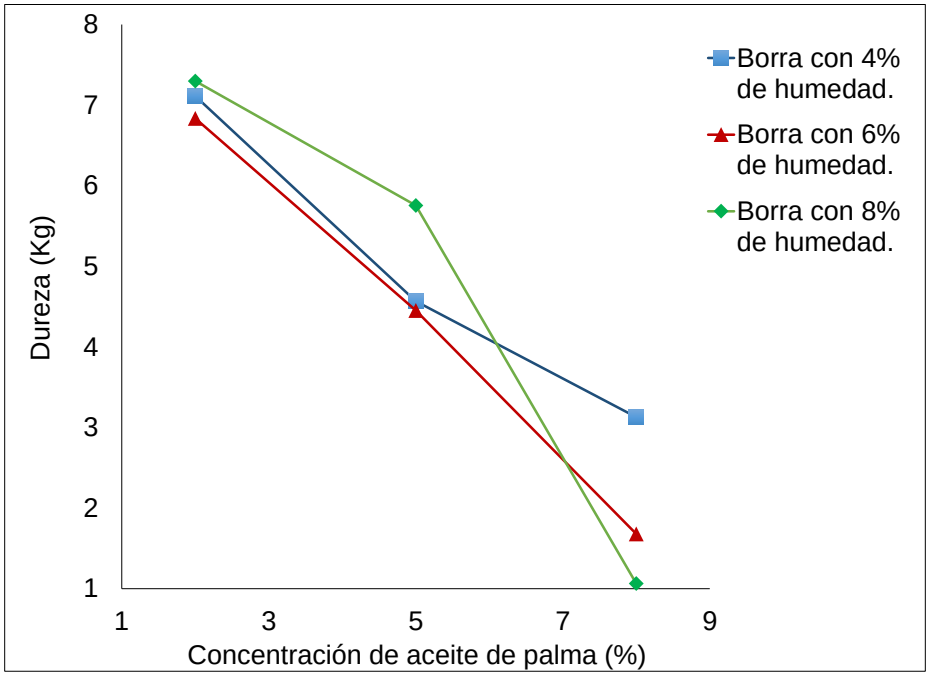

Figura 4-15. Dureza de los pellets elaborados con aceite de palma como aglomerante.

Todos los resultados de dureza, sin importar el tipo de alglomerante, reportaron la misma tendencia respecto a la dureza. Incluso, es importante resaltar como los pellets elaborados con un contenido de humedad del 8% tuvieron un comportamiento similar en las figuras **Figura 4-15** y **Figura 4-17**. Estas muestras tienen en común que cuando la concentración de aglomerante (aceite de palma y glicerina) fue del 5%, su dureza aumentó, en lugar de disminuir como los pellets elaborados con humedades inferiores. Existen varias posibles razones para explicar estos fenómenos, sin embargo, varios autores coinciden en que la dureza se ve afectada mayormente por el contenido de lignina de estas biomasas lignoselulósicas, Castellano *et at.* [106] reporta pellets con durezas hasta del 99% de biomasas como madera de vid, roble y eucalipto. El atribuye esta condicion al alto contenido de lignina de estos materiales. En el caso de las biomasas con bajos contenidos de lignina, se tiene por ejemplo los pellets elaborados con cascarilla de arroz, los cuales tuvieron una dureza mecánica del 50%, en este caso, los autores atribuyen el bajo resultado a los bajos contenidos de lignina y alto porcentaje de extractivos [107, 106, 108]. Es importante resaltar que los valores de dureza de los autores mencionados, fueron medidos con un durabilímetro, que basa sus medidas en modelos aplicados a la concentración de lignina.

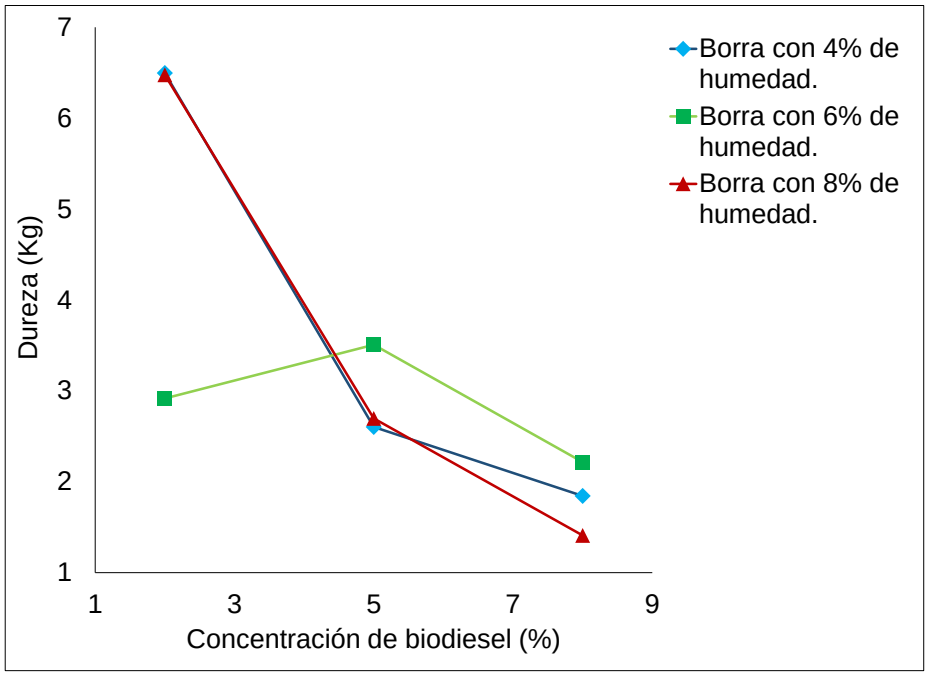

Figura 4-16. Dureza de los pellets elaborados con biodiesel como aglomerante.

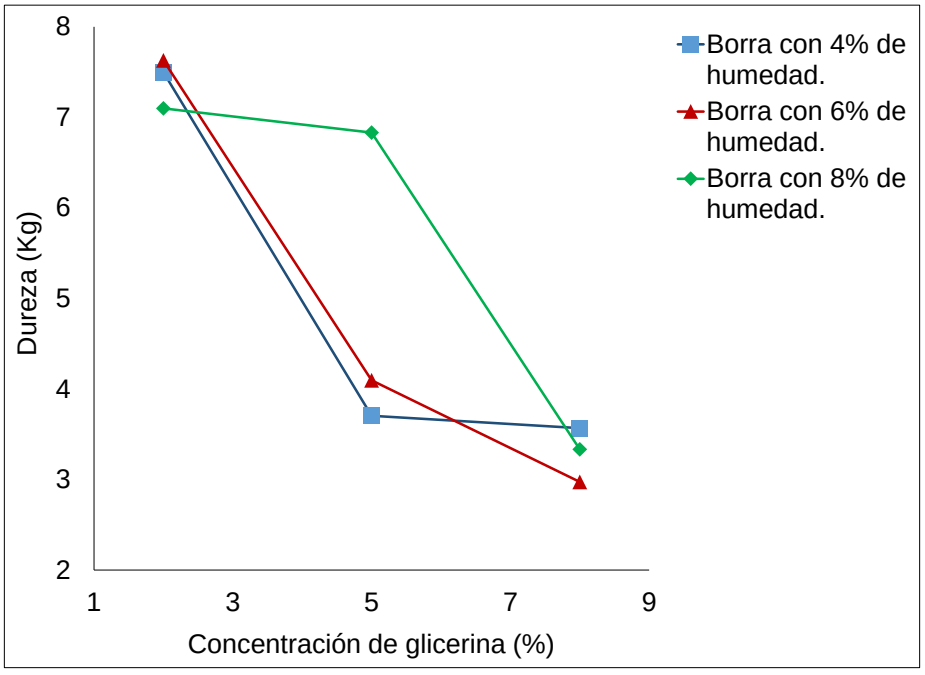

Figura 4-17. Dureza de los pellets elaborados con glicerina como aglomerante.

Whittaker y Shield [109] también reportan que pellets elaborados con biomasas con contenidos de lignina mayores al 20% producen pellets con mayor dureza. En el caso de la borra de café se tienen datos de un porcentaje de lignina del 27,7% [8, 9, 33], otra de

las razones de porque los pellets elaborados con borra tienen una alta dureza. Evidentemente el contenido de lignina varía según el tipo de biomasa, cambiando así mismo otras propiedades como la temperatura de transición vítrea de acuerdo al contenido de humedad y temperatura de peletización. Este mecanismo permite la difusión de fibras y nuevos enlaces entre los componentes del pellet. Cuando la peletización se realiza a temperaturas por debajo de los 100°C, como en este proyecto, la temperatura de transición vítrea de la lignina se reduce en un intervalo entre 50 y 100°C, al mismo tiempo que absorbe humedad [109, 110].

De acuerdo al tipo de biomasa, se tienen diferentes concentraciones de lignina. En el caso de los pellets elaborados con residuos de la madera, existe lignina de madera dura, la cual tiene menos grupos hidroxilo fenólicos y más grupos metoxilo en comparación con la madera blanda, lo cual disminuye la temperatura vítrea. Cuando se peletizan este tipo de biomasas a 100°C, los peletts forman puentes más sólidos, incrementando la dureza [109].

Por otro lado, la dureza de los pellets obtenidos también se vio afectada por el contenido de humedad de los mismos [111]. En las **Figura 4-15** y **Figura 4-16** se puede evidenciar cómo los ensayos con mayor humedad y concentración de aglomerante reportaron la menor dureza. La humedad reduce la fricción entre las moléculas del pellet al lubricar la biomasa [112]. Por otra parte, el agua no es compresible, limitando la densidad del pellet, además de incrementar la temperatura a la que la lignina se plastifica [113]. Whittaker y Shield [109] sugieren que a contenidos de humedad superiores al 20%, la presion de vapor reduce la compresión por las altas temperaturas y los enlaces de hidrógeno entre los polímeros de las biomasas son sustituidos por enlaces entre moleculas de agua, resultando en pellets menos duros [112, 66]. Sin embargo, aunque en la mayoria de los puntos se puede observar que los pellets disminuyen su dureza cuando el contenido de humedad de la borra es alto y asi mismo la concentración del aglomerante, en algunos puntos experimentales esta tendencia no predomina. Por ejemplo, los pellets elaborados con una concentración de aglomerante (aceite crudo de palma, biodiesel y glicerina) del 5% en todos los casos, sin importar el contenido de humedad de la borra de café, presentaron un comportamiento diferente a los otros puntos (2% y 8% de aglomerante). Estos pellets reportaron durezas mayores, incluso cuando el contenido de humedad de la borra de café era mayor al 6%, como el caso de los elaborados con glicerina. Estos comportamientos pueden ocurrir debido a fenomenos de compresibilidad de líquidos,

cambios en las estructuras químicas de los polímeros que conforman la biomasa e incluso a fenómenos superficiales de los granos de café [103, 114].

4.6.2 Resistencia al impacto de los pellets obtenidos

Con el porcentaje de resistencia al impacto se quiere corroborar los resultados obtenidos en las pruebas de dureza de cada uno de los pellets. Los resultados presentados a continuación en la **Figura 4-18** no constituyen un valor representativo de la dureza de los pellets, puesto que el procedimiento utilizado no aborda todos los posibles errores de medida que el proceso en sí conlleva. Por ejemplo, algunas muestras se rompían de acuerdo al ángulo en el que tocaban la superficie del suelo, reportando diferentes tamaños de pellet destruido. Otras muestras no se deformaban o simplemente eran afectadas por las corrientes de aire que había en el laboratorio donde se realizaron las pruebas.

