



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Caracterización del proceso de densificación de biomasa residual proveniente de Palma de Aceite Africana (Tusa)

Huber Cabrales Contreras

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Bogotá, Colombia
2016

Caracterización del proceso de densificación de biomasa residual proveniente de Palma de Aceite Africana (Tusa)

Huber Cabrales Contreras

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título
de:

Magister en Ingeniería Mecánica

Director (a):

Ph. D. Nelson Arzola de la Peña

Línea de Investigación:

Diseño Mecánico

Grupo de Investigación:

OptimUN

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Bogotá, Colombia

2016

**Bienaventurado el hombre que halla la sabiduría,
y que obtiene la inteligencia;
porque, su ganancia es mejor que la ganancia de la plata,
y sus frutos más que el oro fino.**

Salomón.

Agradecimientos

A Dios por su favor y bendición; a mis padres por su instrucción en mi camino; a la Universidad Nacional de Colombia por permitirme adquirir conocimiento; al profesor PhD. Nelson Arzola de la Peña por su dirección, gestión, asesoría y dedicación para llevar a buen fin la investigación realizada; a los estudiantes John Emerson Muñoz, Miller Fabián Barragán, David Eduardo Castillo, Jorge Andrés Quintero, David Leonardo Bernal Mora, Néstor Giovanni Yomayuzza Sierra, Julián Camilo Castro Rodríguez, Carlos Eduardo Caldas García, Cristian Walteros, Raúl Arguellos, Santiago Espinoza, Sergio Nicolás Espíndola de la asignatura Proyecto Aplicado de Ingeniería de la propuesta densificación de biomasa residual proveniente de Palma de Aceite Africana, por su colaboración en el diseño de la instalación experimental, puesta a punto y ensayos de caracterización.

Resumen

El presente estudio, sobre caracterización del proceso de densificación de biomasa residual proveniente de Palma de Aceite Africana (Tusa), busca obtener mediante la ejecución de un diseño experimental, un modelo empírico-estadístico que permita la caracterización del proceso de densificación de este tipo de biomasa y la identificación de los niveles apropiados para los factores experimentales seleccionados: contenido de humedad, longitud de fibra y tiempo de compactación del proceso de densificación. Por su parte, los parámetros del proceso de fabricación de las briquetas, temperatura y presión de compresión son fijados con valores 90 ± 3 °C y 97 ± 4 MPa respectivamente. De acuerdo a diversos investigadores, los factores arriba mencionados influyen de manera significativa en las propiedades mecánicas, como la densidad aparente, el índice de durabilidad y la resistencia a la compresión. Como resultado de esta investigación se obtienen como valores de referencia, para la obtención de briquetas con las mejores propiedades mecánicas, la combinación de un contenido de humedad de 8% b.h., longitud de fibra de 85 mm y un tiempo de compactación de 20 s; obteniéndose modelos estadísticos que logran explicar aceptablemente la influencia de los factores experimentales independientes en las propiedades mecánicas de las briquetas. Estas briquetas poseen un poder calorífico superior de 17 MJ/kg, obtenido mediante ensayo experimental y también mediante correlaciones empíricas. Finalmente, a varias briquetas se le realiza análisis de composición química encontrando presencia de Carbono en 42%, Oxígeno en aproximadamente 51%, Hidrógeno en 6% y Nitrógeno en 1%. También, se realiza ensayo para la obtención del contenido de azufre y cenizas, obteniéndose como resultado <1% y 6% respectivamente. De todos los resultados es posible concluir que las briquetas fabricadas con los mejores valores para los factores experimentales, cumplen con los requisitos mecánicos y térmicos que se exigen en casi todas las normas más representativas para briquetas de biomasa.

Palabras clave: 1) Tusa. 2) Contenido de humedad. 3) Longitud de fibra. 4) tiempo de compactación. 5) Densidad aparente. 6) Índice de durabilidad. 7) Resistencia a la compresión. 8) Lignina.

Abstract

The present study, on the characterization of the process of densification of residual biomass from African Oil Palm (Tusa), seeks to obtain, through the execution of an experimental design, an empirical-statistical model that allows the characterization of the densification process of this type of Biomass and the identification of appropriate levels for the selected experimental factors: moisture content, fiber length and compaction time of the densification process. On the other hand, the parameters of the process of manufacture of the briquettes, temperature and pressure of compression are fixed with values 90 ± 3 °C and 97 ± 4 MPa respectively. According to several researchers, the above factors have a significant influence on mechanical properties, such as bulk density, durability index and compressive strength. As a result of this investigation, the combination of a moisture content of 8% b.h., a fiber length of 85 mm and a compaction time of 20 s are obtained as reference values for obtaining briquettes with the best mechanical properties. Obtaining statistical models that manage to explain acceptably the influence of independent experimental factors on the mechanical properties of briquettes. These briquettes have a higher calorific value of 17 MJ/kg, obtained by experimental test and by empirical correlations. Finally, several briquettes are tested for chemical composition with a presence of Carbon in 42%, Oxygen in approximately 51%, Hydrogen in 6% and Nitrogen in 1%. Also, a test is carried out to obtain the sulfur and ash content, resulting in <1% and 6% respectively. Considering all the mentioned results, in this work we conclude that the briquettes manufactured with the best values for the experimental factors, comply with the mechanical and thermal specifications in almost all the most representative standards for biomass briquettes.

Keywords: 1) Cob. 2) Moisture content. 3) Fiber length. 4) Compaction time. 5) Apparent density. 6) Durability Index. 7) Resistance to compression. 8) Lignin.

Contenido

	Pág.
1. Capítulo: Estado del arte	7
1.1 Investigaciones sobre caracterización de las propiedades mecánicas y físicas de la biomasa densificada.....	7
1.2 Investigaciones sobre caracterización de las propiedades térmicas de la biomasa densificada.....	11
1.3 Métodos para la densificación de biomosas.....	13
1.3.1 Principio de prensado por compresión o contricción.....	13
1.3.2 Principio de prensado por impacto.....	15
1.3.3 Principio de prensado por extrusión.....	16
1.4 Normas empleadas en la caracterización y aseguramiento de la calidad de biomasa densificada.....	17
2. Capítulo: Diseño experimental	27
2.1 Preguntas de la investigación.....	27
2.2 Modelo del material subjetivo.....	27
2.2.1 Factores de tratamiento.....	28
2.2.2 Variables secundarias.....	30
2.2.3 Factores de clasificación.....	32
2.3 Formulación del problema estadístico.....	34
2.3.1 Error de tratamiento.....	34
2.4 Desarrollo del diseño experimental.....	35
2.4.1 Diseño del tratamiento.....	35
2.4.2 Estructura y selección de los tratamientos.....	36
2.4.3 Diseño de la instalación experimental.....	40
2.5 Diseño del control de error.....	44
2.5.1 Diseño de muestreo y observaciones.....	44
2.6 Ensayos y mediciones.....	45
2.6.1 Procedimiento para la medición del contenido de humedad de la biomasa residual basado en ASTM E 871.....	45
2.6.2 Procedimiento de medición de densidad aparente de biomasa.....	46
2.6.3 Procedimiento de medición de resistencia a la compresión.....	47
2.6.4 Procedimiento para determinación de la durabilidad de briquetas de biomasa basado en la norma ASTM E 1288.....	48
2.6.5 Procedimiento de determinación de porcentaje de cenizas basado en la norma ASTM E 1755.....	49
2.6.6 Procedimiento de determinación de poder calorífico basado en la norma ASTM D 240.....	50
3. Capítulo: Análisis y discusión de resultados	51
3.1 Análisis de propiedades mecánicas.....	51
3.1.1 Análisis con estéreo microscopía y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	60
3.2 Análisis de composición química y propiedades térmicas.....	66
4. Análisis del impacto ambiental y socio-económico	75

4.1	Contexto y problemática socio-económica y ambiental del sector palmero	75
4.2	Prospectiva económica para el sector palmero sobre la densificación de la tusa 81	
5.	Conclusiones y trabajo a futuro	89
6.	Bibliografía	133

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1. Muestras realizadas en la cara de trabajo del rodillo por el fabricante Bepex. Tomada de Bepex [31].	¡Error! Marcador no definido.
Figura 1-2. Briqueteadora de rodillos perpendiculares. Tomado de briquetadora Bepex [31].	14
Figura 1-3 Prensa briquetadora de rodillos paralelos. Tomado de [32].	15
Figura 1-4. Esquema de prensa briquetadora de pistón con sistema biela-manivela. Adaptado de [34].	15
Figura 1-5. Esquema de acción tomado de comparación de tecnologías de prensa briquetadora [35].	16
Figura 1-6. Esquema de prensa briquetadora de tornillo sinfín [35].	17
Figura 2-1. Codificación de factores de clasificación y briquetas fabricadas para contenidos de humedad de 16% b.h. y 8% b.h. Fuente: Autor.	30
Figura 2-2. Biomasa residual de tusa. Fuente: Autor.	37
Figura 2-3. Separación, secado y corte de fibras de tusa. Fuente: Autor.	38
Figura 2-4. Prensado de tusa. Fuente: Autor.	39
Figura 2-5. Prensa briquetadora. Fuente: Autor.	37
Figura 2-6. Modelo de caja negra para prensa briquetadora. Fuente: Autor.	39
Figura 2-7. Curva esfuerzo-deformación. Adaptada de ASTM E 9-89a [56].	47
Figura 2-8. Ensayo de resistencia a la compresión. Fuente: Autor.	48
Figura 3-1. Grafica de efectos principales para densidad aparente. Fuente: Autor	48
Figura 3-2. Gráfica del área de influencia de variables dependientes en densidad aparente. Fuente: Autor.	48
Figura 3-3. Diagrama de Pareto estandarizada para Da.	50
Figura 3-4. Gráfica de efectos principales para índice de durabilidad. Fuente: Autor.	55
Figura 3-5. Superficie de comportamiento de factores de tratamiento para índice de durabilidad. Fuente: Autor.	56
Figura 3-6. Diagrama de Pareto estandarizado para índice de durabilidad. Fuente: Autor.	57
Figura 3-7. Efectos principales para resistencia a la compresión. Fuente: Autor.	58
Figura 3-8. Gráfica de superficie de resultados para resistencia a la compresión. Fuente: Autor.	59
Figura 3-9. Diagrama Pareto estandarizada para resistencia a la compresión. Fuente: Autor.	60
Figura 3-10. Estereomicroscopía de Briquetas. Fuente: Autor.	56
Figura 3-11. Microscopía de barrido Electrónico Briqueta de 16% b.h. de contenido de humedad, 85 mm de longitud de fibra y 20 s de tiempo de compactación. Fuente: Autor.	58
Figura 3-12. Microscopía electrónica de barrido para briqueta con 8% b.h. de contenido de humedad, 85 mm de longitud de fibra y 20 s de tiempo de compactación. Fuente: Autor.	59