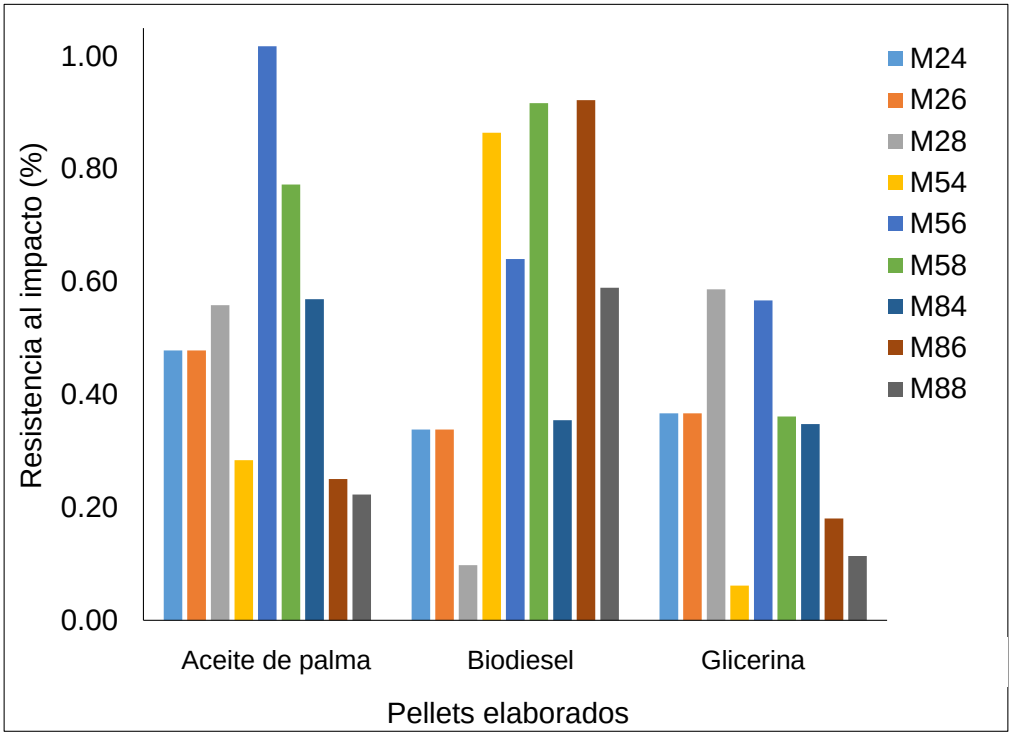

Figura 4-18. Resistencia al impacto de todos los pellets obtenidos con diferentes aglomerantes.

De los resultados obtenidos es importante destacar las mejores muestras de pellets respecto al tipo de aglomerante. En el caso del aceite de palma se obtuvo que la muestra M24 fue la mejor; resultado que se esperaba debido al bajo contenido de humedad y aglomerante, características que incrementan la dureza del pellet [115]. Los pellets elaborados con biodiesel presentaron inconsistencias en las muestras M86 y M58, puesto que los pellets con altas concentraciones de estos parámetros reportaron baja dureza en pruebas realizadas anteriormente. Es posible que haya ocurrido un error experimental en la medida de la resistencia al impacto de estos pellets, generando un valor erróneo en las réplicas. Por otro lado, es coherente afirmar que la muestra M54 presenta la mayor resistencia, debido a su bajo contenido de humedad y biodiesel. Respecto a los pellets elaborados con glicerina se obtuvo que la muestra más resistente fue la M28, que a pesar de un alto contenido de glicerina, tiene una alta dureza como se muestra en la **Figura 4-17**.

Como era de esperarse, las muestras con menor resistencia fueron las elaboradas con mayores concentraciones de humedad y aglomerante, es decir, M86 y M88. Efecto analizado previamente en las secciones **4.5.2** y **4.6.1.**

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- Se caracterizaron tres muestras de borra de café provenientes de las tiendas Juan Valdez ®, Starbucks ® y Oma, de las cuales se seleccionó aquella que cumpliera con tres criterios: poder calorífico superior más alto, menor contenido de cenizas y humedad. Finalmente se seleccionó la Borra 3, proveniente de la tienda Oma ®, con un poder calorífico superior de 23,08 MJ/Kg, un contenido de humedad inicial de 58,90% y cenizas de 1,99%.

- El contenido de humedad de la borra de café fue uno de los factores mas importantes a controlar, desde la adecuación de la materia prima, hasta el almacenamiento de los pellets. Durante el proceso de peletización se observó que la borra de café con mayor contenido de humedad (8%) y aglomerante (8%), disminuían la presión de peletización debido a que la mezcla biomasa – aglomerante era demasiado húmeda y su viscosidad disminuía. Por otro lado, también se observó que la humedad actua como aglomerante de las particulas de café, además de disminuir la temperatura de transición vítrea de la lignina, parámetro que posiblemente afectó la dureza de los pellets.

- Las muestras de borra de café tuvieron un incremento de humedad significativo a medida que aumentaba la concentración de aglomerante. Los pellets con mayor concentración de aceite palma tuvieron un mayor contenido de humedad final. Sin embargo, los pellets elaborados con una borra de café con un contenido de humedad del 8%, presentaron un incremento de la humedad final del pellet, aun

cuando la concentración del aceite de palma era bajo. Los pellet elaborados con biodiesel como aglomerante presentaron un comportamiento similar a los elaborados con aceite de palma. Las muestras hechas con un contenido de humedad de 8, 6 y 4% pudieron haber perdido parte de ésta, al evaporarse durante la peletización. En el caso de la glicerina, se esperaba que los pellets absorbieran mayor humedad debido a la higroscopicidad de la misma, sin embargo, este fenómeno no ocurrió.

- Las tres mejores muestras de pellets: A24, B24 y G24, fueron comparados con la normatividad austriaca, alemana y estadounidense, cumpliendo con los parámetros evaluados para biocombustibles sólidos, como se puede observar en la
-
- **Tabla 5-1**.

Tabla 5-1. Tabla comparativa de los pellets obtenidos experimentalmente y los pellets comerciales.

Norma	**Austria öNORM M7135**	**Alemania DIN 51731**	**Estados Unidos ASTM**	**Resultados experimentales**			**Pellets comerciales de madera***
Muestras				**A24**	**B24**	**G24**	
Diámetro (mm)	4-20			5,3	5,3	5,2	
Longitud (mm)	< 100			25,1	24,8	25,2	
Contenido de humedad (%)	< 12	< 12	1,29-21,66	5,11	5,18	4,15	7-10
Contenido de cenizas (%)	< 0,5	< 1,5	2,93-16,73	1,03	1,02	1,00	0,4-2
Poder calorífico (MJ/Kg)	> 18	17,5-19,5	21,86–27,68	21,79	21,90	21,08	16-18
Tamaño de grano (mm)				0,34	0,34	0,34	
Dureza (Kg)				7,11	6,50	7,50	Pobre
Resistencia al impacto (%)				0,81	0,76	0,31	
Presión de peletización (Mpa)				103,7	102,5	103,7	

*Tomado de Global Wood Pellet Industry and Trade Study 2017 [30].

- La máxima presión de peletización alcanzada fue de 133,17 MPa cuando se elaboraron pellets con glicerina como aglomerante. Los valores de poder calorífico obtenidos en todas las pruebas están en un intervalo de 20 – 24 MJ/Kg. Los pellets elaborados con aceite de palma obtuvieron una dureza máxima de 7,30 Kg, los elaborados con biodiesel de 6,50 Kg y los pellets con glicerina alcanzaron una dureza de 7,63 Kg.

5.2 Recomendaciones

- Implementar un sistema de secado eficiente energéticamente, que permita disminuir el alto contenido de humedad de biomasas como la borra de café. Preferiblemente, un sistema que utilice energías alternativas como la solar.

- Estudiar un sistema de almacenamiento de los pellets producidos, de tal manera que se garantice la menor absorción de humedad del ambiente.

- Mejorar el proceso de extracción de los pellets del dado de peletización, puesto que actualmente se hace de una manera manual que genera deformaciones en los mismos.

- Mejorar las técnicas de determinación de dureza de los pellets.

- Ampliar el estudio de posibles aglomerantes para la peletización de la borra de café.

Bibliografía

[1] U.S. Energy Information Administration, «International Energy Outlook 2017,» Estados Unidos, 2017.

[2] REN 21 Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, «Renawables 2013 Global Status Report,» Worldwatch Institute, Paris, 2013.

[3] REN Renawable Energy Policy Network for the 21st Century, «Renewable 2015 Global Status Report,» Worldwatch Institute, Paris, 2015.

[4] Renewables 2017 Global Status Report, «REN 21,» París, 2017.

[5] Unidad de Planeación Minero Energética UPME, «Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia,» 2010.

[6] Federación Nacional de Cafetetros de Colombia, «Comportamiento de la Industria Cafetera Colombiana 2014,» Bogotá, 2014.

[7] Cenicafé, «Los subproductos del café: Fuente de Energía Renovable,» Bogotá, 2010.

[8] D. VARDON, «Complete Utilization of Spend Coffee Grounds to produce Biodiesel, Bio-Oil, and Biochar,» *Sustainable Chemestry & Engineering ,* 2013.

[9] S. MUSSATO, «Production, Composition, and Aplication of Coffee and Its Industrial Residues,» *Food Bioprocess Technol,* nº 4, p. 7, 2011.

[10] bio-bean, «bio-bean,» 2016. [En línea]. Available: http://www.bio-bean.com/contact/. [Último acceso: 28 Septiembre 2016].

[11] L. FERNÁNDEZ, *Síntesis de Carbón Activado Peletizado a partir de Carbón Mineral del Cerrejón,* Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2014, p. 16.

[12] IEA Bioenergy, «The Outlook for Wood Pellets,» 2016.

[13] Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia, «Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia,» [En línea]. Available: www.fedebiocombustibles.com. [Último acceso: 6 marzo 2018].

[14] Cenipalma, «Cenipalma,» [En línea]. Available: http://www.cenipalma.org/productos-y-usos-de-la-palma-de-aceite. [Último acceso: 5 Marzo 2018].

[15] E. GARAY, «ALTERNATIVA DE PURIFICACIÓN DE BIODIESEL OBTENIDO POR TRANSTERIFICACIÓN DE ACEITE DE PALMA CON METANOL SUPERCRÍTICO,» Universidad Nacional De Colombia, Bogotá, 2014.

[16] FEDAPAL, «La Fundación de Fomento de Exportaciones de Aceite de Palma y sus Derivados de Origen Nacional,» [En línea]. Available: http://fedapal.org/web2017/index.php/noticias. [Último acceso: 16 Mayo 2018].

[17] FEDEPALMA, «Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite,» [En línea]. Available: http://web.fedepalma.org/. [Último acceso: 19 Marzo 2018].

[18] Café de Colombia, 2016. [En línea]. Available: http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/el_cafe_de_colombia/del_arbol_a_la_taza/. [Último acceso: 3 Noviembre 2016].

[19] Federación Nacional de Cafeteros, «Comportamiento de la Insutria Cafetera Colombiana 2016,» 2016.

[20] Federación Nacional de Cafeteros , «Comportamiento de la Industria Cafetera Colombiana 2017,» Federación de Cafeteros, Bogotá, 2017.

[21] L. OLIVEIRA y A. FRANCA, «An Overview of the Potencial Uses for Coffee Husks,» *Coffee in Health and Disease Prevention,* p. 4, 2015.

[22] Centro Nacional de Investigaciones del Café, «Cenicafe,» 7 Junio 2011. [En línea]. Available: http://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos_cafe/manejo_de_subproductos/P1. [Último acceso: 23 Octubre 2016].

[23] P. MURPHY y M. MADHAVA, «Sustainable Management of Coffee Industry- by products and value addittion- A Review,» *Resources, Conservation and Recycling,* vol. 66, pp. 45-48, 2012.

[24] R. CAMPOS y G. GOARCA, «Spend Coffee Grounds: A rewiev current research and future prospect,» *Trends in Food Science & Technology,* nº 45, p. 25, 2015.

[25] J. PARK y B. KIM, «In-situ Transesterification of Wet Spent Coffee Grounds for Sustainable,» *Bioresource Technology ,* 2016.

[26] Unidad de Planeación Minero Energética , «UPME,» [En línea]. Available: http://www.upme.gov.co/normatividad/nacional/2014/ley_1715_2014.pdf. [Último acceso: 6 Febrero 2018].

[27] J. PAULINO, «El Sitio Avícola,» 18 Noviembre 2013. [En línea]. Available: http://www.elsitioavicola.com/articles/2482/peletizacian-y-calidad-del-pelet/. [Último acceso: 4 Octubre 2016].

[28] G. GONZALES, *Diseño de una Planta de Peletización en Castilla y León,* Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2012, p. 52.

[29] P. Pradhan, A. Arora y S. Mahajani, «Pilot scale evaluation of fuel pellets production from garden waste biomass,» *Energy for Sustainable Development,* vol. 43, pp. 1-14, 2017.

[30] D. Thrän, D. Peetz y K. Schaubach, «Global Wood Pellet Industry and Trade Study 2017,» IEA Bioenergy, 2017.

[31] P. DOLZAN, A. GRASSI y M. JUNGINGER, «Global Wood Pellets Markets and Industry: Policy Drivers, Market Status and Raw Material Potential,» *IEA Bioenergy,* 2007.

[32] A. ZAPATA, *Investigación del Efecto de los Parámetros de Elaboración de Pellets de Cuesco de Palma en el Proceso de Pirólisis,* Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2016.

[33] L. YANG, Q. HE, P. HAVARD, K. CORSCADDEN, C. XU y X. WANG, «Co-liquefaction of spent coffee grounds and lignocellulosic feedstocks,» *Bioresource Technology,* vol. 237, 2017.

[34] T. WANG, Y. LI, Y. ZHANG, J. ZHAO, Y. LIU, L. SUN, H. MAO y H. LIN, «Evaluation of the potential of pelletized biomass from different municipal solid wastes for use as solid fuel,» *Waste management,* 2018.

[35] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO, «Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO,» [En línea]. Available: http://www.fao.org/news/story/es/item/273212/icode/. [Último acceso: 23 Octubre 2016].

[36] P. NIELS, D. GARDNER, T. POULSEN y C. FELBY, «Importance of Temperature, Moisture Content, and Species for the Conversion Process of Wood Residues into Fuel Pellets,» *Wood and Fiber Science,* vol. 41, nº 4, p. 415, 2009.

[37] S. Döring, Power from Pellets: Technology and Aplications, Springer Science & Business Media, 2013.

[38] M. GIL, P. OULEGO, M. CASAL, C. PREVIDA y J. RUBIERA, «Mechanical Durability and Combustion Characteristics of Pellets from Biomass Blends,» *Bioresource Technology,* vol. 101, 2010.

[39] W. STELTE, J. HOLM, A. SANADI, S. BARSBERG, J. AHRENFELDT y U. HENRIKSEN, «A Study of Bonding and Failure Mechanisms in Fuel Pellets from Different Biomass Resources,» *Biomass & Bioenergy,* 2011.

[40] N. KALIYAN y R. VANCE, «Factors Affecting Strength and Durability of Densified Biomass Products,» *Biomass & Bioenergy,* vol. 33, 2009.

[41] J. POSADA y C. CARDONA, «Análisis de la refinación de glicerina obtenida como coproducto en la producción de biodiesel,» *Pontificia Universidad Javeriana,* 2010.

[42] Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia, «FedeBiocombustibles,» 2017. [En línea]. Available: http://www.fedebiocombustibles.com/v3/main-pagina-id-29.htm. [Último acceso: 4 Agosto 2017].

[43] A. GARCIA, A. POPOV y M. ZAMORANO, «A review of European standards for pellet quality,» *Renewable Energy,* vol. 36, 2011.

[44] N. FREDES, *Evaluación Técnica y Económica de una Planta de Producción de Combustible Sólido a partir de Biomasa Forestal en la region de los Lagos,* Santiago de Chille, 2014.

[45] L. GARCÍA, *Obtención de Gas Combustible a partir de la Gasificación de Biomasa en un Reactor de Lecho Fijo,* Bogotá: Universidad Nacional, 2011.

[46] GUAICARAMO S.A., «Palmar de Guaicaramo S.A.,» Barranca de Upía, Meta, 2017.

[47] L. ATUESTA y F. SIERRA, «Caracterización Fisico - Química de Pellets a partir de mezclas 50/50 de Carbón Bituminoso/Madera Residual,» *Informador Técnico Colombia ,* 2014.

[48] Arduino User Group, «ARDUINO,» 2018. [En línea]. Available: https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction. [Último acceso: 28 Mayo 2018].

[49] J. CORACH, M. COLMAN, P. SORICHETTI y S. ROMANO, «Kinematic viscosity of soybean biodiesel and diesel fossil fuel blends: Estimation from permittivity and temperature,» *Fuel,* 2017.

[50] L. GARCIA, *Obtención de Gas Combustible a partir de la Gasificación de Biomasa en un Reactor de Lecho Fijo,* Bogotá: Universidad Nacional, 2011.

[51] B. MELISSARI, «Comportamiento de Cenizas y su Impacto en Sistemas de Combustión de Biomasa,» *Dialnet,* 2012.

[52] C. LONDOÑO, *Combustión de Carbón,* Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2012.

[53] M. BARBANERA, M. LASCAR, V. STANZIONE, A. ESPOSITO, R. ALTIERI y M. BUFACCHI, «Characterization of pellets from mixing olive pomace and olive tree prunning,» *Renewable energy,* 2016.

[54] R. GARCIA, M. GONZALES, C. PEVIDA y F. RUBIERA, «Pelletization properties of raw and torrefied pine sawdust: Effect of co-copelletization, temperature, moisture content and glycerol addition.,» *Fuel,* 2018.

[55] W. WATTANA, S. PHETKLUNG, W. JAKAEW, S. CHUMUTAI, P. SRIAM y N. CHANURAI, «Characterization of Mixed Biomass Pellet Made from Oil Palm and Para - rubber tree residues.,» *Energy procedia,* 2017.

[56] C. BETANCOURT, R. MELLO, L. CASTELLANOS y C. SILVA, «Características de la glicerina generada en la producción de biodiesel, aplicaciones generales y su uso en el suelo.,» *Cultivos Tropicales,* vol. 37, nº 3, 2016.

[57] C. ORDOÑEZ, *Evaluación nutricional de la glicerina cruda proveniente de biodiesel de aceite de palma en cerdos.,* Bogota: Universidad Nacional de Colombia, 2014.

[58] M. FRANKE y A. REY, «Pelleting qualy,» *World grain 24,* 2016.

[59] S. MANI, L. TABIL y S. SOKHANSANJ, «Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws ,corn stover and switchgrass.,» *Biomass & Energy,* 2004.

[60] N. HARUN y M. AFZAL, «Effect of Particle Size on Mechanical Properties of Pellets Made from Biomass blends.,» *Procedia engineering,* 2016.

[61] H. REZAEI, S. SOKHANSANJ, J. LIM, A. LAU y X. BI, «Effects of the mass and volume shrinkage of ground chip and pellet particles drying rates.,» *Particuology.,* 2018.

[62] J. TUMULURU, C. WRIGHT, K. KENNEY y R. HESS, «A technical review on biomass processing: densification, preprocessing, modeling and optimization.,» American Society of Agricultural and Biological Engineers., Pittsburgh, Pennsylvania., 2010.

[63] C. SERRANO, E. MONEDERO, M. PORTERO y H. LAPUERTA, «Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets,» *Fuel Processing Technology,* vol. 92, 2011.

[64] K. ISHII y T. FURUICHI, «Influence of moisture content, particle size and forming temperature on productivity and quality of rice straw pellets,» *Waste management,* 2014.

[65] P. NANOU, W. HUIJGEN, M. CARBO y J. KIEL, «The role of lignin in the densification of torrefied wood in relation to the final product properties.,» *Biomass & Bioenergy,* 2018.

[66] W. STELTE, C. CLEMONS, J. HOLM, R. SANADI, J. SHANG, U. AHRENFELDT y U. HENRIKSEN, «Fuel Pellets from Wheat Straw: The Effect of Lignin Glass Transition and Surface Waxes on Pelletizing Properties,» *Biomass & Energy,* 2012.

[67] A. SANCHEZ, *Cinética de secado de la broza de café,* Costa Rica: Ciudad universitaria Rodrigo Facio, 2016.

[68] A. GIRALDO, A. ARÉVALO, A. Ferreira, P. SILVA, J. SIERRA y M. MENEZES, «Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (Theobroma grandiflorum) en rodajas.,» *Ciencia y tecnología de alimentos,* 2010.

[69] R. TREYBAL, Operaciones de transferencia de masa, McGRAW-HILL.

[70] W. SEVERNS, H. DEGLER y J. MILES, Energía mediante Vapor, Aire o Gas, New York: Reverté, 2007.

[71] S. GONZALES, «Modelamiento del secado de pellets en el enfriador a contraflujo de la planta de producción de Solla S.A. en la regional de cundinamarca.,» Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2015.

[72] Y. HUANG, N. FINELL, S. LARSSON, X. WANG, J. ZHANG, R. WEI y L. LIU, «Biofuel pellets made at low moisture content e Influence of water in the binding mechanism of densified biomass.,» *Biomass and Bionergy,* 2017.

[73] P. LIZICA, P. SPIRU y I. ION, «Mathematical modelling of sawdust drying process for biomass pelleting.,» *Energy procedia,* 2017.

[74] S. RINCON y D. MARTINEZ, «Análisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria,» *Cenipalma,* vol. 30, 2009.

[75] J. RIBA, E. BERNAT, G. BAQUERO, R. PUIG y A. RIUS, «Caracterización de las propiedades físicas de aceites vegetales para ser utilizados como carburante en motores diesel.,» *Afinidad LXVI,* 2010.

[76] H. BILAL y W. MA, «Miscibility-Driven Optimization of Nanostructures in Ternary Organic Solar Cells Using Non-fullerene Acceptors,» *CellPress,* 2017.

[77] J. HENDRIK, L. UHLENBRUCK, G. LENEWEIT y H. NIRSCHL, «Transfer of colloidal particles between two non-miscible liquid phases,» *Colloids and Surfaces A,* 2017.

[78] P. BARTOCCI, G. BIDINI, F. ASDRUBALI, C. BEATRICE, F. FRUSTERI y F. FANTOZZI, «Batch pyrolysis of pellet made of biomass and crude glycerol: Mass and energy balances,» *Renewable Energy,* 2018.

[79] A. FERREIRA, A. EGAS, I. FONSECA, A. COSTA, D. ABREU y L. LOBO, «The viscosity of glycerol,» *J. Chem. Thermodynamics,* 2017.

[80] C. ERLICH, M. OHMAN, E. BJORNBOM y T. FRANSSON, «Thermochemical characteristics of sugar cane bagasse pellets,» *Fuel,* 2005.

[81] A. DEMIRBAS, «Briquetting properties of biomass waste materials,» *Energy Sources,* 2004.

[82] L. YADONG y L. HENRY, «High-pressure densi• ycation of wood residues to form an upgradel fuel,» *Biomass and Bioenergy,* 2000.

[83] C. KRUEGER, M. THOMMES y P. KLEINEBUDDE, «Influence of storage condition on properties of MCC II-based pellets with theophylline-monohydrate.,» *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics,* 2014.

[84] A. c. d. Colombia, «Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales. IDEAM.,» 2018. [En línea]. Available: http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html. [Último acceso: 2 Junio 2018].

[85] N. MISLJENOVIC, R. COLOVIC, D. VUKMIROVIK, T. BRLEK y C. SALAS, «The effects of sugar beet molasses on wheat straw pelleting and pellet quality. A comparative study of pelleting by using a single pellet press nd a pilot-scale pellet press.,» *Fuel Processing Technology,* 2016.

[86] R. MEHROTRA, P. SINGH y H. KANDPAL, «Near infrared spectroscopic investigation of the thermal degradation of wood,» *Thermochim,* 2010.

[87] A. LISOWSKI, M. DABROSKA, E. OSTROWSKA, A. NAWROCKA, M. STASIAK, A. SWIETOCHOWSKI, J. KLONOSKI, M. SYPULA y B. LISOWSKA, «Effects of the biomass moisture content and pelleting temperature on the pressure-induced agglomeration process,» *Biomass and Bioenergy,* 2017.

[88] D. BERGSTROM, M. FINELL y R. GREF, «Effects of extractives on the physical characteristics of Scots Pine Sawdust Fuel Pellets.,» *Forest products journal,* 2010.

[89] J. JAMRADLOEDLUK y C. LERTSATITTHANAKORN, «Influences of Mixing Ratios and Binder Types on Properties of Biomass Pellets.,» *Energie procedia,* 2017.

[90] C. SUN, «Decoding powder tabletability : roles of particle adhesion and plasticity.,» *Science technology,* 2011.

[91] R. GARCIA, M. GONZALES, C. PEVIDA y F. RUBIERA, «Pelletization properties of raw and torrefied pine sawdust: Effect of co-pelletization,temperature, moisture content and glycerol addition,» *Fuel,* 2018.

[92] E. ACEVEDO, W. JURADO y F. CORTES, «Efecto del glicerol en la inhibición de la combustión espontánea de carbón sub-bituminoso,» *Boletín Ciencias de la tierra,* 2016.

[93] M. K. P. MATUS, L. SOOS y J. BENIAK, «The effect of papermaking sludge as an additive to biomass pellets on the final quality of the fuel,» *Fuel,* 2018.