Figura 3-13. Microscopía electrónica de barrido para briqueta con 8% b.h. de contenido de humedad, 50 mm de longitud de fibra y 20 s de tiempo de compactación. Fuente: Autor.	66
Figura 3-14. Resultado de análisis elemental para cultivo proveniente de Fundación. Fuente: Autor.	67
Figura 3-15. Resultado de análisis elemental para cultivo Sabana de Torres.	68
Figura 3-16. Resultado de análisis elemental para cultivo Puerto Gaitán.	69
Figura 4-1. Evolución histórica anual de fruto procesado en Colombia. Adaptado de Fedepalma- Sispa, fecha de corte 4 de abril del 2016 [5].	77
Figura 4-2. Evolución histórica de precios de productos de Palma de Aceite. Adaptado de Fedepalma-Sispa, fecha de corte el 4 de abril del 2016 [5].	76
Figura 4-3. Esquema de planta para densificación. Fuente: Autor.	86
Figura G-1. Modelo de Caja Gris para diseño conceptual de Prensa Briqueteadora	107
Figura H-1. Diagrama de funciones del proceso.	108
Figura J-1. Plano de prensa briqueteadora.	104
Figura O-1. Cultivos de Palma de Aceite en Colombia [5].	120
Figura S-1. Gráfico de tasa interna de retorno con línea de equilibrio del proyecto. Fuente: Autor.	132

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1. Valores caloríficos de biomásas y razón energética entre energía utilizada vs. energía obtenida	7
Tabla 1-2. Especificaciones de DIN 51731 para fabricación de pellets y briquetas.....	18
Tabla 1-3. Especificaciones de pellets y briquetas de madera con y sin ceniza, tomado de norma ÖNORM M 7135	18
Tabla 1-4. Especificaciones de pellets y briquetas del Comité de Norma Europea CEN/TC 335 -2004	19
Tabla 1-5 Especificaciones de pellets y briquetas de la recomendación francesa para biocombustibles ITEBE.....	20
Tabla 1-6. Especificaciones de pellets y briquetas del estándar italiano para biocombustibles CTI-R04/05 [38].	22
Tabla 1-7. Especificaciones de pellets y briquetas según norma sueca para biocombustibles SS187120 [38].	23
Tabla 3-1. Tabla de resultados de análisis elemental para cultivo Fundación.	67
Tabla 3-2. Tabla de resultados de análisis elemental para cultivo Sabana de Torres.....	68
Tabla 3-3. Tabla de resultados de análisis elemental para cultivo Puerto Gaitán.	69
Tabla 3-4. Poder calorífico por cultivo.	65
Tabla 3-5. Cálculo de HHV basado en análisis próximo.	66
Tabla 3-7. Cálculo de valores de poder calorífico basado en correlaciones.	67
Tabla 4-1. Ventajas y desventajas de las Cooperativas de Trabajo Asociado desde el punto de vista laboral, según fundación Konrad Adenauer [62].	79
Tabla 4-2. Poder calorífico de biomásas diferentes a tusa [76, 77, 78, 79].	79
Tabla A-1. Listado de plantas extractoras de Colombia según censo de FEDEPALMA [5].	95
Tabla B-1. Sub-problemas diseño	97
Tabla C-1. Sub-problemas de proceso.	99
Tabla D-1. Sub-problemas de manufactura.....	100
Tabla E-1. Matriz TRIZ.	101
Tabla F-1. Solución de sub-problemas.....	103
Tabla I-1. Tabla de soluciones a funciones.	109
Tabla L-1. Resultados Propiedades Mecánicas cultivo Zona Norte.....	117
Tabla M-1. Resultados Propiedades Mecánicas Zona Central	118
Tabla N-1. Resultados cultivo Zona Oriental.	119
Tabla P-1. Efectos estimados para Densidad Aparente (gr/cm ³).....	121

Tabla P-2. Análisis de Varianza para Densidad Aparente.	121
Tabla P-3. Coeficiente de regresión para densidad aparente.	122
Tabla Q-1. Efectos estimados para Índice de durabilidad (%).	123
Tabla Q-2. Análisis de Varianza para Índice de Durabilidad.	123
Tabla Q-3. Coeficiente de regresión para Índice de Durabilidad.	124
Tabla R-1. Efectos estimados para resistencia a la compresión (kN).	125
Tabla R-2. Análisis de varianza para resistencia a la compresión.	125
Tabla R-3. Coeficiente de regresión para resistencia a la compresión.	126
Tabla R-4. Cálculo de inversión inicial.	129
Tabla R-5. Costo anual de operación.	130

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
A_d	Arreglo de datos	---	Ec. 2-1
a	Tiempo de combustión	s	
% Ash	Porcentaje de cenizas	%	
b	Tiempo para que la temperatura llegue al 60%	s	Ec. 2-5
c	Tiempo de inicio hasta que la temperatura alcanza su valor constante.	s	Ec. 2-5
C_{max}	Resistencia a compresión		Ec. 3-3
D_a	Densidad aparente		Ec. 3-1
F	Variables independientes esenciales	---	Ec. 2-1
ID	Índice de durabilidad		Ec. 3-2
LF	Longitud de fibra	mm	Fig.3-3
N	Niveles de valores	---	Ec. 2-1
R	Numero de réplicas	---	Ec. 2-1
M_{ash}	Tasa de cambio después que se ha alcanzado T_c	gr	Ec. 1-4
M_{cont}	Corrección del aumento de temperatura	gr	Ec. 2-5
M_{od}	Temperatura en el tiempo de combustión	°C	Ec. 2-5
r_1	Tasa de cambio de temperatura durante los primeros 5 min	°C/min	Ec. 2-5
r_2	Tasa de cambio después del tiempo c	°C/min	Ec. 2-5
T_a	Tasa de cambio después que se ha alcanzado T_c	°C/min	Ec. 2-5
T_c	Corrección del aumento de temperatura	°C	Ec. 2-5
T_i	Temperatura en el tiempo de combustión	°C	Ec. 2-5
T_f	Temperatura en el tiempo de inicio	°C	Ec. 2-5
W	Contenido de humedad	%	
W_c	Masa del contenedor	gr	Ec. 2-2
W_i	Masa inicial de la muestra	gr	Ec. 2-2
W_f	Masa final de la muestra	gr	Ec. 2-2

Subíndices

Subíndice	Término
d	Datos
max	Maxima
od	Tiempo de combustion
c	Recipiente/contenedor
i	Inicial
f	Final

Abreviaturas

Abreviatura	Término
APE	Alianzas Productivas Estratégicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
Da	Densidad Aparente
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DCA	Diseño Completamente Aleatorio
DME	Éter Dimetílico
F	Factor
FEDEPALMA	Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite
LF	Longitud de Fibra
NR	Número de Replicas
SEM	Scanning Electron Microscope
SISPA	Sistema de Información Estadística del Sector Palmero
TC	Tiempo de Compactación
TGA	Thermal Gravimetric Analysis
TEP	Tonelada Equivalente de Petróleo
UN	Universidad Nacional de Colombia
UE	Unidades experimentales
UO	Unidades Observacionales
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética
VAN	Valor Agregado Neto
W	Contenido de Humedad
C	Zona de Cultivo

Abreviatura **Término**

Introducción

La reducción de gases de efecto invernadero se requiere como medida para la disminución de efectos del cambio climático. Estudios muestran que la utilización de biomásas para la producción de combustibles, como sustitutos de combustibles derivados del petróleo y carbón; lograrían disminuir la producción de CO_2 [1]. Carburantes como metanol, DME y etanol solo pueden reducir en un 50% la emisión de los gases y a un costo mayor. La utilización de biomasa proveniente de residuos de la Palma de Aceite (*Elaeis Guineensis*) reducirían las emisiones de CO_2 de 17,4 toneladas-gramo C/año a 12,6 toneladas-gramo C/año y de 350 PJ de petróleo/año a 230 PJ de petróleo/año. Es decir, el 72 % y 67 % de las reducciones respectivamente, obteniéndose un beneficio monetario de 45 millones de euros/año [2]. Además, los metoxifenoles liberados durante la quema de biomásas pueden contrarrestar los riesgos de salud de los hidrocarburos cromáticos debido a su efecto antioxidante; de igual manera, los hidrocarburos aromáticos producidos durante la combustión de hidrocarburos, liberan benceno cancerígeno como compuesto aromático predominante [3].

La biomasa es potencial fuente energética proveniente de materia orgánica renovable de origen animal, vegetal, o producto de la transformación artificial o natural [1]. La biomasa residual posee un alto potencial de aprovechamiento debido a su bajo costo, alta oferta y sostenibilidad del cultivo [4]. El proceso de extracción de fruta o corozo de Palma Africana de Aceite (*Elaeis guineensis*) produce biomasa residual, entre las cuales, se encuentra la tusa o raquis; el volumen de producción en Colombia de racimos o fruta de palma de aceite se encuentra en seis millones de toneladas por año aproximadamente; lo anterior, equivale a 3467 TEP de petróleo o a 9380 MW/h-mes de energía eléctrica equivalente (considerando la eficiencia global de conversión a energía eléctrica). Se extraen según el último censo de Fedepalma 8682 t/h de fruto de palma de aceite africana en 43 plantas

instaladas en el país; de las cuales, 1755 t/h son biomasa residual de Palma de Aceite Africana (Tusa) [5]. Aclarando, que del total de la fruta procesada el 20,22 % corresponde a Tusa, el 13,65 % a Fibra del mesocarpio y el 5,63 % a Cuesco [6]. Advirtiéndose, que en el 2011 se procesaron en Colombia 4 613 805 toneladas de fruta de Palma Africana y para el 2015 se incrementó hasta 6.252.774 toneladas, para un 35 % más; puntualizando, que el aumento ha sido del 1,29 % para el 2012, 8,12 % para el 2013, 7,9 % para el 2014 y 14,64 % para el 2015; agregando, que la causa de los incrementos variables ha sido la entrada y salida de cultivos a su etapa de producción y la presencia de enfermedades en los cultivos en algunas regiones [5]. Por lo tanto, la cantidad de biomasa residual proveniente de Palma de Aceite Africana producida en el 2015 fue de 1 264 311 toneladas de Tusa, 853 504 toneladas de fibra del mesocarpio y 352 031 toneladas de cuesco [6].

En la actualidad la Tusa es utilizada como abono para las plantaciones; siendo depositado entre las líneas de los cultivos de Palma de Aceite Africana. El transporte de la tusa a los cultivos resulta en compactación de los suelos donde se encuentran los cultivos, trayendo como consecuencia disminución en la producción de fruta de palma de aceite o corozo. Un segundo factor negativo de la deposición de la tusa entre líneas de cultivo es la obstaculización que produce para las labores de cosecha. Adicionalmente, el tiempo de descomposición de la tusa en abono es de 4 a 6 meses.

A continuación, se relacionan valores de propiedades de briquetas para biomásas de madera; lo anterior para realizar comparación con los datos experimentales que se obtengan para la tusa; siendo estos valores para briquetas de biomásas de corteza de Eucalipto y Pino utilizadas en la producción de combustibles poseen un poder calorífico de 18,4 MJ/kg, densidad aparente de $0,32 \frac{kg}{dm^3}$ y 50-55 % b.h. de humedad dependiendo de la zona de procedencia [7].

Por su baja densidad, el transporte y almacenamiento de la tusa aumenta el costo de su utilización; además, el alto contenido de humedad produce el deterioro acelerado en un tiempo de 24 a 48 horas. Los factores expuestos anteriormente plantean la necesidad de la utilización de una materia prima para la producción de combustible que sea renovable, con bajas emisiones de CO_2 y SO_x cuyo costo de utilización sea competente con los combustibles actuales, generando un poder calorífico similar. Una alternativa a la problemática generada es la utilización de un porcentaje de tusa producida en las 43 plantas extractoras existentes en Colombia [5]. Pero para que la tusa pueda ser utilizada

en la producción de combustible a un costo competitivo, con relación a los combustibles derivados del petróleo, se requiere una caracterización de su proceso de densificación, con un previo secado, para evitar su deterioro prematuro.