[94] I. OBERNBERGER y G. THEK, The Pellet Handbook , the Production an Thermal utilisation of biomass pellets., London: Earth scan Ltda., 2010.

[95] I. OBERNBERGER, T. BRUNNER y G. BARNTHALER, «Chemical properties of solid biofuels - significance and impact,» *Biomass and Bioenergy,* 2006.

[96] K. CHIANG, K. CHIEN y C. LU, «Characterization and comparison of biomass produced from various sources: suggestions for selection of pretreatment technologies in biomass to energy,» *Apply Energy,* 2012.

[97] A. GÓMEZ, Pirólisis de Biomasa: Cuesco de Palma, Kassel: Kassel University Press, 2008.

[98] S. MUNAWAR y B. SUBIYANTO, «Characterization of Biomass Pellet made from Solid Waste Oil Palm Industry,» *Procedia Environmental Sciences,* 2014.

[99] A. OZYUGURAN y S. YAMAN, «Prediction of Calorific Value of Biomass from Proximate Analysis,» *Energie Procedia,* 2017.

[100] L. NUNES, J. MATIAS y J. CATALAO, «A review on torrefied biomass pellets as a sustainable alternative to coal in power generation,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 2014.

[101] A. FRIEDL, E. PADOUVAS, H. ROTTER y K. VARMUZA, «Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition,» *Analitica Chimica Acta,* 2005.

[102] M. MANCINI, A. RINNAN, A. PIZZI y G. TOSCANO, «Prediction of gross calorific value and ash content of woodchip samples by means of FT-NIR spectroscopy,» *Fuel Processing Technology,* 2018.

[103] S. MANI, L. TABIL y S. SOKHANSANJ, «Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws,corn stover and switchgrass,» *Biomass & Bionergy,* 2004.

[104] A. OZYUGURAN, A. AKTURK y S. YAMAN, «Optimal use of condensed parameters of ultimate analysis to predict the calorific value of biomass.,» *Fuel,* 2018.

[105] J. SHANKAR, «Effect of process variables on the density and durability of the pellets made from high moisture corn stover,» *Biosystems Engineering,* 2014.

[106] J. CASTELLANO, M. GOMEZ, M. FERNANDEZ y E. CARRASCO, «Study on the effects of raw materials composition and pelletization conditions on the quality

and properties of pellets obtained from different woody and non woody biomasses,» *Fuel ,* 2015.

[107] S. LARSSON y R. SAMUELSSON, «Prediction of ISO 17831-1:2015 mechanical biofuel pellet durability from ingle pellet characterization,» *Fuel processing technology,* 2017.

[108] E. BACK, «The Bonding Mechanism in Hardboard Manufacture Review,» *Holzforschung - International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood,* 2009.

[109] C. WHITTAKER y I. SHIELD, «Factors affecting wood, energy grass and straw pellet durability - Arewiev,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 2017.

[110] W. STELTE, J. HOLM, A. SANADI y S. BARSBERG, «A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources,» *Biomass and Bioenergy,* 2011.

[111] R. SAMUELSSON, M. THYREL, M. SJOSTROM y T. LESTANDER, «Effect of biomaterial characteristics on pelletizing properties and biofuel pellet quality,» *Fuel Processing Technology,* 2009.

[112] N. NELSEN, D. GARDNER, T. POULSEN y C. FELBY, «mportance of temperature, moisture content, and species for the conversion process of wood residues into fuel pellets,» *Wood fibre Sci,* 2009.

[113] M. CORONE, A. PANTALEO y A. PELLERANO, «Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of Olea Europaea,» *Biomass and bioenergy,* 2011.

[114] L. JIANG, X. YUANG, Z. XIAO, J. LIANG, H. LI, L. CAO, H. WUANG, X. CHEN y G. ZENG, «A comparative study of biomass pellet and biomass-sludge mixed pellet: Energy input and pellet properties,» *Energy Conversion and Management,* vol. 126, 2016.

[115] P. PRADHAN, A. ARORA y S. MAHAJANI, «Pilot scale evaluation of fuel pellets production from garden waste biomass.,» *Energy for Sustainable Development,* 2018.

[116] International Coffee Organization, «International Coffe Organization,» 2018. [En línea]. Available: http://www.ico.org/. [Último acceso: 17 Enero 2018].

A. Anexo: Especificaciones de equipos utilizados

	AMB 50
Capacidad Máxima Max	50g
Intervalo de Display d	0.001g (1 mg)
Peso de Calibración (clase F2)	50 g
Temperatura ambiental	+ 15 / + 35°C
Dimensiones del plato de pesada	Φ 100 mm 4 pulgadas
Dimensiones	200 x 270 x 195 mm 7.9 x 10.6 x 7.7 pulgadas
Peso bruto	5 kg 11 lb.
Fuente de Alimentación	230VAC(+10%/-15%) 110VA or 115VAC (+10%/-15%) 110VA opcional
Señal de salida	RS 232C
Peso de muestra máximo	50 g
Peso de muestra mínimo sugerido	2 g
Resolución de la medida de la humedad	0.01%
Número de modos de trabajo	7
Rango de temperatura de secado	50-160°C
Tiempo de intervalo de muestra	1s - 59s
Tiempo máximo de secado, modos 4-7	9h 50min
Tiempo de medida típico	2 - 20 min
Corriente de calentadores	200W
Dimensiones internas de la Cámara	145 x 111 x 20 mm 5.7 x 4.4 x .8 pulgadas

Figura A-1. Especificaciones técnicas de la balanza de humedad AMB. Tomado del manual de la balanza.

Escala / resolución	-50.0 a 800.0°C (-58.0 a 1472.0°F)	Resolución: 0.1°
Precisión	± 2% de la lectura o ± 2ºC (4ºF) la que sea mayor Nota: La precisión está especificada para la siguiente escala de temperaturas ambientales: 18 a 28°C (64 a 82°F)	
	-58 to 30°F (-50 to -1°C)	± 2.0% de la lectura o ±6°F/3°C la que sea mayor
	-0.5 to 65°(31°F to 150°F)	± 2.0% de la lectura o ±4.5°F/2.5°C que sea mayor
	66 to 315°C (151°F to 600°F)	± 2.0% de la lectura o ±4°F/2°C que sea mayor
	316 to 800°C (600F to 1472°F)	± (2.5%rdg + 5°F/2.5°C)
	Nota: La precisión está especificada para la siguiente escala de temperaturas ambientales: 23 a 25°C (73 a 77°F)	
Emisividad	0.10 a 1.00 ajustable (ajuste automático sobre 100ºC o 212ºF)	
Campo de visión	D/S = Aprox. Relación 13:1 (D = distancia; S = punto *u objetivo*)	
Puntero láser	Láser clase 2 potencia < 1mW; Longitud de onda de 630 a 670nm	
Respuesta al espectro IR	8 a 14 mm (longitud de onda)	

Figura A-2. Especificaciones técnicas del termómetro infrarrojo EXTECH INSTRUMENTS. Tomado del manual del termómetro.

ESPECIFICACIONES DE PELETIZADORA	
Capacidad de producción:	4 Kg/h
Potencia:	3,3 kW
Carga máxima de alimentación:	3 kg
Capacidad Máxima:	15 toneladas
Temperatura de trabajo:	25 – 120°C
Tamaño de Grano:	0,5 – 0,1 mm
Longitud mínima Pellet	1 cm
Diámetro de Pellet	6 mm
Material de trabajo:	Cuesco de Palma Africana
ESPECIFICACIONES HIDRAULICAS	
Presión máxima:	3000 psi
Bomba:	Bomba de Engranajes GALTECH
Motor:	Siemens – B5 WEG
Especificaciones Motor:	Motor eléctrico 3 HP – 1800 RPM – 60Hz
Cilindro hidráulico:	Doble Efecto Tipo Botella Flanco Frontal Ø4" x Ø2" x200mm – IHN Ltda.
Tipo de Aceite:	ISO 68
Capacidad del Tanque:	8 Galones
ESPECIFICACIONES TERMICAS	
Camisa de calentamiento	Resistencia de inyección con abrazadera
Potencia de Calentamiento	800W a 220V
Tipo de control:	Termostato – Sonda térmica por contacto

Figura A-3. Especificaciones técnicas de la peletizadora. Tomado del manual de mantenimiento de la peletizadora.

B. Anexo: Comportamiento de la presión de peletización

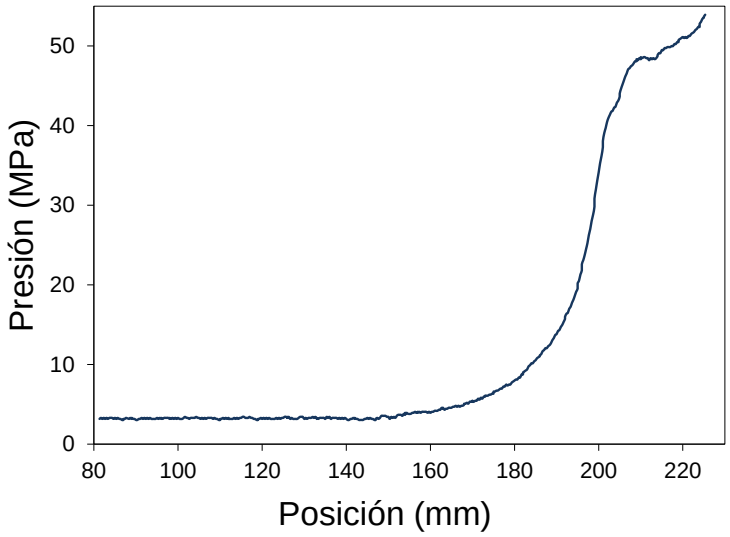

Figura B-4. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra A58.

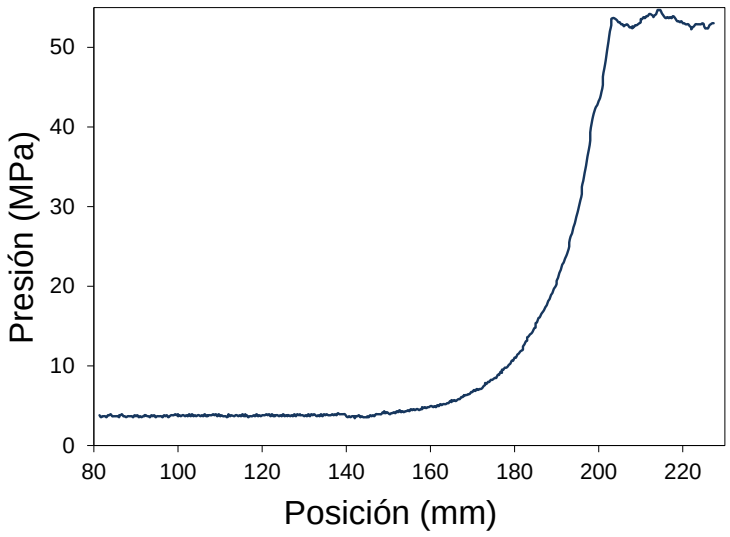

Figura B-5. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra A84.

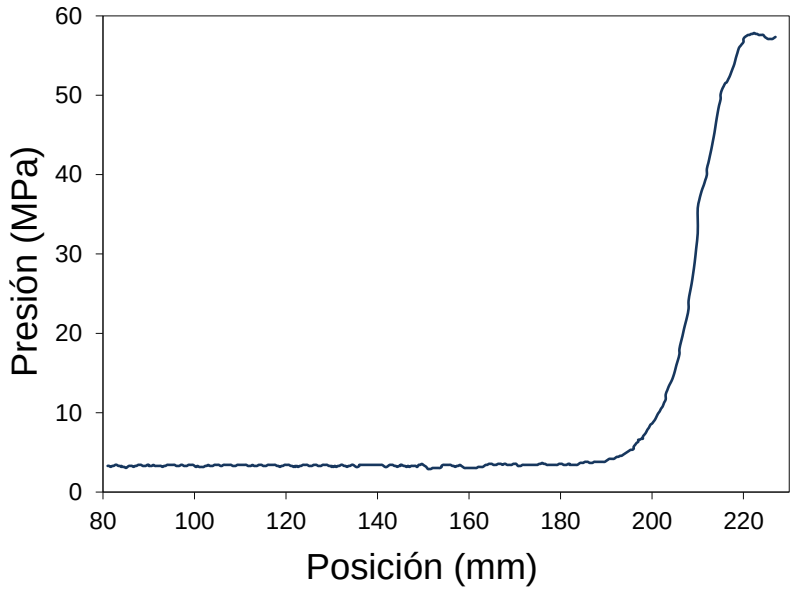

Figura B-6. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra A56.