Debido a lo anterior, para la utilización de la tusa en la producción de combustible a un costo competitivo, con relación a los combustibles derivados del petróleo; se requiere, una caracterización de su proceso de densificación con un previo secado, siendo el valor objetivo del porcentaje de humedad inferior al 15% [8]. Para que este proceso se pueda llevar a una escala industrial se requiere la parametrización de cada una de las variables involucradas; así como, el nivel de influencia de estas en los resultados obtenidos. De la revisión del Estado del Arte se concluye que no existe a la fecha una investigación integral que permita definir la influencia que poseen los parámetros de preparación de la tusa, como son la longitud de fibra y la humedad, y del proceso de densificación, como es el tiempo de sostenimiento de la presión de compactación, sobre la calidad final de las briquetas fabricada con tusa de Palma de Aceite Africana. De manera que se identifica la necesidad de llevar a cabo un estudio estadístico experimental que permita encontrar el modo en que estos parámetros; tanto de la biomasa como del proceso influyen en la calidad final de la tusa densificada; además, encontrar los mejores valores de los parámetros con los cuales se logra un proceso de densificado mejorado y orientado a la calidad de las briquetas. Para ello se plantea el uso de un diseño experimental con el cual se pueda comprender como los factores principales que definen a la biomasa (tusa) y al proceso inciden en los parámetros de respuesta los cuales caracterizan la calidad del biocombustible obtenido (Ej.: densidad aparente, índice de durabilidad, resistencia mecánica, propiedades térmicas, emisiones, entre otras), y alcanzar explicaciones sustentadas en evidencia experimental sobre el fenómeno de densificado.

El objetivo general de la investigación es obtener mediante un diseño experimental un modelo empírico-estadístico que permita la caracterización del proceso de densificación de tusa de Palma de Aceite Africana, y la identificación de los niveles apropiados para los factores experimentales con los cuales se obtienen las mejores propiedades de calidad para el biocombustible densificado. Adicionalmente, como objetivos específicos se pretende identificar los procesos de densificación de biomasa actuales idóneos, y la normatividad subyacente a la producción de briquetas; además, desarrollar el diseño

conceptual, diseño detallado e implementación de una instalación experimental apropiada para los fines de la investigación; asimismo, planear un modelo de diseño experimental que permita el estudio de los principales indicadores de calidad (físicos y mecánicos) para el material densificado y la influencia sobre estos en los parámetros independientes, tales como: presión de compresión, porcentaje de humedad, longitud de fibra y temperatura; igualmente, analizar el impacto ambiental y socioeconómico de la densificación de biomasa proveniente de tusa de Palma de Aceite Africana, con el fin de emitir un sistema de recomendaciones para la implementación a futuro de los resultados experimentales a escala industrial.

La metodología a desarrollar durante la investigación inicia con una exhaustiva revisión de los trabajos publicados en artículos, congresos y proyectos de investigación relacionados con el objeto de estudio; plasmando los procedimientos y resultados relevantes en el Estado del Arte, con el objeto de contextualizar y enmarcar la investigación a realizar. Serán de interés estudios en los cuales se escudriñó la caracterización de biomásas densificadas respecto a propiedades mecánicas, térmicas y la metodología de densificación. En el segundo capítulo, se plantea el diseño experimental donde se mencionan las mediciones y su normatividad; las cuales, se han realizado para parametrizar física, térmica y mecánicamente las briquetas obtenidas. Igualmente, se identificarán los procedimientos y equipos utilizados en la caracterización de las briquetas. En el tercer capítulo, se realiza el análisis de resultados de las mediciones realizadas a las variables de porcentaje de humedad, longitud de la fibra y tiempo de compactación; así como, su incidencia en la densidad aparente, índice de durabilidad y resistencia a la compresión; tabulando, los datos obtenidos en los anexos. Por último, en el cuarto capítulo se presentan las conclusiones de la investigación, siendo los valores ideales de las variables independientes: 8 % b.h. para contenido de humedad; 85 mm de longitud de fibra y 20 s para tiempo de compactación. Con estos valores se obtienen briquetas de Tusa con $0,842 \text{ g/cm}^3$ de densidad aparente; 99,83 % de índice de durabilidad y 35,7 kN de resistencia a la compresión. Por otra parte, se destaca la viabilidad de realizar el montaje de una planta de densificación con una inversión inicial de COP\$ 1 227 000 000, y una tasa de retorno a 5 años del 21 %; lo cual, exhibe la importancia de la investigación realizada.

El presente estudio permitirá la caracterización a nivel experimental del proceso de densificación de la tusa de palma de aceite, con el fin de allanar el camino hacia la

implementación a gran escala de la actividad de briqueteado de la biomasa proveniente de Palma de Aceite Africana, para su uso como biocombustible. Este nuevo biocombustible puede convertirse en un nuevo subproducto con valor agregado para la agroindustria palmera, redundando en beneficios socioeconómicos, ambientales y de competitividad empresarial.

1. Capítulo: Estado del arte

En este Capítulo se muestran las contribuciones de estudios realizados sobre búsqueda de rangos de valores de propiedades físicas y mecánicas para biomasas similares a la tusa de Palma Africana, con el objeto de establecer parámetros para el diseño experimental; permitiendo la depuración de valores de baja influencia en las características de calidad fundamentales, tales como, densidad aparente, resistencia a la compresión y durabilidad. Asimismo, realizar un estudio de las normas y estándares que permitan establecer procedimientos ideales para la caracterización de los parámetros de densificación de biomasas.

1.1 Investigaciones sobre caracterización de las propiedades mecánicas y físicas de la biomasa densificada

Es fundamental contar con una caracterización mecánica y física de las briquetas de tusa con el propósito de determinar el comportamiento de la densidad aparente, índice de durabilidad y resistencia a la compresión con los factores experimentales significativos. Escudriñando la bibliografía respecto a las propiedades mecánicas se encuentra que las variables de mayor influencia en la durabilidad de las briquetas, según estudio realizado por Carone et al. [9] basado en análisis univariado y multivariado de densidad, resistencia a la compresión y módulo de elasticidad, en su grado de influencia de mayor a menor son: temperatura, contenido de humedad, tamaño de las partículas y fuerza de compresión [9].

Además, la unión natural de fibras a través de la humedad y temperatura en el rango de transición vítrea es primordial para la producción de briquetas con alta durabilidad [10]. Es de considerar, que la mayor durabilidad para la biomasa proveniente de sorgo se produce cuando el contenido de humedad se encuentra entre el 9 y el 14 % b.h. [11]. Paralelamente, Gil et al. [12] concluye en su estudio sobre durabilidad mecánica de pellets de biomasa proveniente de cáscara de café, que su valor máximo se presenta cuando el porcentaje de humedad se encuentra entre 5 al 20 % b.h.; advirtiendo, que las briquetas con porcentaje de durabilidad bajos presentan mecanismos de fallas de alta energía; lo cual es consecuencia según Stelte et al. [13] al flujo de lignina e inter-difusión entre partículas adyacentes.

A la par de la caracterización del contenido de humedad, se requiere caracterizar la densidad de las briquetas; para lo cual, se debe realizar la medición de la densidad aparente a través por ejemplo del método del desplazamiento de líquido. Existen dos clases de procedimientos, los cuales se diferencian por el de uso y no uso de agente humectante para disminuir la tensión superficial. El que emplea agente humectante presenta las desventajas de absorción del líquido usado, debido a propiedades higroscópicas del material y la generación de burbujas producto de la tensión superficial. Los resultados obtenidos muestran una leve variación entre las mediciones realizadas usando agente humectante, respecto a las que no usaron humectante [11, 14]. Asimismo, Sosa et al. [15] en su estudio sobre la influencia de la humedad en el proceso de transporte y almacenamiento en biomásas de madera obtiene un valor para densidad aparente de 377 kg/m^3 . Por su parte, Shahrukh et al. [16] en su investigación contempla la relación de energía para la producción de pellets de madera y comenta que la densidad aparente alcanzada es de 600 a 800 kg/m^3 .

El proceso de densificación de biomásas como la cascara de arroz, bagazo de caña de azúcar y trozos de maderas, se puede realizar adicionando aglutinantes como carbohidratos solubles en agua, cuyo porcentaje en las biomásas mencionadas se encuentran usualmente entre 2,2 y 7,9 % volumen, lignina de 8,8 a 9,2 %, proteínas de 3,6 a 3,9 % y almidón entre 0,4 y 3 % [17]. Estos rangos de valores ideales para la mezcla se

obtuvieron de un estudio de durabilidad por medio de un análisis micro-estructural utilizando Microscopia de Barrido Electrónico (MEB), cuya fabricación de briquetas se realizó por medio del principio de impacto con pistón [10]. Posteriormente, Sakkampang et al. [16] en investigación sobre la viabilidad en la utilización de la mezcla de glicerina y biomasa, como aglutinante alternativo durante el proceso de densificación y la energía obtenida a partir de las briquetas fabricadas, plantea la relación beneficio/costo energético. Dicho planteamiento se realiza para las biomásas provenientes de cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar; siendo, relevante en los resultados de proporción 1 a 3, para la energía utilizada contra la energía obtenida, con una condición de secado en el intervalo de 12 % a 18 % b.h. [18]. En otros estudios, como el realizado por Kaliyan et al. [19] se mezcla biomasa y aglutinante para aumentar el poder calorífico de la briqueta; siendo, una opción el uso de melaza y glicerina. Se destaca el hecho de que la adhesión de la mezcla es posible debido a la existencia de mecanismos de unión entre partículas, con enlaces como fuerzas de Van Der Waals y puentes de hidrógeno y sin enlace como fuerzas electrostáticas y magnéticas; logrando, en cualquiera de los dos mecanismos una adhesión sólida de las briquetas [19]. En la Tabla 1-1 se muestran valores de poder calorífico de biomásas utilizando como aglutinante glicerina.

Tabla 1-1. Poder calorífico superior de pellets de biomasa y razón energética entre energía utilizada vs. energía obtenida [26].

Biomasa	Poder Calorífico (MJ/kg)	Relación de proporción entre energía obtenida/ energía utilizada
Cascara de arroz	13,26-15,94	14,74-17,64
Aserrín	16,78-18,96	12,13-13,64
Bagazo de caña de azúcar	15,77-18,19	14,12-16,17
Hoja de caña de azúcar	17,72-19,59	13,88-15,29

Adicionalmente a la caracterización térmica y mecánica, se requiere parametrizar físicamente las briquetas de biomasa residual proveniente de Palma de Aceite Africana. A continuación, se desglosan los trabajos realizados teniendo en cuenta que existe interdependencia de variables dentro del proceso de densificación de biomasa. Por ende, para alcanzar una durabilidad mecánica del 95,5 % el porcentaje de humedad para biomasa de paja se debe encontrar en el rango de 6 al 8 % b.h.; asimismo, si se humecta logrando un porcentaje de 10 % b.h. la durabilidad se incrementa entre un intervalo de 97 al 98 % [20]; advirtiéndose, que valores de contenido de humedad elevados requieren una mayor potencia de prensado para la elaboración de las briquetas [21]. Por lo tanto, la reducción del porcentaje de humedad debe realizarse por lo menos hasta un 15 % b.h. [18]. Stelte et al. [13] adicional a su estudio de mecanismos de falla de las briquetas realiza una investigación sobre los costos de manipulación y los resultados de usar un combustible con mayor homogeneidad estructural. Por lo que, su enfoque es la integridad de gránulos y mecanismos de adherencia entre estos empleando distintos tipos de maderas duras y blandas, encontrando que el proceso de densificación se produce por la plastificación; ocasionando un Módulo de Young bajo en las briquetas; encontrando que pellets fabricados a temperaturas altas tienen mayor resistencia que los pellets a temperatura ambiente, debido a la plastificación que produce la activación de la lignina presente en la biomasa; evidenciando, que el proceso de densificación produce activación de la lignocelulosa debido a su bajo punto de fusión (140 °C). Lo anterior produce durante el proceso, cizallamiento de la biomasa, aumento de la temperatura, mayor tiempo de residencia y desnaturalización de las proteínas presentes debido a la pérdida de agua [9]. Lo anterior conlleva como sugerencia para la producción de pellet de alta calidad que la temperatura de prensado sea entre 100 °C y 150 °C, la presión de compresión de 100 a 180 MPa y el contenido de humedad de aproximadamente 10 % b.h. [9]. Es de aclarar, que la presión de densificación aumenta exponencialmente con la longitud del pellet o biqueta; la tasa de aumento es función de la especie de biomasa, temperatura, contenido de humedad y tamaño de la fibra. Asimismo, el aumento de la temperatura produce disminución en la presión de densificación y activación de la lignina; debido a la disminución de la tensión entre las fibras de la biomasa; es así como, presiones de compresión superiores a 120 MPa para el proceso de densificación proporcionan

incrementos poco significativos en la densidad [22]. Mani et al. [23] en su estudio realizado sobre biomásas provenientes de maíz concluye que la mayor densidad se consigue con bajas presiones próximas a 100 MPa y tamaños de reducidos entre 50 a 75 mm. Por lo tanto, la densidad es función del tamaño de la partícula.

Para realizar la densificación se requiere separar las fibras de cascara de arroz y bagazo de caña de azúcar para evitar su descomposición y realizar un secado buscando disminuir el contenido de humedad hasta un 15 %. Al respecto, Sakkampang et al. [18] concluye en su estudio sobre la energía consumida en el proceso de briqueteado de cascara de arroz y bagazo de caña de azúcar, que la energía empleada en el secado de la biomasa es la de mayor porcentaje de todo el proceso de fabricación de briquetas, principalmente por el contenido de humedad inicial, que representa alrededor del 50 %. En este sentido, se plantea la necesidad de usar un procedimiento de secado por exposición al medio ambiente o uso mixto (calderas y hornos) para minimizar los costos energéticos.

1.2 Investigaciones sobre caracterización de las propiedades térmicas de la biomasa densificada

La caracterización de briquetas de biomasa residual para su utilización como materia prima se basa en sus propiedades térmicas, mecánicas y físicas. Teniendo en cuenta lo anterior, se realiza una investigación bibliográfica exhaustiva sobre las materias primas con composición química similar a la tusa de Palma de Aceite Africana; entre la cuales, se encuentra la madera blanda, por lo que se esperan poderes caloríficos cercanos entre las briquetas de ambos biomateriales. El poder calorífico superior base húmeda de los pellets de maderas blandas oscila entre 19,6 a 20,3 MJ/kg y los de maderas duras entre 17,6 a 20,8 MJ/kg [24, 25]; de igual manera, otras biomásas como residuos de algodón y hojas poseen poder calorífico de 20 a 26 MJ/kg [26, 14]. Asimismo, la tusa está compuesta por centenares de fibras similares a la paja de cebada; Serrano et al. [20] en su investigación sobre la influencia de las variables en la calidad de pellets de paja de cebada; concluye, que la peletización produce una disminución insignificante en el poder calorífico de la biomasa, siendo este porcentaje de reducción alrededor del 2 %; lo anterior debido a una

ligera disminución de lignina durante el proceso de plastificación; razón por la cual, el proceso de densificación conlleva mayores beneficios en costos por transporte y almacenamiento que pérdidas por densificación. Adicionalmente, Serrano et al. [20] comenta que no se encontraron diferencias en la emisión de material volátil entre material densificado y no densificado. Es de considerar, que los combustibles provenientes de biomasa residual tienen menor proporción de carbono que los combustibles derivados del petróleo y mayor proporción de oxígeno e hidrógeno; advirtiendo, que la energía de los enlaces carbono-carbono es mayor que la energía del enlace carbono-oxígeno; por lo tanto, el poder calorífico en los combustibles derivados del petróleo será superior a los provenientes de biomasa; tales como, tusa de Palma Africana [12]. La lignina posee una energía de activación liberada por reacciones químicas comprendida entre 80 a 200 kJ/mol; aclarando, que la estabilidad del compuesto es directamente proporcional al valor de la energía de activación, de allí su importancia; lo cual, es considerado bajo por el material volátil presente y sus enlaces débiles [25].

Una vez evaluado el poder calorífico se requiere conocer los tiempos de combustión dentro de la caracterización térmica de las briquetas de biomasa residual. En tal sentido, es fundamental conocer la duración de la combustión para realizar ajustes en los equipos a utilizar en la combustión de biomasa residual. Asimismo, el rendimiento de la combustión está determinado por la composición química; advirtiendo, que la lignina presenta altos rendimientos en la combustión superiores a la celulosa y hemicelulosa. En este sentido, se resalta el 9 % de lignina presente en la composición química de la tusa. Adicionalmente, el tiempo de combustión está correlacionado con la compactación del material; de allí la importancia del proceso de densificación desde el punto de vista térmico [12]. Por lo tanto, los tiempos de combustión dependen de la velocidad de la combustión; y esta, de los componentes del combustible y de la interacción entre estos. Además, en un estudio realizado de análisis termo-gravimétrico (TGA) para analizar el comportamiento de combustión de las biomasa, se encontró que la velocidad de combustión es inversamente proporcional al contenido de humedad [12] y directamente proporcional a la densidad de los pellets [27].

Dentro de la caracterización de la combustión de biomasa residual se requiere conocer el impacto de la quema de tusa de Palma de Aceite Africana; por lo tanto, se necesita caracterizar la emisión de gases y material particulado. Las emisiones de NO_x, CO₂ y material particulado son productos propios de la combustión de biomasa. Hodzic et al. [28] en su estudio sobre la influencia del aire en la re-combustión de NO_x de madera como biomasa; concluye, que las emisiones de NO_x se pueden reducir significativamente con la disminución de la temperatura del proceso y el aumento de la proporción de entrada del flujo de aire. Por ejemplo, si la temperatura de combustión es inferior a 1100 °C las emisiones de NO_x se reducen en un 36 %. Por otro lado, la producción de gases efecto invernadero como CO₂ se disminuye de 3 a 5 % cuando se utiliza el secado por exposición al medio ambiente [29]. Kjällstrand et al. [30], concluye en su investigación utilizando cromatografía de gases y espectrometría de masas sobre emisiones de pellets de madera, que ésta libera componentes semi-volátiles primarios durante la combustión, fundamentalmente metoxi-fenoles de lignina.

1.3 Métodos para la densificación de biomasa

A continuación, se describe la tecnología existente para la fabricación de briquetas en función del principio de densificación utilizado:

1.3.1 Principio de prensado por compresión o contricción

La prensa de rodillos para fabricación de briquetas funciona bajo el principio de contricción utilizando un arreglo de rodillos solidarios a un eje; la alimentación de la prensa de rodillos se realiza por gravedad por medio de tolva en la parte superior o lateral de los rodillos; la clasificación del prensado por rodillos se realiza dependiendo de la ubicación de los rodillos. Los rodillos pueden ser ubicados simétricamente entre las chumaceras o fuera de estas en los extremos de los ejes [31].

La geometría de la briqueta fabricada con prensa briquetadora de rodillos depende de la muesca realizada sobre la superficie o cara de trabajo. Las prensas de rodillos se clasifican según la construcción en rodillos integrales o rodillos segmentados y paralelos o perpendiculares:

- a. Rodillos integrales: Rodillos solidarios al eje provistos de protección contra la corrosión usando cinta de acero inoxidable o materiales resistentes al desgaste y abrasión como envolventes; la cual, está unida al rodillo mediante unión soldada a la cara de trabajo. Se emplean en la fabricación de briquetas de productos alimenticios y farmacéuticos [31].
- b. Rodillos segmentados: Rodillos fabricados por secciones, las cuales están unidas a un eje por medio de contracción. La geometría está definida por secciones cilíndricas de pared delgada (anillos), los cuales presentan la ventaja de poder ser reemplazados de manera individual. Los materiales de fabricación presentan buenas características de resistencia a la abrasión y corrosión. Se utilizan en el proceso de briqueteado a altas temperaturas o de materiales abrasivos [31].
- c. Rodillos perpendiculares: Un rodillo móvil o fijo se ubica como planetario y entre dos y cuatro rodillos, dependiendo del fabricante, se ubican como satélite(s), girando con velocidad angular en dirección opuesta, como se observa en la Figura 1-1. Se puede implementar los siguientes arreglos de rodillos.
1. Rodillo planetario fijo y rodillo(s) satélite(s) rotando a velocidad constante.
 2. Rodillo planetario y satélite(s) girando a velocidad constante.

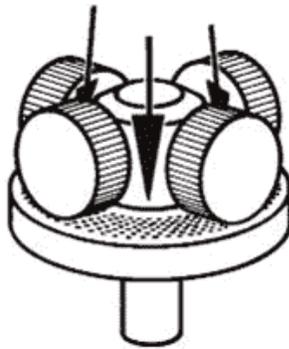


Figura 1-1. Briquetadora de rodillos perpendiculares. Tomado de briquetadora Bepex [31].

- d. Prensas de rodillos paralelos: El principio de funcionamiento es el de prensado por constricción entre dos rodillos paralelos [32], como se observa en la Figura 1-2, que pueden trabajar en diferentes arreglos dependiendo del fabricante

1. Un rodillo fijo y el otro móvil [32].
2. Dos rodillos móviles, con velocidad angular constante en dirección opuesta [32].
3. Tren de rodillos, en los cuales se realiza combinación de los arreglos anteriores.

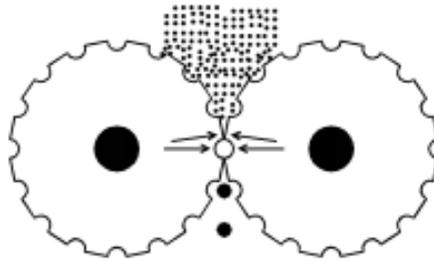


Figura 1-2 Prensa briquetadora de rodillos paralelos. Tomado de [32].

1.3.2 Principio de prensado por impacto

La densificación se realiza bajo el principio de prensado por impacto o prensado por extrusión [33]. En la Figura 1-3 se observa el mecanismo biela-manivela; aclarando, que la briqueta se forma en la cámara de compactación.

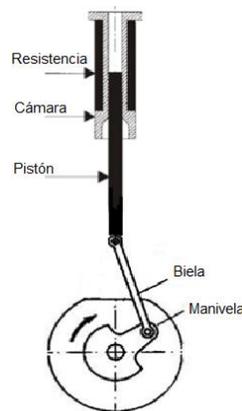


Figura 1-3. Esquema de prensa briquetadora de pistón con sistema biela-manivela.