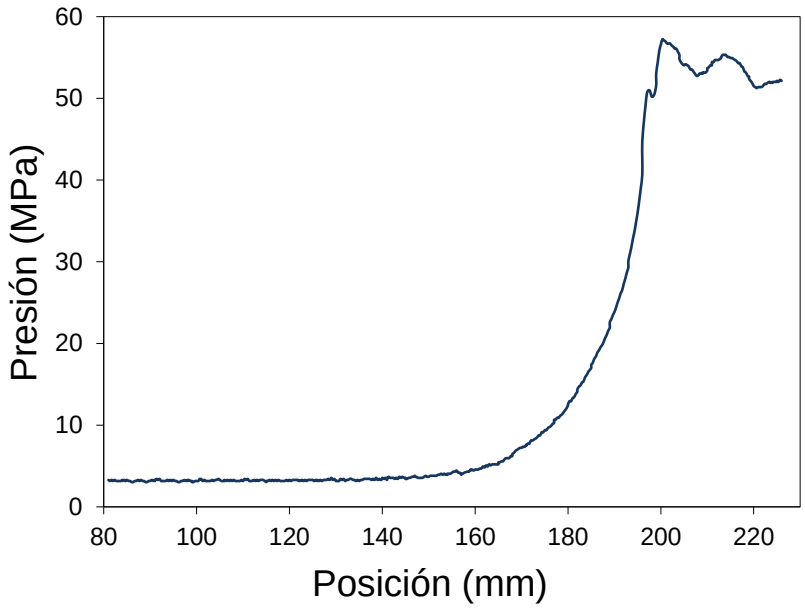

Figura B-7. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra A86.

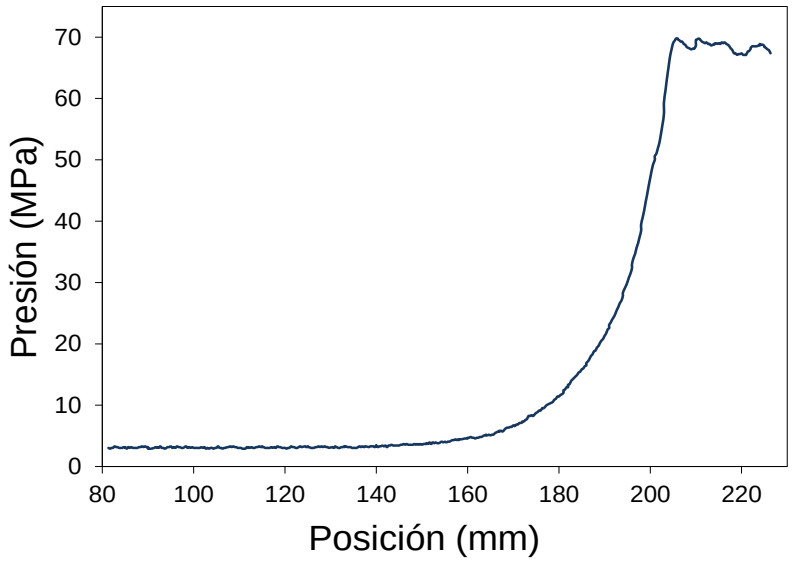

Figura B-8. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra A28.

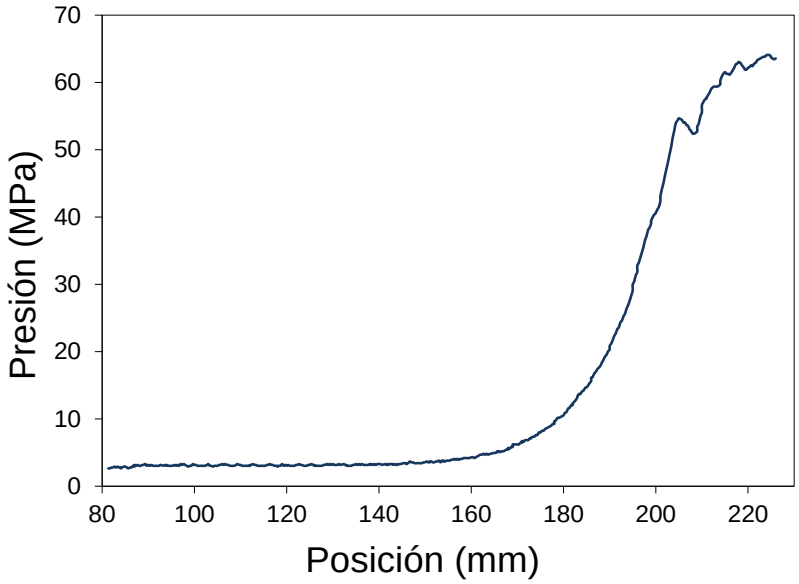

Figura B-9. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra A88.

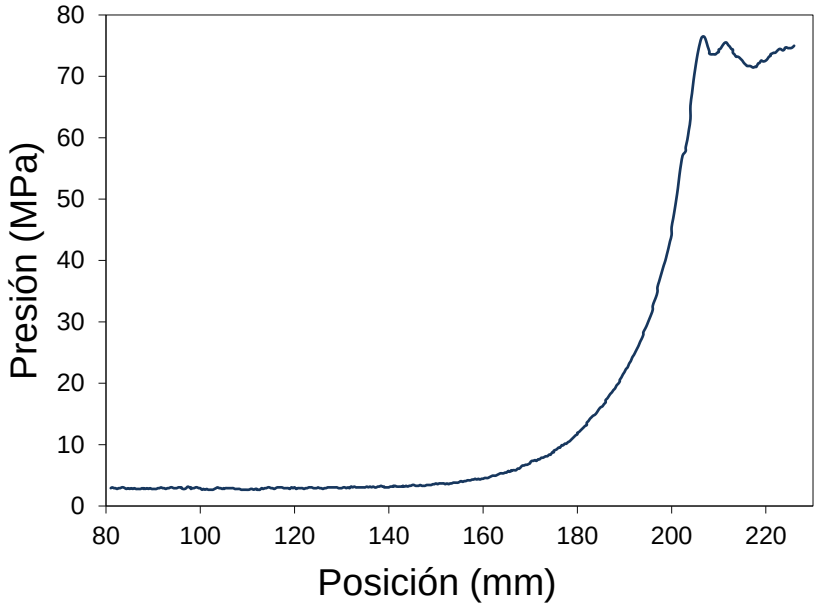

Figura B-10. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra A24.

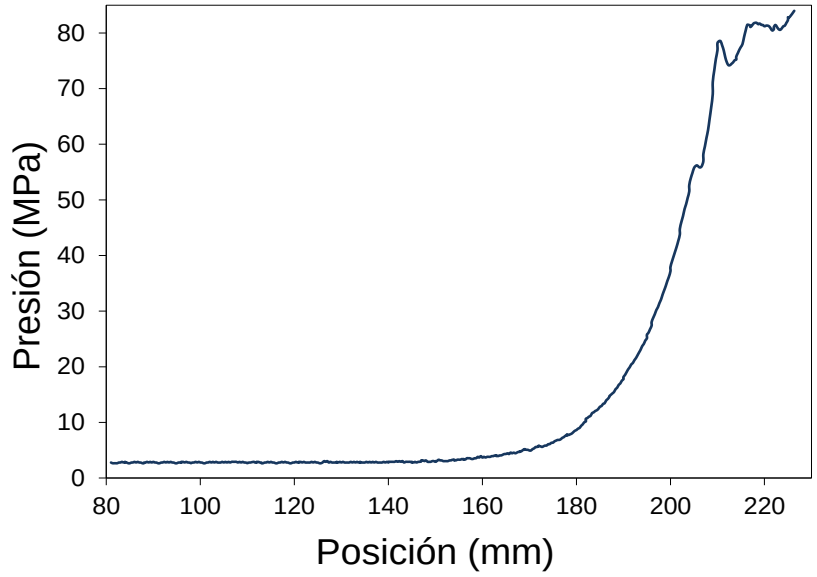

Figura B-11. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra A26.

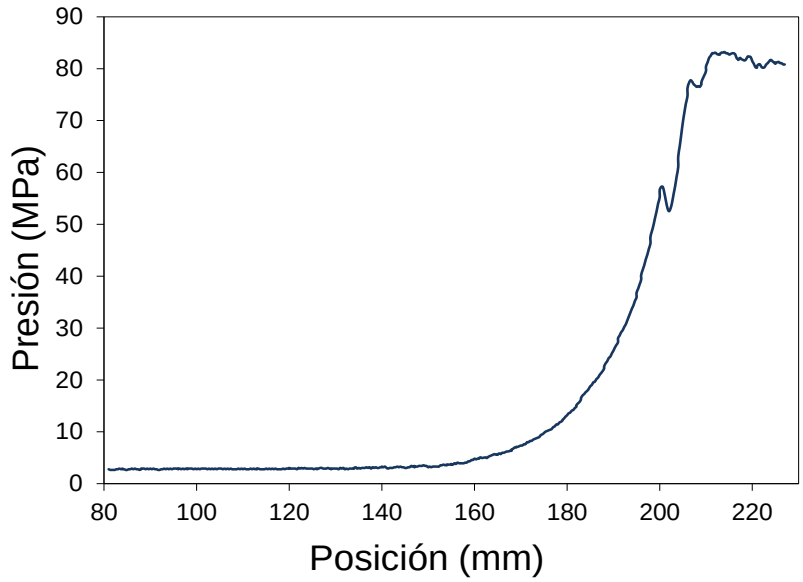

Figura B-12. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra A54.

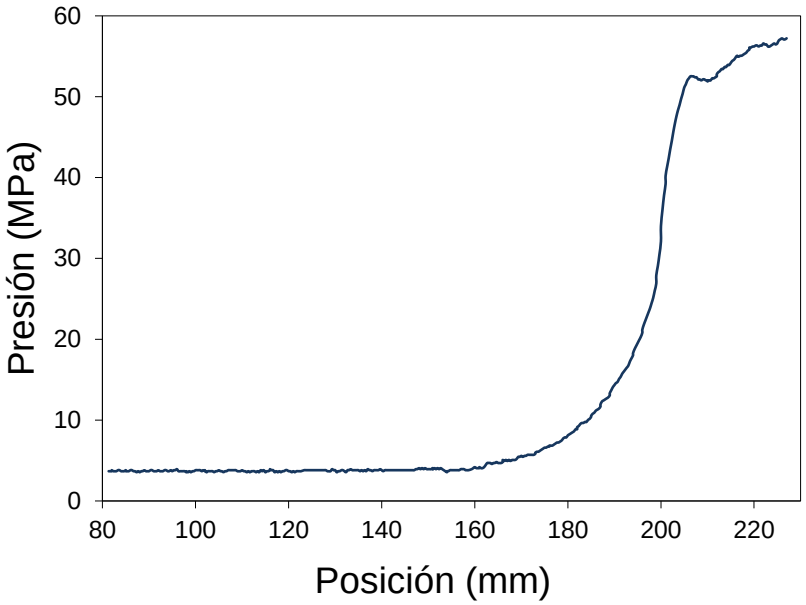

Figura B-13. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra B88.

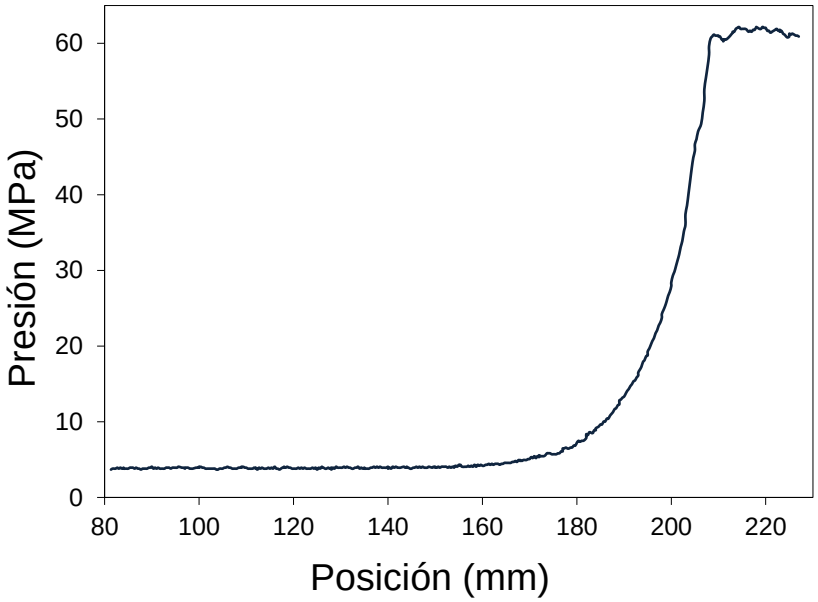

Figura B-14. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra B58.