Adaptado de [34].

El mecanismo biela-manivela permite convertir un movimiento circular en movimiento lineal. El impacto o golpeo es realizado por un pistón el cual trabaja mediante un

mecanismo de tipo biela-manivela. Las producciones alcanzadas con el uso de este sistema de prensado oscilan de 1200 a 1500 kg/h [33].

1.3.3 Principio de prensado por extrusión

Las prensas basadas en el principio de extrusión dependen del impulso axial ejercido por medio de sistemas hidráulicos o neumáticos ejercidos sobre un pistón o por medio del empuje ejercido por tornillos sinfín:

a. Prensado por movimiento axial de pistón: El sistema de acción para compresión de la briqueta, corresponde a un mecanismo hidráulico con un único émbolo el cual produce movimiento axial a un pistón como se observa en la Figura 1-4; cuyo accionamiento es manual o hidráulico. El pistón generalmente es accionado por un volante de inercia, el cual depende de un sistema hidráulico o neumático [35]. La cámara de compresión es seguida por una tobera, permitiendo aumento de la presión; y a su vez, elevando el grado de compactación de la briqueta. La compresión produce un aumento de temperatura, la cual activa la lignina presente en la biomasa; dando lugar, a la compactación termoplástica y solidificación del material después del proceso de prensado. Las presiones alcanzadas en la prensa briquetadora por extrusión se encuentran dentro del rango de 110 a 140 MPa [35].

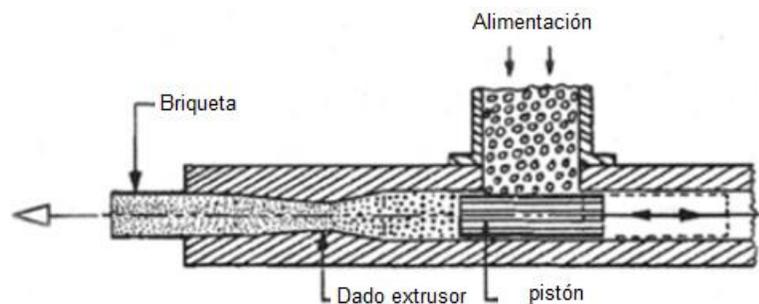


Figura 1-4. Esquema de acción tomado de comparación de tecnologías de prensa briquetadora [35].

b. Prensa para fabricación de briquetas de tornillo sinfín: El principio de funcionamiento es el prensado por extrusión al igual que en el prensado por pistón. El

tornillo sinfín es fabricado de acero al Níquel-Cromo o Carburo de Tungsteno; donde, la velocidad de avance y compactación del material dependen de la temperatura y del tipo de biomasa. El tornillo gira a velocidades variables, incorporando la biomasa en la entrada cónica de la cámara como se observa en la Figura 1-5. Este procedimiento permite la activación de la lignina al aumentar la temperatura por compresión para la plastificación de la briqueta al solidificarse [33]. El proceso de prensado por tornillo sinfín permite la fabricación de briquetas tubulares, aumentando la velocidad de combustión [33]. El uso de este tipo de prensa briquetadora permite alcanzar una mayor compactación de la biomasa; por lo cual, se obtiene una densidad del material a la salida aproximadamente de 1100 kg/m^3 , superiores a los anteriormente citados procedimientos de prensado [33, 36]. El volumen de producción mediante este proceso se encuentra en el intervalo de 500 a 2500 kg/h [33]. En las Figuras 1-5 se muestra el esquema de trabajo de la prensa briquetadora de tornillo sinfín.

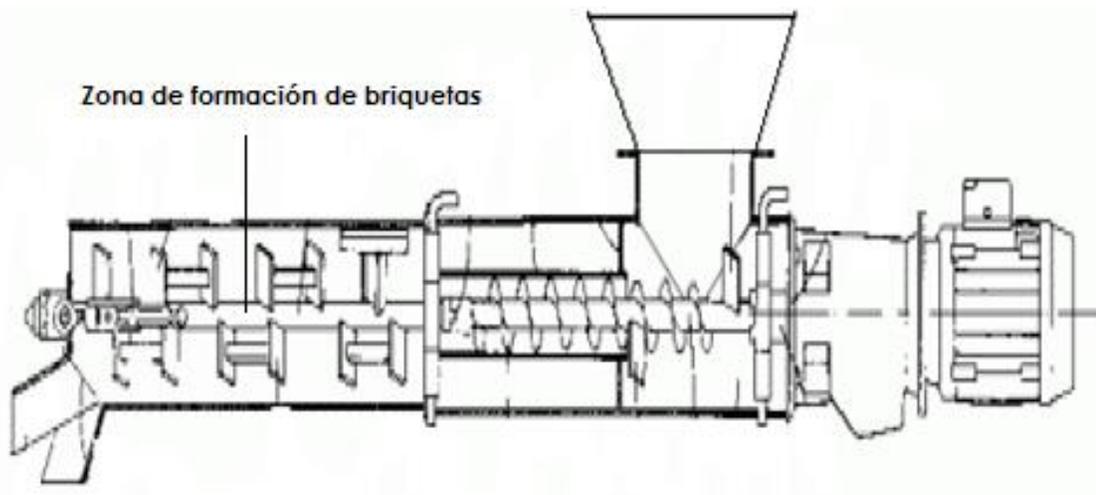


Figura 1-5. Esquema de prensa briquetadora de tornillo sinfín [35].

1.4 Normas empleadas en la caracterización y aseguramiento de la calidad de biomasa densificada

La comunidad internacional ha reglamentado y estandarizado la fabricación de pellets y briquetas; destacándose, los siguientes parámetros en las normas y estándares relevantes

emitidos por cada país, como son: relación de dimensiones, densidad aparente, durabilidad, contenido de humedad, contenido de cenizas, poder calorífico y composición química. Los parámetros de referencia dispuestos en estas normas son los que garantizan la calidad mínima y la aceptación del producto, de acuerdo a la normatividad de cada país. En Alemania, la norma DIN 51731 referente a estándares de fabricación de pellets y briquetas, y la norma DINEN 15270 referente a la fabricación de pellets de alta calidad.

A continuación, se muestran los aspectos más relevantes presentados en la Tabla 1-2.

Tabla 1-2. Especificaciones de DIN 51731 para fabricación de pellets y briquetas [37].

Parámetro		DIN 51731	DINEN 15270
Físico	Diámetro (D) [mm]	4-10	-----
	Longitud	<5D	<5D
	Densidad de partícula [kg/dm ³]	<1,2	<1,2
Mecánico	Durabilidad [%]	97	97,7
Químico	Contenido de humedad [%]	<12	<10
	Contenido de cenizas [%]	<1,5	<0,5
	Poder calorífico [kcal/kg]	3.705-4.461	>4302
	N [%]	<0,3	<0,3
	S [%]	<0,08	<0,04
	Cl [%]	<0,03	<0,02
	Aditivos [%]	----	<2
	As(mg/kg)	<0,8	<0,8
	Cd(mg/kg)	<0,5	<0,5

Cr(mg/kg)	<8	<8
Cu(mg/kg)	<5	<5
Hg(mg/kg)	<0,05	<0,05
Pb(mg/kg)	<10	<10
Zn(mg/kg)	<100	<100

En Austria, la norma ÖNORM M 7135 establece los requisitos y especificaciones para la fabricación de pellets y briquetas de madera. En la Tabla 1-3 se presentan los aspectos relevantes.

Tabla 1-3. Especificaciones de pellets de madera con y sin ceniza, tomado de norma ÖNORM M 7135 [38].

Parámetro		Valor
Físico	Diámetro (D) [mm]	4 - 10
	Longitud	< 5D
	Densidad de partícula [kg/dm ³]	< 1,12
Mecánico	Durabilidad [%]	97,7
Químico	Contenido de humedad [%]	< 10
	Contenido de cenizas [%]	< 0,5
	Poder calorífico [kcal/kg]	> 4302
	N [%]	< 0,3
	S [%]	< 0,04

	Cl [%]	< 0,02
	Aditivos [%]	< 2

Además, las normas ÖNORM M 7136 y ÖNORM M 7137 especifican el aseguramiento de la calidad en logística, transporte y almacenamiento de pellets de madera; asimismo, los requisitos para el almacenamiento de pellets de madera por el consumidor final [39, 40].

El Comité de Norma Europea emite la norma CEN/TC 335, para la cual se describen los principales parámetros resumidos en la Tabla 1-4.

Tabla 1-4. Especificaciones de pellets y briquetas del Comité de Norma Europea CEN/TC 335 -2004 [41].

Parámetro	Descripción	Nomenclatura	Valor	
Dimensiones	Diámetro (D) y Longitud (L)	D 6	$D \leq 6 \pm 0,5$	$L \leq 50$
		D 8	$D \leq 8 \pm 0,5$	$L \leq 40$
		D 10	$D \leq 10 \pm 0,5$	$L \leq 40$
		D 12	$D \leq 12 \pm 1$	$L \leq 40$
		D 25	$D \leq 25 \pm 1$	$L \leq 40$
Químico	Contenido de humedad (%)	M 10	$\leq 10 \%$	
		M 15	$\leq 15 \%$	
		M 20	$\leq 20 \%$	
	Contenido de cenizas (%)	A 0,7	$\leq 0,7 \%$	
		A 1,5	$\leq 1,5 \%$	
		A 3,0	$\leq 3 \%$	
		A 6,0	$\leq 6 \%$	
		A 6,0+	$> 6 \%$	
	N (%)	N 0,3	$\leq 0,3 \%$	
		N 0,5	$\leq 0,5 \%$	
		N 1,0	$\leq 1 \%$	
		N 3,0	$\leq 3 \%$	
		N 3,0+	$> 3 \%$	
	S (%)	S 0,05	$\leq 0,005 \%$	
		S 0,08	$\leq 0,008 \%$	
S 0,1		$\leq 0,1 \%$		

	S 0,2	≤ 0,2 %
	≥ 97,5	---
	≥ 95	---
Durabilidad	Du 97,5	≥90
	Du 95,0	≤1 %
	Du 90	≤2%
Contenidos de finos (% <3,15 mm)	F 1,0	>2%
	F 2,0	>2%
	F 2,0+	>2%
Densidad aparente (kg/m³)	550	

En Francia, la estandarización para la fabricación de briquetas hace referencia a la Recomendación ITEBE, sus principales aspectos sobre la fabricación de pellets y briquetas se presentan en la Tabla 1-5.

Tabla 1-5. Especificaciones de pellets y briquetas de la recomendación francesa para biocombustibles ITEBE [42].

Parámetro		Valor		
		Caldera	Caldera a gran escala	Incinerador
Físico	Diámetro [mm]	8-10±0,5	>16	>16
	Longitud [mm]	10-15	>16	>16
	Densidad de aparente [kg/m³]	> 650	>580	>580
Mecánico	Densidad de partículas [kg/dm³]	1,2-1,4	-----	-----
Químico	Contenido de humedad [%]	< 10	-----	-----
	Contenido de cenizas [%]	< 1,0	-----	-----

	Poder calorífico [kcal/kg]	>4052	-----	-----
	N [%]	< 0,3	-----	-----
	S [%]	< 0,3	-----	-----
	Cl [%]	< 0,08	-----	-----

El estándar italiano CTI R04/05 ha subdividido la biomasa en tres grupos clasificados de la siguiente manera: A1: Árbol de hojas y coníferas; A2: Biomasa herbácea; y A3: Biomasa no incluidas en los grupos A1 y A2. Los principales aspectos del estándar italiano se resumen en la Tabla 1-6.

Tabla 1-6. Especificaciones de pellets y briquetas del estándar italiano para biocombustibles CTI-R04/05 [38].

Parámetro		Valor		
		A 1	A 2	A 3
Físico	Diámetro [mm]	6±0,5 - 8±0,5	6±0,5 - 8±0,5	10±0,5 - 25±1
	Longitud	-----	< 5 D	-----
	Densidad de aparente [kg/m³]	620-720	620-720	≤ 550
Mecánico	Durabilidad [%]	> 99	> 99	98,5
Químico	Contenido de humedad [%]	≤ 10	< 10	≤ 15
	Contenido de cenizas [%]	≤ 0,7	< 1,5	-----
	Poder calorífico [kcal/kg]	≤ 4039	3870	-----

	N [%]	≤ 0,3	≤ 0,3	-----
	S [%]	≤ 0,5	≤ 0,5	-----
	Cl [%]	≤ 0,03	-----	-----
	Aditivos [%]	Prohibido	-----	-----

En Suecia al igual que en Italia, la Norma SS187120 ha subdivido la biomasa en tres grupos, destacándose los siguientes parámetros para la fabricación de briquetas resumidos en la Tabla 1-7.

El Grupo 1: Madera no tratada y tronco de coníferas sin corteza.

Grupo 2: Materias primas no incluidas en el grupo 1 y biomásas herbáceas.

Grupo 3: Materias primas no incluidas en el grupo 2.

Tabla 1-7. Especificaciones de pellets y briquetas según norma sueca para biocombustibles SS187120 [38].

Parámetro		Valor		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Físico	Diámetro [mm]	< 25	< 25	< 25
	Longitud	< 4 D	< 5 D	< 5 D
	Densidad de aparente [kg/m³]	> 600	> 500	> 500
Mecánico	Durabilidad [%]	99,2	98,5	98,5
Químico	Contenido de humedad [%]	< 0,7	< 1,5	< 1,5
	Contenido de cenizas [%]	< 0,08	< 0,08	----
	Poder calorífico [kcal/kg]	> 4039	> 4039	> 3609

	S [%]	< 0,03	< 0,03	----
	Cl [%]	< 0,03	< 0,03	----

De la información arriba presentada se expone que la normalización para la densificación de biomásas se divide en la fabricación de pellets y briquetas; desde, el punto de vista dimensional. Asimismo, la estandarización está basada en propiedades físicas, mecánicas y químicas. Particularizando, que desde el punto de vista geométrico los tamaños recomendados por normas y estándares para la fabricación de briquetas son función del diámetro; y este a su vez es función del tamaño de la partícula. El diámetro en normas y estándares se encuentra comprendido entre 4 y 25 mm, y la longitud deberá ser menor entre 4 a 5 veces el diámetro; advirtiendo, que únicamente la recomendación francesa presenta una geometría simétrica entre el diámetro y longitud. Además, las dimensiones estandarizadas en la normas alemana y austriaca para diámetros son aplicables a pellets; pues, estos no son superiores a 10 mm; continuando, con la recomendación francesa sobresale la permisibilidad de la fabricación de briquetas al asentir a diámetros superiores a 16 mm; mientras, el estándar italiano, la norma sueca y europea estandarizan su máximo diámetro en 25 mm. Lo anterior, expone que la mayoría de las normas existentes para la densificación de biomásas se enfocan en la fabricación de pellets; por lo tanto, la fabricación de briquetas desde el punto de vista dimensional no se encuentra tan ampliamente estandarizada como los pellets.

Desde el punto de vista de propiedades físicas y químicas, la normas y estándares plantean un rango de valores para la densidad aparente entre 550 a 720 kg/m³; subrayando, que la norma europea es la de menor valor para la densidad aparente; continuo, de la recomendación francesa la cual establece un valor de 650 kg/m³ y 580 kg/m³. De manera similar, los valores del estándar italiano se encuentran entre 620 a 720 kg/m³ para diámetros pequeños, y 550 kg/m³ para el mayor diámetro permitido de los pellets. Enfatizando, que para las normas presentadas a mayor diámetro menor densidad aparente. Asimismo, el contenido de humedad es menor a 10 % b.h a excepción de la norma sueca; la cual, establece un contenido de humedad menor al 15 % b.h., por lo tanto, el rango estandarizado de porcentaje recomendado es menor al 10 % b.h., pudiendo llegar

hasta 15 % b.h. De igual forma, las normas establecen contenido de cenizas menor a 0,08 % y hasta 6 %; siendo, la norma europea la más permisiva, mientras la normatividad por cada país mantiene un promedio de 1,5 %.

Respecto a propiedades térmicas el poder calorífico esperado bajo los parámetros establecidos en las tablas es 16,91 a 16,96 MJ/kg; destacándose, que es mayor el poder calorífico de biombras provenientes de maderas que para las herbáceas. Por otra parte, respecto a la estandarización sobre composición química; la normatividad se limita a establecer valores máximos permitidos de presencia de elementos que puedan formar compuestos nocivos al ambiente como el azufre, nitrógeno y cloro.

Las anteriores normas se presentan para biombras provenientes de maderas, herbáceas y otras que no se encuentran en ninguno de estos grupos. Debido a su acercamiento a la tusa de palma de aceite, se utilizó para realizar planteamiento de los valores para los factores de tratamiento y clasificación.

2. Capítulo: Diseño experimental

La ejecución del diseño experimental inicia con el planteamiento de las preguntas de la investigación; posteriormente, se formula el modelo del material subjetivo, el problema estadístico y diseño experimental.

2.1 Preguntas de la investigación

La hipótesis se plantea a partir de la formulación de las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son las variables influyentes y procesos requeridos para la utilización de la biomasa proveniente de la palma de aceite (tusa) como combustible?
- ¿Cuáles son los valores o rangos ideales de las variables independientes para obtener las condiciones ideales en cada proceso?
- ¿Cuáles son los mejores valores para las variables dependientes?

2.2 Modelo del material subjetivo

En la investigación que se realiza sobre el proceso de densificación de biomasa residual de Palma de Aceite Africana se han establecido tres variables esenciales. Lo anterior debido al grado de influencia que poseen en la densificación de acuerdo a la revisión bibliográfica. A continuación, se presentan las variables de estudio o esenciales denominadas como factores de tratamiento y las variables objetivo o dependientes conocidas como factores de clasificación:

2.2.1 Factores de tratamiento

Dentro de los factores de tratamientos se encuentran las variables cuantitativas esenciales y secundarias. Las variables esenciales se seleccionan de acuerdo a su influencia en las propiedades mecánicas y aprovechamiento de la materia prima; siendo estos, indicadores de la trascendencia de cada proceso y viabilidad económica. A continuación, se presentan las variables cuantitativas de acuerdo a su grado de relevancia.

Variables esenciales

Escudriñando en la revisión bibliográfica y analizando el proceso de densificación se encontró que las variables de mayor influencia en el proceso de densificación de biomasa son de mayor a menor el porcentaje de humedad, tiempo de compactación y la longitud de la biomasa; a continuación, se plantean los valores y justificación para cada variable:

- **Contenido de humedad:** Se debe tener en cuenta que el contenido de humedad es la variable de mayor influencia en el consumo energético, presión de densificación, y la durabilidad de las briquetas. Advirtiéndose, que el contenido de humedad en el instante de salida de la tusa de palma de aceite de la planta extractora se encuentra entre el 50 y el 65% b.h. [5], dependiendo del lugar de proveniencia. Esta humedad es adquirida por las condiciones propias de suelos y ambiente de los cultivos; además, por el proceso de esterilización en la extracción de las ciruelas o corozos realizada con vapor de agua. El alto contenido de humedad crea un hábitat propicio para la germinación de hongos que conlleva al deterioro en un tiempo no superior a 48 horas de esta biomasa residual. De la revisión de la literatura se destaca que el rango ideal para obtener los mejores resultados en el proceso de densificación el contenido de humedad se debe encontrar entre 10 % y 15 % b.h. [11]. En la Figura 2-1 se observa la codificación de briquetas para contenidos de humedad de 8 % b.h. y 16 % b.h.

- **Tiempo de compactación:** En la revisión bibliográfica no se han encontrado valores de referencia respecto al tiempo de compactación; advirtiéndose, que es de vital importancia

la influencia que este parámetro provoca en la calidad de compactación y durabilidad de la briqueta, debido a la plastificación producida por la activación de la lignina [12]. Se deben determinar los límites inferior y superior de esta variable permitiendo que se presente plastificación; y a su vez, evitando la vaporización de la lignina conociendo el peso de esta en el poder calorífico entregado por la biomasa. El rango para el factor de tiempo de compactación se selecciona de acuerdo a ensayos preliminares ejecutados en la briquetadora experimental. De donde se establece que el rango para el tiempo de compactación deberá encontrarse entre 0 y 40 s.

- Longitud de la fibra de biomasa residual: La longitud de la fibra depende del tamaño de las tusas de Palma de Aceite Africana; asimismo, el tamaño depende de la edad del cultivo. Teniendo en cuenta, que la edad de mayor productividad de la Palma de Aceite Africana se encuentra entre 10 a 25 años; y la longitud promedio de las fibras del pedúnculo central para esta edad de los cultivos es de 300 mm, con un diámetro promedio de 70 mm [5]. Asimismo, las ramificaciones del pedúnculo central poseen una longitud promedio de 120 mm con un diámetro promedio de 10 mm; advirtiéndose, que el 70 % de la tusa de Palma de Aceite Africana son ramificaciones del pedúnculo central. Adicionalmente, en el estado del arte se destaca que las longitudes recomendadas para biomásas diferentes a la Tusa se encuentran desde 10 a 50 mm y el segundo mayor consumo de energía se presenta en el corte de fibras [40]. Se concluye, teniendo en cuenta cada uno de los factores mencionados un rango de 50 a 120 mm para las longitudes de fibras de biomasa residual, previendo el mayor aprovechamiento de la biomasa.



Figura 2-1. Codificación de factores de clasificación y briquetas fabricadas para contenidos de humedad de 16% b.h. y 8% b.h. Fuente: Autor.

2.2.2 Variables secundarias

Las variables cuantitativas secundarias han sido seleccionadas dependiendo de la influencia en la compactación de la biomasa. A continuación, se presentan de mayor a menor dichas variables según el grado de relevancia.

- Temperatura de compactación: La temperatura del proceso se selecciona basado en la premisa de que se requiere activación de la lignina, pero no su vaporización. Una vez iniciado el proceso de compactación debido a la compresión fluye de las fibras de biomasa la lignina presente en estas; su activación completa, se logrará aumentando la temperatura alrededor de los 140 °C; adicionalmente, del estado de arte se conoce que la temperatura de ebullición del agua a la altura de Bogotá D.C., Colombia, es de 94 °C; y como se busca la activación de la lignina para el proceso de plastificación y no la evaporación del agua contenida en la biomasa, se establece una temperatura de 90 ± 3 °C. La idoneidad de este valor se estableció además por vía experimental en ensayos preliminares.