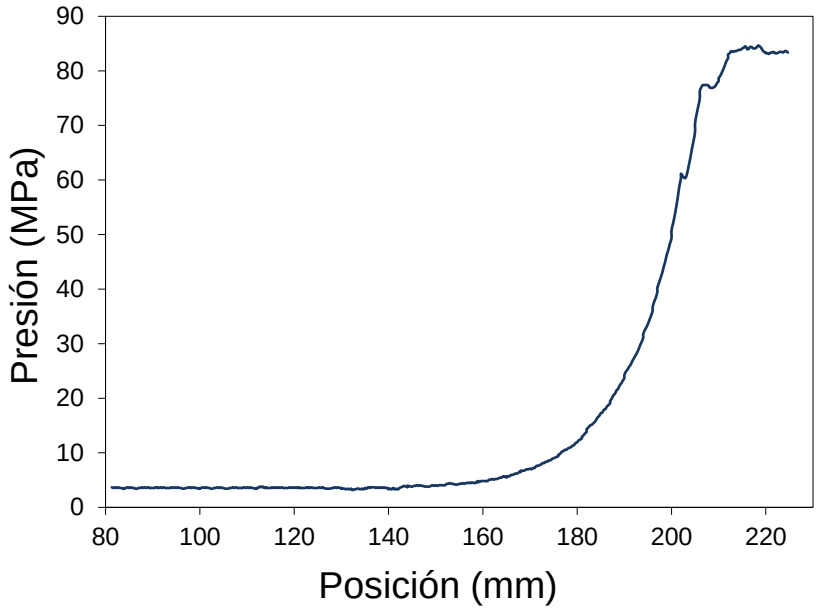

Figura B-15. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra B54.

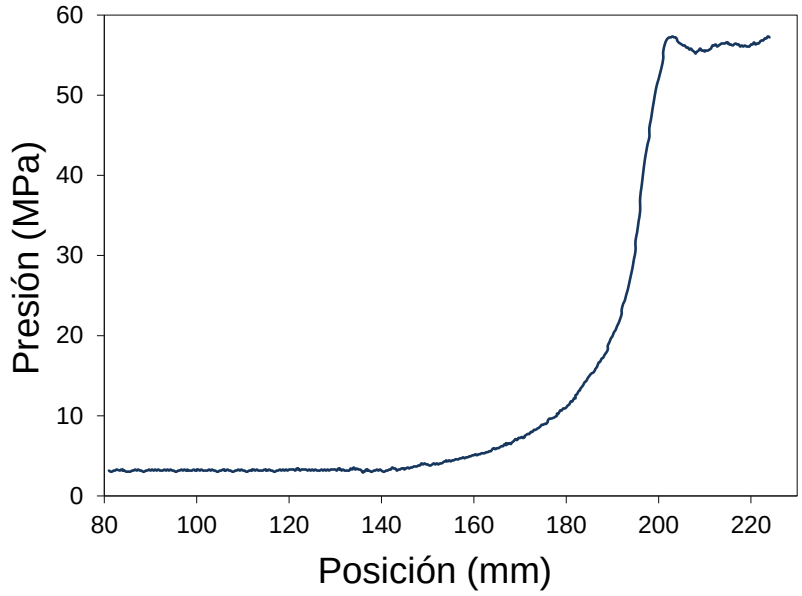

Figura B-16. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra B28.

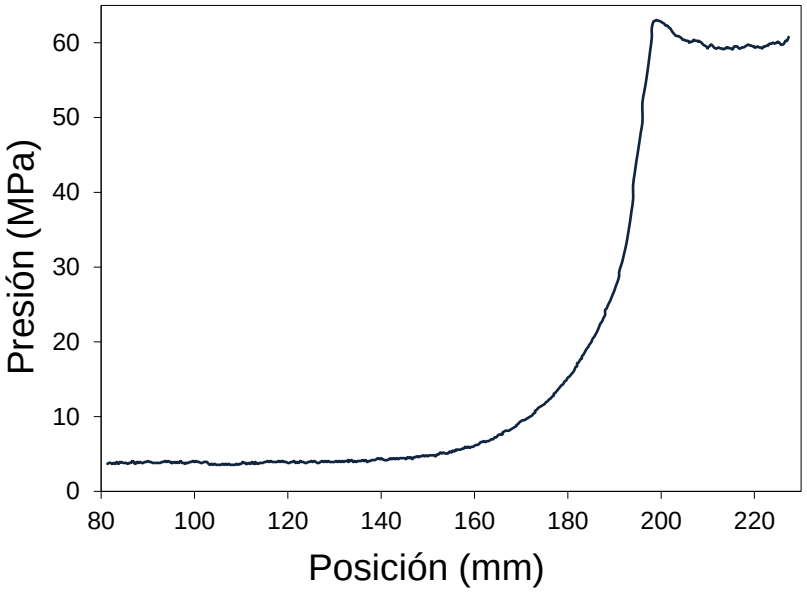

Figura B-17. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra B84.

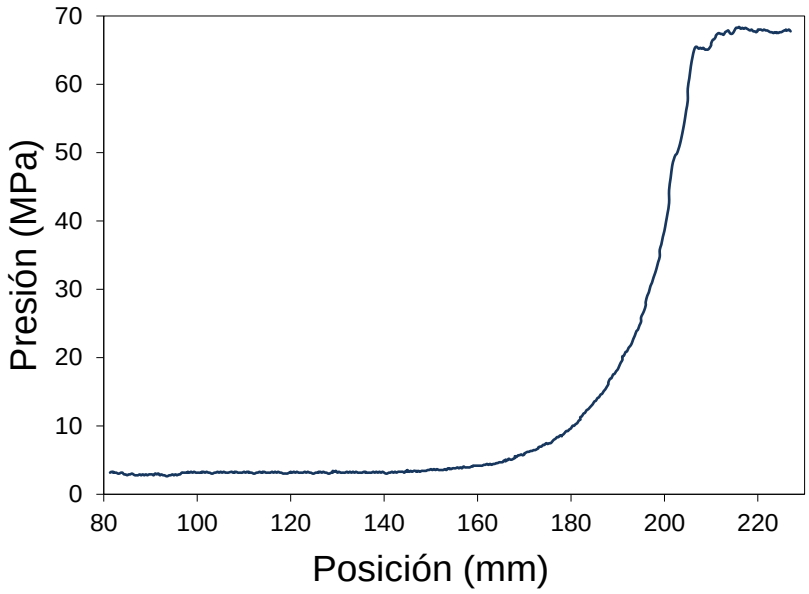

Figura B-18. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra B56.

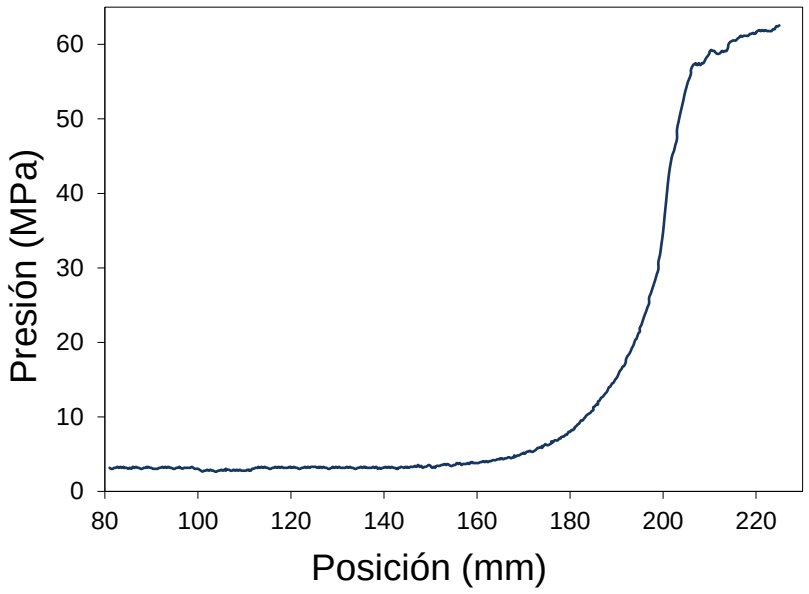

Figura B-19. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra B86.

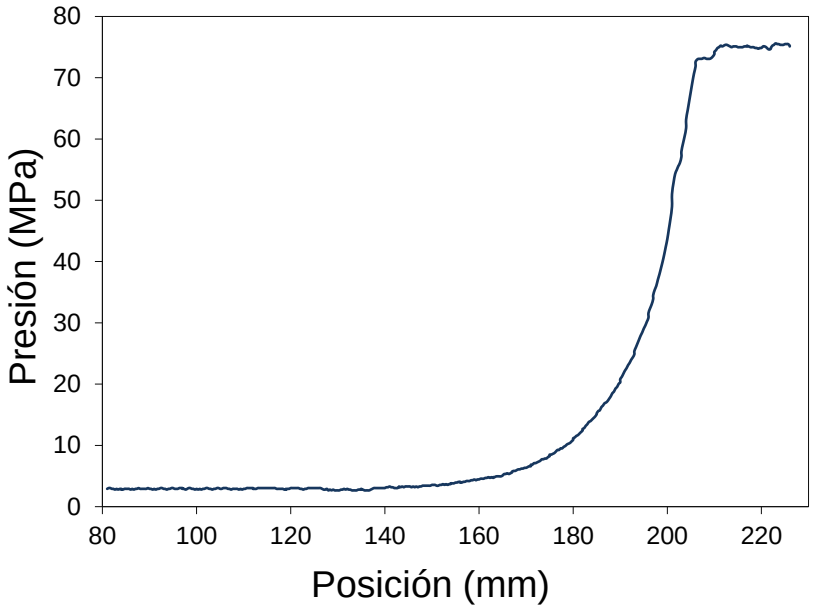

Figura B-20. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra B24.

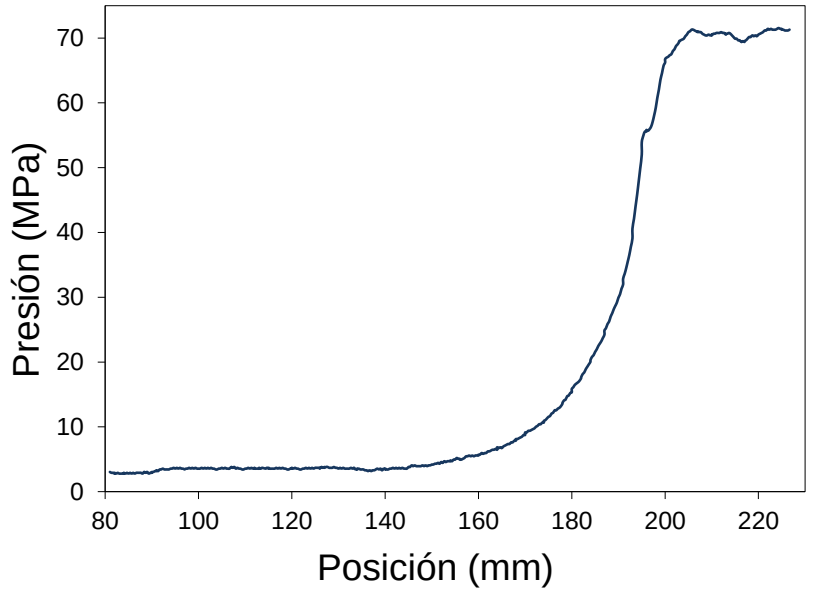

Figura B-21. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra B26.

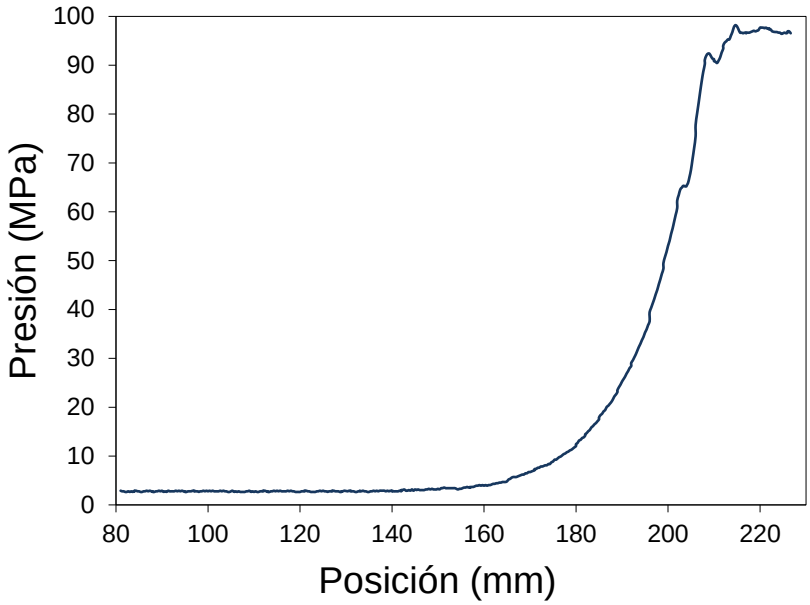

Figura B-22. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra G24.

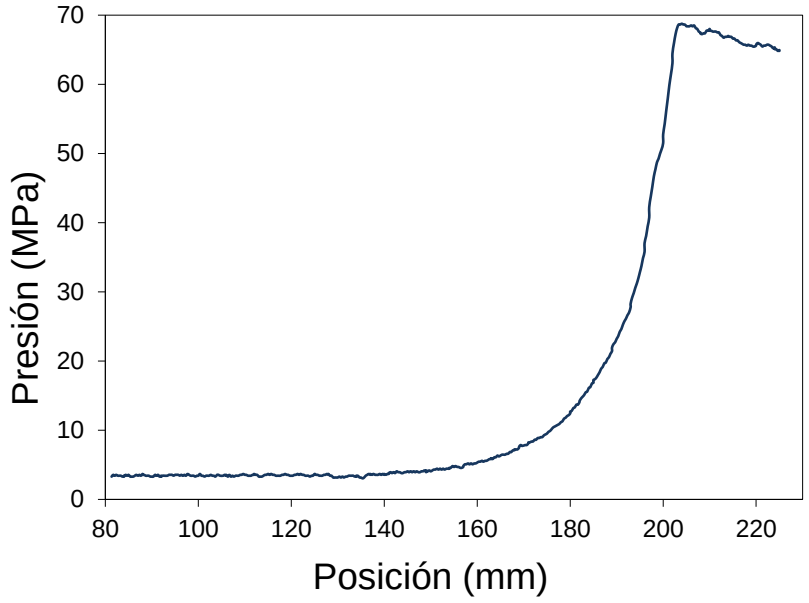

Figura B-23. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra G28.

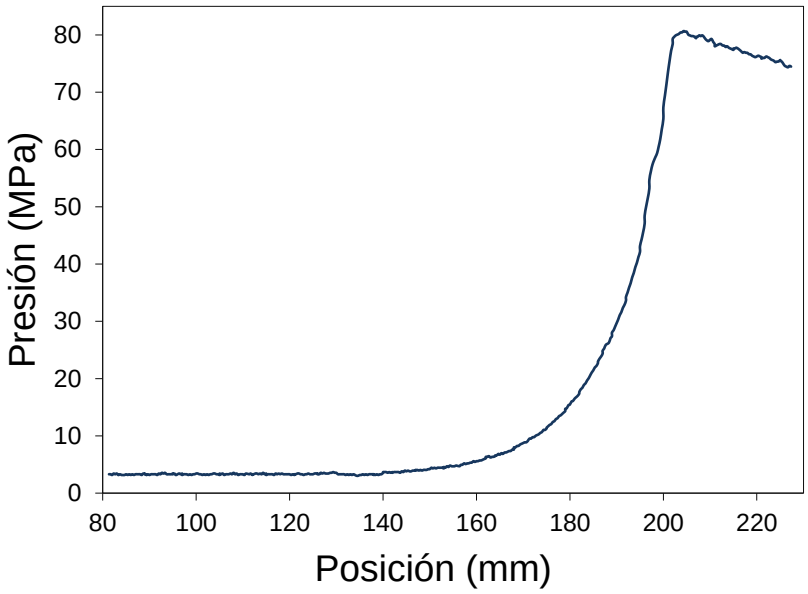

Figura B-24. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra G54.

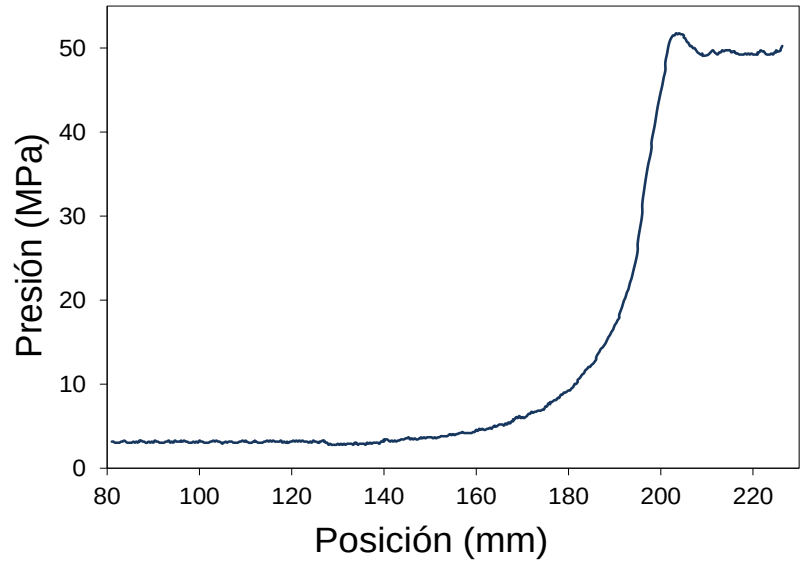

Figura B-25. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra G88.

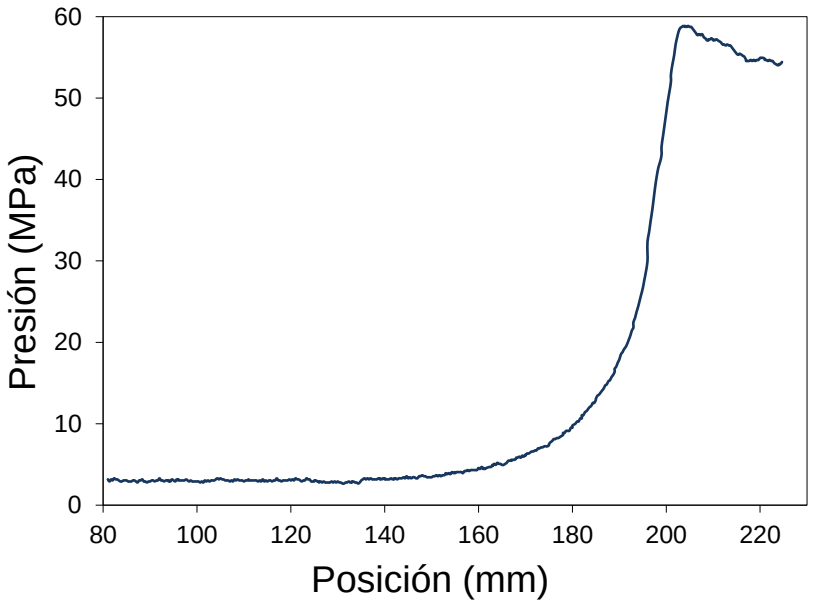

Figura B-26. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra G58.

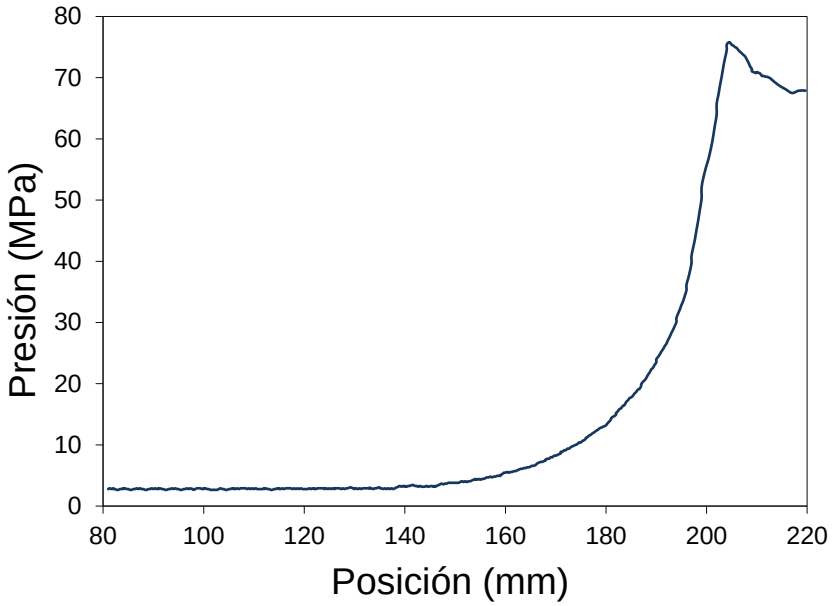

Figura B-27. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra G26.

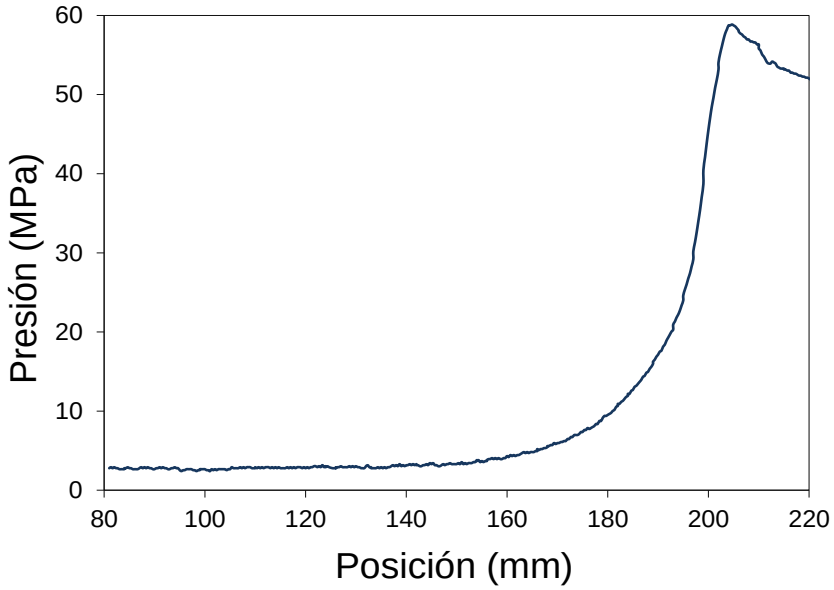

Figura B-28. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra G86.

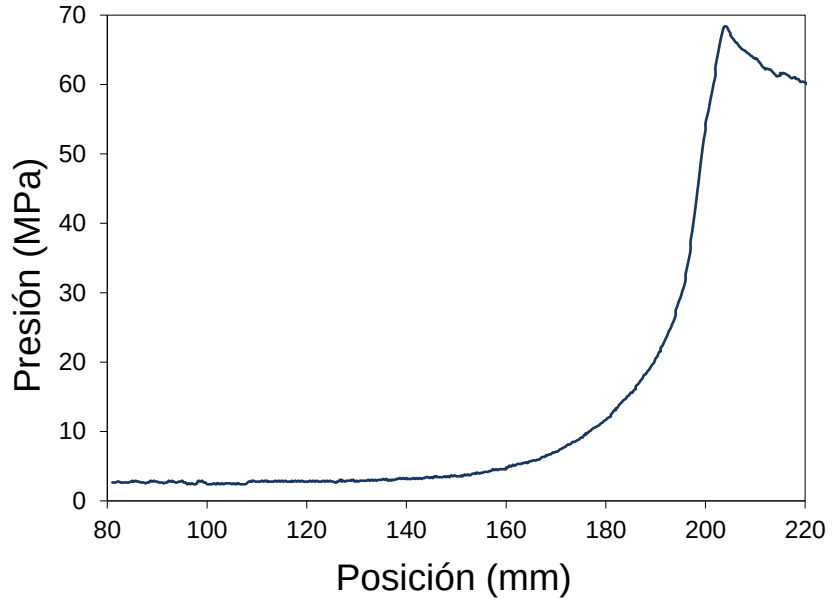

Figura B-29. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra G56.