- Presión de compactación: El valor de la presión de compactación se establece a partir de la revisión bibliográfica. Para la investigación realizada, se fija la relación de compresión de 6,2:1 teniendo en cuenta valores de densificación para biomásas provenientes de maderas blandas [18]. Adicionalmente, las briquetas deben poseer un

diámetro superior a 25 mm, el cual es el diámetro máximo según el estado del arte para pellets. Basado en estos requerimientos se selecciona un diámetro de 30 mm; para lograr la relación de compresión señalada se requiere una fuerza de compresión de 69 kN, realizando cálculos (utilizando la relación fuerza/área) la presión de compactación de biomasa residual proveniente de palma de Aceite Africana llegará a tener una magnitud de 97 MPa. El análisis anterior fue comprobado mediante un estudio experimental preliminar, que consistió en el desarrollo de un prototipo de compactación, y la toma de datos de carga vs. relación de compresión en una máquina de ensayos a tensión Shimadzu, en las instalaciones de la Universidad Nacional de Colombia.

- Masa de la biomasa residual: la densidad aparente para biombras provenientes de maderas blandas según el estado de arte es de 500 a 600 kg/m³; además, el volumen de la cámara de compresión para un diámetro de 30 mm y una longitud de 120 mm es de 8,5 e-5 m³; a partir de ello, calculando la masa requerida para obtener una densidad aparente de 750 a 850 kg/m³ debe encontrarse entre 42 a 50 gr. Basado en lo anterior y en las dimensiones de la cámara de la Prensa Briqueteadora se selecciona una masa de 42 gr para realizar la carga de la cámara de compresión.
- Composición química: Se requiere un análisis químico debido a que la composición y estructura de la biomasa es quien determina características tales como el poder calorífico, emisiones durante la quema y combustión. En la normatividad presentada en el estado de arte se pueden ver los elementos mínimos que requieren ser analizados en las biombras. Debido a ello se analizarán los porcentajes de los siguientes elementos: C, N, S, O, H [41, 42, 37, 43, 44].
- Lugar de procedencia de la biomasa residual: La zona de cultivo del país influye en el contenido de humedad de las tusas de Palma de Aceite Africana, los suelos, condiciones atmosféricas propias de cada región, y proceso de extracción del fruto determinan dicha humedad. En esta investigación se estudian muestras de tres regiones según división realizada por Fedepalma; mencionando, que las tusas provienen de los siguientes cultivos: Cultivo uno (1) de Fundación en la zona norte,

cultivo dos (2) de Sabana de Torres en la zona central y por último cultivo tres (3) de Puerto Gaitán en la zona oriental.

- Apariencia de la biomasa residual: La apariencia de la tusa de Palma de Aceite Africana es un indicador del buen estado del cultivo; tusas que no muestren deterioro en su estructura, que posean el 100 % de sus ramificaciones del pedúnculo y no posean deformidades revela el estado sano de un cultivo. Es por ello que en esta investigación se revisaron y garantizaron esas características en cada una de las muestras.
- Edad de la biomasa residual: La edad de la biomasa residual como ya se mencionó influye en el tamaño y por ende la longitud de las fibras. A continuación, se referencia las edades para cada cultivo: 20 años para el cultivo proveniente de Fundación, 25 años para el cultivo proveniente de Sabana de Torres y 15 años para el cultivo proveniente de Puerto Gaitán. La razón de la diferencia en edad se basa en parametrizar la influencia de esta, en los resultados obtenidos.

2.2.3 Factores de clasificación

Entre los factores de clasificación se encuentran aquellas variables cuantitativas y cualitativas las cuales por medio de esta investigación se busca mejorar; debido a que la aplicación final de la biomasa residual es ser usada como combustible, los factores de clasificación estarán enfocados en propiedades mecánicas y térmicas de las briquetas. Asimismo, los factores de tratamiento o variables dependientes se clasificarán en dos grupos denominados esenciales o secundarios dependiendo del grado de relevancia para esta investigación.

Variables dependientes esenciales

A continuación, se presentan las variables dependientes esenciales u objeto de caracterización de esta investigación de acuerdo a su grado de relevancia.

- **Densidad aparente:** El volumen de la cámara de prensado se diseñó a partir de una relación de compresión de 6,2:1; basado en ello se diseñó la cámara de compactación con un diámetro de 30 mm para obtener un volumen de $8,5 \times 10^{-5} \text{ m}^3$. Del estado del arte se esperan densidades aparentes similares a las maderas blandas, es decir entre 800 a 1000 kg/m^3 [7], calculando la masa requerida para conseguir el promedio de estas densidades, considerando el recorrido del pistón y la presión de compresión, se establece una masa de carga en la cámara de compresión de 42 gr.
- **Índice de durabilidad:** este parámetro caracteriza la resistencia de las briquetas a la acción mecánica; la durabilidad de las briquetas es inversamente proporcional al contenido de humedad como se enfatizó en el estado de arte. Producto a que el contenido de humedad se encuentra entre el 8 % y el 16 %, se esperarían valores de índice de durabilidad comprendidos entre el 97 % al 99 % [20].

Variables dependientes secundarias

Las variables secundarias buscan medir efectos ambientales al realizar quema de biomasa durante la combustión de biomasa residual. Dentro de las posibles emisiones generadas por la quema de tusa de palma de aceite se encuentran los óxidos nitrosos, óxidos de azufre y el material particulado.

- **Emisiones de NO_x :** Del estado de arte se destaca la presencia de elementos como el Nitrógeno dentro de la composición de la biomasa residual, durante la combustión de la tusa tiene lugar la formación de Óxidos Nitrosos, debido a ello la importancia de su medición para conocer la implicación ambiental al usar biomasa como combustible [37] [38] [43] [45].
- **Emisiones de SO_x :** Al igual que el nitrógeno, el azufre es componente de la biomasa; asimismo, el proceso de combustión de la biomasa podría formar óxidos de azufre y la medición de sus emisiones es de vital importancia [46]. Este valor es sin embargo menor al que se presenta en carbón.

- **Material volátil:** Los altos contenidos volátiles de las biomásas producen que la combustión sea incompleta generando hidrocarburos aromáticos cancerígenos; de la revisión bibliográfica se destacan valores para las concentraciones se encuentran alrededor de $0,86 \text{ mg/m}^3$ en los pellets de madera y $0,36 \text{ mg/m}^3$ en pellets de paja, razón por lo cual se requiere realizar mediciones esperando concentraciones entre 0,3 a 0,9 mg/m^3 [47, 48].
- **Contenido de ceniza:** Del estado del arte se conoce que el contenido de cenizas para biomásas de maderas y herbáceas se encuentran entre 0,08 a 2 % [41, 42, 37, 44], por lo que se esperan valores similares para biomasa proveniente de tusa de palma de aceite africana.

Adicional a las mediciones para determinar el impacto ambiental al quemar tusa de palma de aceite africana, es indispensable parametrizar las dimensiones y masa de las briquetas obtenidas durante el proceso de densificación, para establecer si se ha efectuado activación de la lignina y elaborar procedimientos de almacenamiento y transporte; razón por la cual, se requiere medir el volumen y masa final de cada una de las briquetas

- **Volumen de la briketa:** El diámetro de la cámara de compresión es de 30 mm, para una carga de 42 gr obteniéndose un volumen de las briquetas de alrededor de 226 cm^3 . El cual se medirá en cada briketa utilizando instrumento graduado con precisión de 0,02 mm.
- **Masa de la briketa:** Existe interdependencia entre la masa y el volumen de la briketa. La masa de la briketa se determina directamente de su pesaje.

2.3 Formulación del problema estadístico

2.3.1 Error de tratamiento

Se busca minimizar el error durante las mediciones utilizando instrumentos que posean buena exactitud y precisión. Asimismo, los cálculos y gráficas de las mediciones de cada

uno de los factores de tratamientos se realizarán utilizando software estadístico especializado, con el interés de encontrar los errores estándar, errores absolutos medio y las correlaciones existentes.

2.4 Desarrollo del diseño experimental

En el estudio de la caracterización de densificación de biomasa residual proveniente de palma de aceite africana se requiere configurar los factores de clasificación en función de los factores de tratamiento como ya se ha mencionado. Debido a ello, es necesario llevar a cabo ensayos que permitan parametrizar cada una de las variables iniciando con el planteamiento de la hipótesis, selección y procedimientos de los tratamientos y desarrollo de las instalaciones experimentales.

2.4.1 Diseño del tratamiento

El diseño de los tratamientos es factorial simétrica, dado que se busca parametrizar el rango ideal de cada una de las variables realizando cinco réplicas para cada una de las mediciones, siendo la base del factor el múltiplo de las tres variables esenciales independientes por cada cultivo de procedencia. Basado en lo anterior se requiere plantear la hipótesis objeto probatorio en el desarrollo de la presente investigación.

Hipótesis nula

No existe ninguna influencia de las variables esenciales en el proceso de densificación de biomasa residual de tusa de palma de aceite africana.

Hipótesis alterna

Existe influencia significativa de las variables esenciales en el proceso de densificación de biomasa residual proveniente de tusa de palma de aceite africana.

2.4.2 Estructura y selección de los tratamientos

En los ensayos a realizar se busca encontrar los valores ideales para cada factor de tratamiento, estos valores ideales se establecen a partir del estado de arte, estos valores y su razón se establecieron en 2.2.1 y 2.2.2 factores de tratamiento y clasificación; recordando, que los niveles serán los valores límites y el promedio entre los mismos del rango ideal predicho de acuerdo a revisión bibliográfica. Las muestras provienen de tres cultivos de tres de las cuatro zonas en las que se encuentra subdividido el territorio nacional. Dado que el territorio colombiano está dividido en cuatro zonas de cultivos de la palma de aceite, y la zona sur-occidental no es una población representativa correspondiendo al 4% de la producción nacional [5], se decide realizar el estudio experimental a tres unidades experimentales. Asimismo, las unidades observacionales (UO) serán cuatrocientas cinco unidades (405), y su cálculo se realiza de acuerdo al arreglo factorial de datos. A continuación, se realiza la secuencia de pasos en la estructura de tratamientos.

Procedimiento para obtención de biomasa residual

El procedimiento para la ejecución del desarrollo experimental inicia con la obtención de la biomasa residual o tusa; seleccionando una planta extractora de cada una de las tres regiones con los porcentajes de producción más representativos a nivel nacional; advirtiendo, que las regiones se establecen según la información brindada en SISPA de Fedepalma para el último censo registrado del 2007 [5]. Posteriormente, se contactó cada una de las plantas y se realizó la solicitud para entrega de muestreo de la biomasa residual (tusa de palma de aceite africana); con la premisa de que la recolección de las muestras debería ser inmediatamente posterior al proceso de desfrutación, por la descomposición generada debido a las razones mencionadas. Estableciendo que el tiempo desde la salida del desfrutador hasta las instalaciones del Laboratorio de Diseño de la Universidad Nacional de Colombia no fuera superior a 16 horas. En la Figura 2-2 se muestran algunas de las tusas procesadas para el proceso de caracterización.



Figura 2-2. Biomasa residual de tusa. Fuente: Autor.