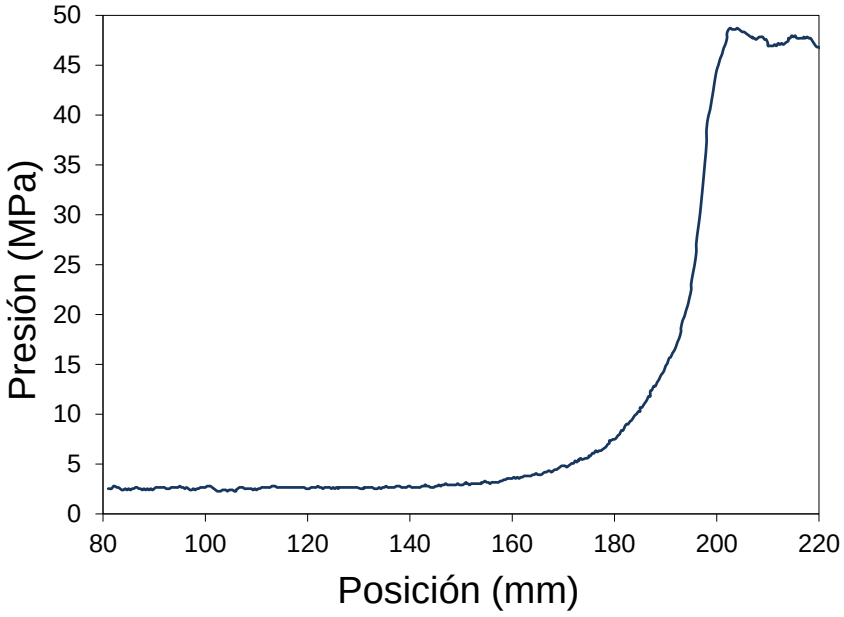

Figura B-30. Comportamiento de la presión de peletización para la muestra G84.

C. Anexo: Especificaciones de los aglomerantes.

Tabla C-1. Especificaciones del aceite crudo de palma. Reportado por palmar Guaicaramo.

Características	Parámetro	Método de Análisis
AGL	4,0 % Max	NTC. 218 Grasas y aceites vegetales y animales. Determinación del índice de acidez y de la acidez.
Humedad	0,5 % Max	NTC. 287 Grasas y aceites vegetales y animales. Determinación del contenido de humedad y material volátil.
Impurezas	0,15 % Max	NTC 240 Grasas y aceites vegetales y animales. Determinación del contenido de impurezas insolubles.
Índice de yodo	54-56 g I_2/100 g	NTC 283 Grasas y aceites vegetales y animales. Determinación de índice del yodo.
Punto de fusión	35-39 °C	NTC 213 Grasas y aceites vegetales y animales. Determinación del punto de fusión capilar abierto.

Variable	Unit	Value
Palmitic Acid (C16:0)	%wt.	24.66
Stearic Acid (C18:0)	%wt.	3.76
Oleic Acid (C18:1)	%wt.	33.30
Linoleic Acid (C18:2)	%wt.	31.96
Linolenic Acid (C18:3)	%wt.	3.86
Others acids	%wt.	2.46
Acid Value	mg KOH g^{-1}	0.22
Water content	%wt.	0.04

Figura C-31. Especificaciones del biodiesel de soya.

Tabla C-2. Especificaciones de la glicerina. Reportado por el proveedor.

ENSAYO	ESPECIFICACIONES	RESULTADOS
APARIENCIA	Líquido claro incoloro	CONFORME
SOLUBILIDAD	Miscible en agua y etanol (96%)	CONFORME
DENSIDAD RELATIVA A 15°C	1,210 - 1,220 g/mL	1,218 g/mL
ÍNDICE DE REFRACCIÓN	1,4450 - 1,4550 a 25°C	14,490
pH SOLUCION 10%	4,0 6,5	6,30
PERÓXIDOS	Máximo 15	CONFORME
FORMALDEHIDO	Máximo 200ppm	CONFORME
METALES PESADOS	Máximo 10ppm	CONFORME
AGUA K.F.	Máximo 0,5%	0,4%
VALORACIÓN	Mínimo 98% (p/p)	99,69% (p/p)

D. Anexo: Resultados del ANOVA

Tabla D-3. ANOVA del experimento factorial de la interacción de la humedad, aglomerantes y tipo de aglomerante en la elaboración de pellets de borra de café.

Variable	DF	Adj. SS	Adj. MS	F-Value	P-Value
Modelo	18	0.384	0.021	1.61	0.249
Lineal	6	0.233	0.039	2.94	0.080
Tipo de aglomerante	2	0.045	0.022	1.71	0.241
% Aglomerante	2	0.186	0.093	7.04	0.017
%Humedad	2	0.002	0.001	0.08	0.923
Interacciones cuadráticas	12	0.150	0.012	0.95	0.548
Tipo de aglomerante*%Aglomerante	4	0.025	0.006	0.48	0.750
Tipo de aglomerante*%Humedad	4	0.027	0.006	0.52	0.724
%Aglomerante*%Humedad	4	0.097	0.024	1.85	0.213
Error	8	0.105	0.013		
Total	26	0.49			

E. Anexo: Cromatogramas del análisis elemental.

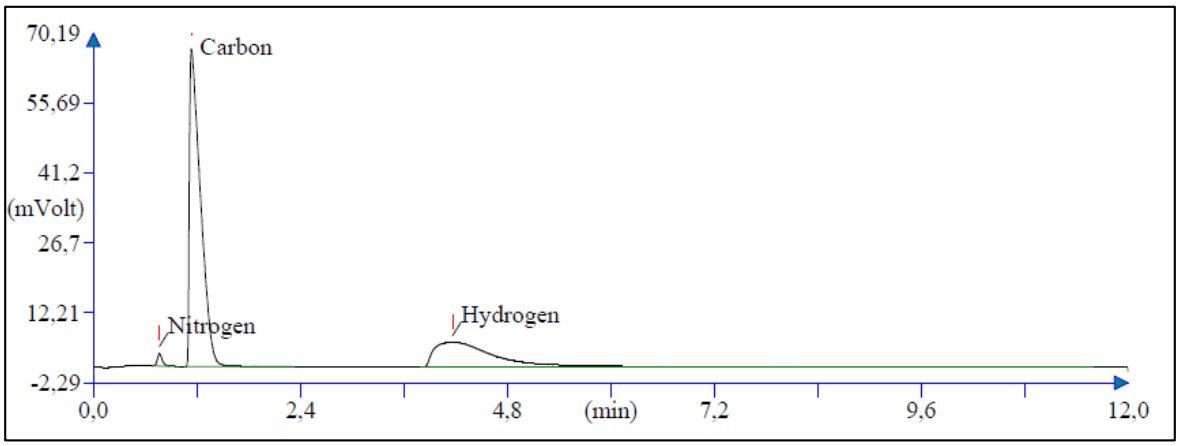

Figura E-32. Cromatograma de la muestra Borra 3.

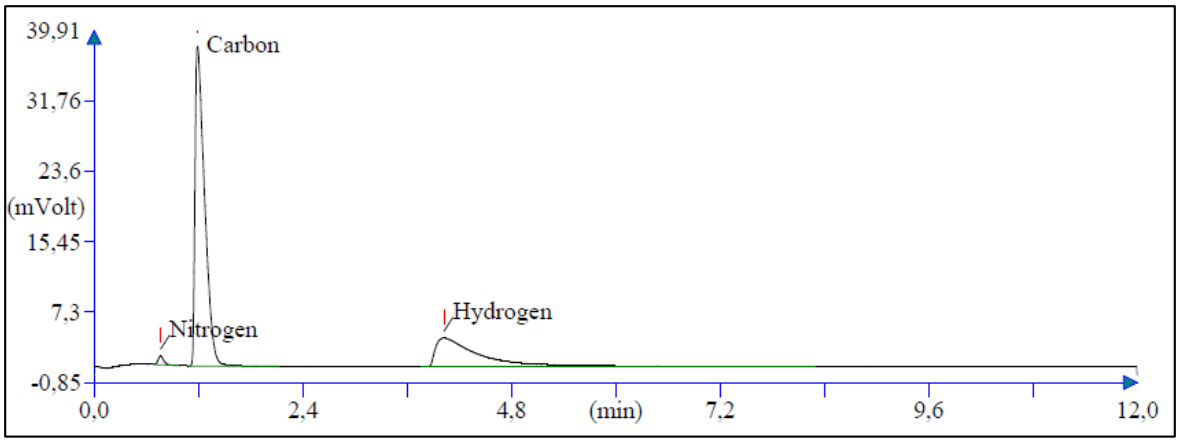

Figura E-33. Cromatograma de la muestra A24.

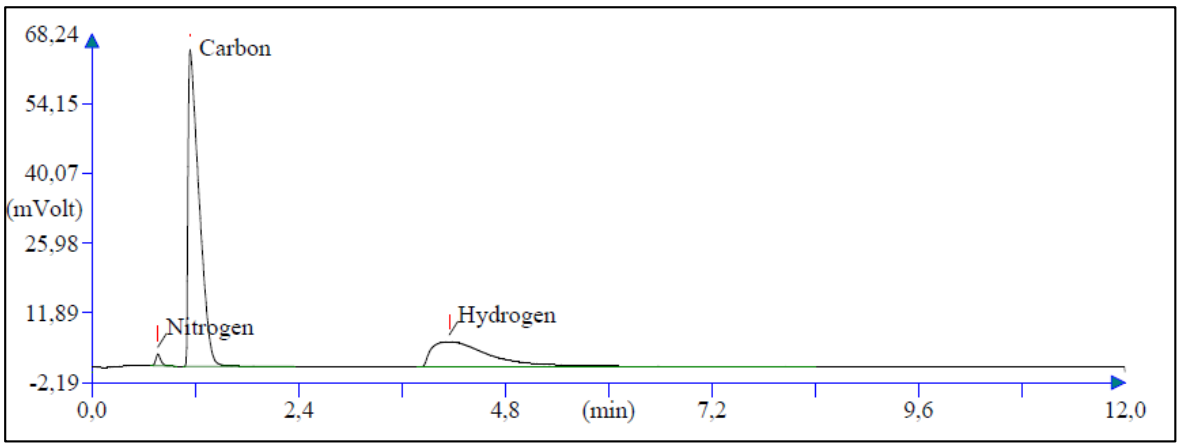

Figura E-34. Cromatograma de la muestra B24.

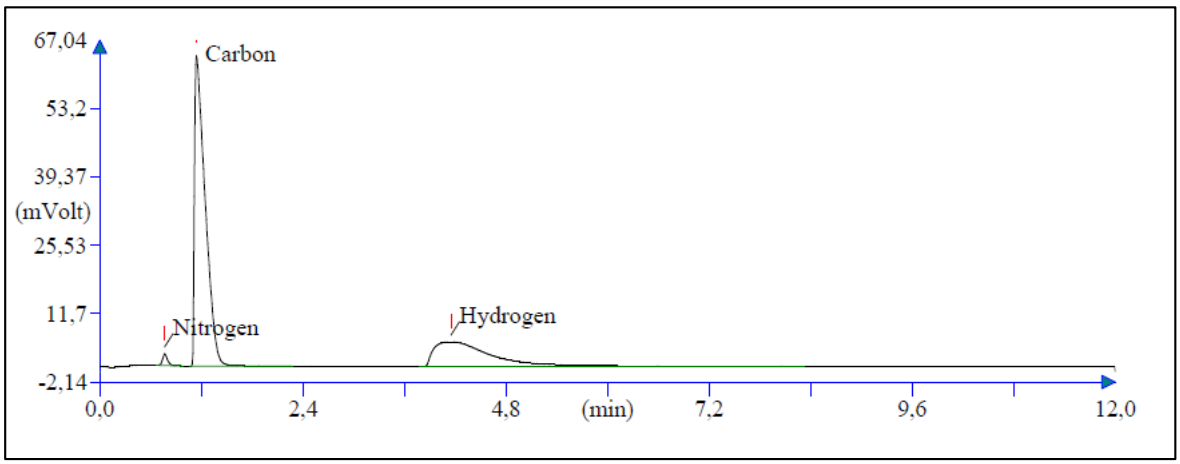

Figura E-35. Cromatograma de la muestra G24.