Preparación de la biomasa residual

Posterior a la obtención de la tusa se separaron las fibras de la biomasa para acelerar el proceso de secado debido a una mayor exposición a la corriente de aire o exposición al medio ambiente, disminuyendo así la energía utilizada; con la premisa, que desde el proceso de desfrutación hasta el proceso de apertura de las fibras de la biomasa residual el tiempo no debe ser superior a 48 horas. Posterior al proceso de apertura las fibras separadas se ubicaron en bandejas sobre papel, siendo la finalidad de este la absorción de humedad; acelerando el proceso de secado de la biomasa residual. Las fibras secadas mediante este mecanismo deben ser giradas constantemente para garantizar el secado uniforme [49]. Se realizó medición del contenido de humedad según procedimiento descrito en ASTM E871; posteriormente, cuando el contenido de humedad se encontró por debajo del 15 % b.h. se procedió con el corte de las fibras; realizando cortes con guillotina para dar mayor celeridad y exactitud al corte de acuerdo a medidas preestablecidas en factores esenciales. Posteriormente fueron pesadas las fibras y almacenadas cada 42 gr en empaque hermético para evitar vaporización de la humedad y contaminación. Una vez embaladas las fibras se realizaron mediciones de humedad para establecer su valor, y así adicionar la cantidad de agua para obtener contenidos de humedad de acuerdo a valores establecidos en los niveles de tratamiento de 8, 12 y 16 % b.h. [19] a las fibras mediante spray, con un tiempo previo de 24 a 48 horas para homogenizar la humectación. En la

Figura 2-3 se observa el proceso de preparación de la biomasa (separación de fibras y corte).



Figura 2-3. Separación, secado y corte de fibras de tusa. Fuente: Autor.

Procedimiento de prensado de la biomasa residual

Posterior al proceso de preparación de la biomasa residual se fabricaron las briquetas de tusa con prensa briquetadora diseñada como parte de la investigación. Aclarando que la compactación se realizó en una cámara de compresión, a la cual se accede por su parte superior por medio de un tapón roscado. La cámara es precalentada por medio de una resistencia eléctrica externa a una temperatura de 90 ± 3 °C. El sistema de compactación emplea un mecanismo de pistón accionado hidráulicamente, el cual puede ejercer una presión de 97 MPa a la biomasa residual, como se muestra en la Figura 2-4.



Figura 2-4. Prensado de tusa. Fuente: Autor.

La compactación de las briquetas se realiza teniendo en cuenta los diferentes valores establecidos en el numeral 1.5.2 para cada variable esencial. Las briquetas obtenidas serán empacadas al vacío, ordenadas y almacenadas dependiendo de las variables esenciales y cultivo de procedencia.

A continuación, se describe el proceso de prensado de biomasa residual: Las muestras previamente pesadas para determinar la densidad aparente de las briquetas, se introducen en el agujero que se observa en la Figura 2-4. Luego, se realiza el cierre de la cámara de compresión por medio del tapón (ver Figura 2-5). Previamente, se requiere del

procedimiento de precalentamiento de la cámara de prensado, indicando en el control de temperatura el valor de referencia de 90°C. Posteriormente, se realiza la operación de compresión por medio del accionamiento manual de sistema hidráulico; revisando que el indicador de carga de la celda se encuentre inicialmente en cero. Lo anterior se realiza hasta alcanzar la presión de carga de 69 kN. Después se abre el paso de aceite del sistema hidráulico para que descienda el embolo un poco y permita retirar el tapón de la parte superior de la cámara; se procede a retirar el tapón y se cierra el paso del aceite para que este empuje la briqueta permitiendo su extracción. El anterior procedimiento se realizó para cada una de las briquetas fabricadas.

2.4.3 Diseño de la instalación experimental

A continuación, se presenta los aspectos fundamentales considerados en el proceso de desarrollo de la instalación experimental. En la Figura 2-5 se exhibe la prensa briquetadora diseñada y fabricada específicamente para esta investigación. Asimismo, en el Anexo J se presenta el plano general de la misma.

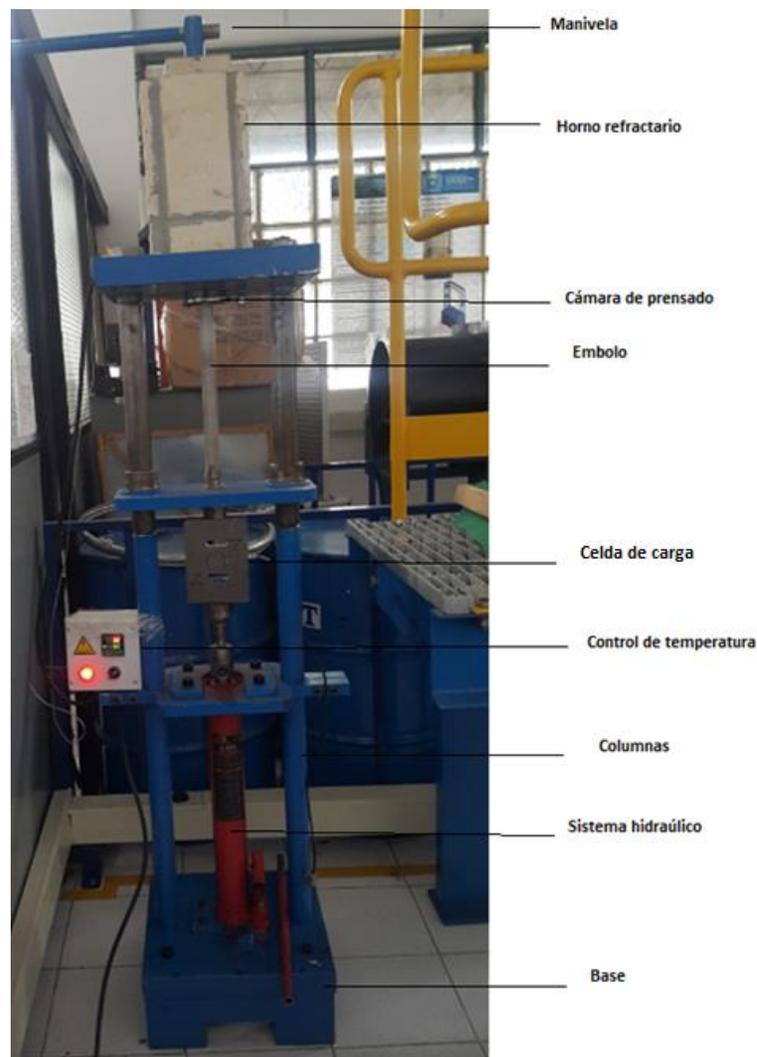


Figura 2-5. Prensa briquetadora. Fuente: Autor.

En la actualidad no existen equipos específicos implementados para compactar biomasa residual proveniente de Palma de Aceite Africana, con instrumentación para medición de las variables esenciales descritas con anterioridad. Los existentes para la compactación de biomásas no poseen mecanismos de aumento de temperatura, indispensables para lograr la plastificación de las briquetas [31] [35]. La prensa briquetadora cuyo plano general aparece en el Anexo J, se construyó con AISI /SAE H13 material no deformables a altas temperaturas; asimismo elementos tales como bases, columnas, rótula, mango y manivela, fueron construidas con material AISI/SAE 4140 con el objeto de brindar una mayor resistencia mecánica. La prensa posee sistema hidráulico de accionamiento manual

con capacidad de 80 toneladas, cuya, carrera es de 50 cm. Además, el sistema hidráulico en la parte superior está unido a rotula para la transmisión de fuerza axial. La rotula permite la unión a celda de carga marca Lexus, la cual tiene como objeto sensar la carga de compresión; la capacidad de la celda es de 10 toneladas y su valor se observa en el indicador digital. Encima de la celda de carga se encuentra el pistón, cuya función es comprimir la biomasa que se encuentra en el interior de la cámara. La cámara se encuentra recubierta lateralmente por una chaqueta térmica y aislante, cuyo objetivo es aumentar la temperatura de la misma, desde la temperatura ambiente hasta unos 200 °C. Lo anterior, para posibilitar la activación del compuesto que permite la unión entre fibras de la biomasa. La parte superior de la cámara es roscada para permitir el ajuste del tapón con el objeto de sellar la cámara y permitir la acción de la presión sobre las fibras. El tapón posee un agujero para insertar manivela; la cual tiene la función de ejercer torque sobre el tapón y permitir el apriete necesario. Adicionalmente la prensa posee una plataforma para permitir el trabajo seguro del operario que realiza el prensado. Por último, se requiere de la fabricación de un equipo para la medición de la durabilidad de las briquetas, basado en ASTM E 1288 [50].

Planteamiento del problema de diseño

Se requirió el diseño y fabricación de Prensa Briqueteadora con un costo no superior a 20 millones de pesos. La cual debe compactar fibras de tusa; facilitando la activación de la lignina, manteniendo temperatura alrededor de 90 ± 3 °C; y, una presión de compactación aproximada de 97 MPa. Adicionalmente, debe ser operable en las instalaciones del Laboratorio de Diseño de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá. Para poder plantear una solución al problema de diseño se subdividió el problema general de diseño dependiendo de cada proceso constructivo, creando tres subgrupos de problemas: Diseño, procesos y fabricación (ver Anexos B - D). El subgrupo de procesos hace referencia a las tareas que debe realizar la prensa y la forma de medir y controlar cada una de ellas. Para plantear una solución a cada sub-problema se genera matriz TRIZ (ver Anexo E) para el análisis de cada uno de los subgrupos, planteando las ventajas y desventajas; posteriormente, se realiza cuadro de solución de sub-problemas (ver Anexo F). En la matriz

TRIZ se indican las características que debe poseer la prensa briquetadora a diseñar; estas características son categorizadas de acuerdo a su relevancia. Adicionalmente, a la solución de sub-problemas se requiere un análisis funcional donde se determinen las entradas y salidas de la prensa briquetadora. el análisis funcional se realiza mediante el uso del modelo de caja negra donde se identifican las funciones generales descritas en las salidas que debe poseer el equipo. En la Figura 2-6 se muestra el esquema de caja negra para la instalación experimental.

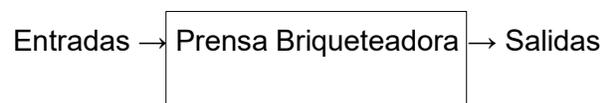


Figura 2-6. Modelo de caja negra para prensa briquetadora. Fuente: Autor.

Las entradas se establecen según el estado de arte y la definición de valores realizada a las variables independientes o factores de tratamientos, iniciando con los datos sobre la materia prima, la energía a utilizar, y valores de parametrización:

- Biomasa residual: Porcentaje de humedad, composición química, geometría y peso.
- Energía operacional: Hidráulica, eléctrica o mecánica.
- Valores de referencia de operación: Temperatura de compactación, presión de compactación, rango de porcentaje de humedad y tiempo de compactación.

Las salidas se basan en cálculos de valores esperados según el estado de arte para las variables dependientes o factores de clasificación; con estos valores se realizan cálculos y se plantean requerimientos generales que debe poseer la prensa como son: Geometría de cámara de compactación, mecanismo de compactación y subsistema para alcanzar la temperatura de compactación.

Una vez obtenidos los requerimientos generales se realizó valoración o ponderación de cada una de las características que debe poseer la prensa para cumplir con cada solicitud general. Para ello se utilizó el modelo de Caja Gris donde se describe detalladamente

características y procesos (ver Anexo G); posteriormente, a la ponderación se planteó funciones independientes para creación de modelo conceptual a través de un diagrama de funciones del proceso (ver Anexo H), planteando, tabla de soluciones respondiendo a cada una de los requerimientos del diagrama de funciones (ver Anexo H). Basado en el análisis a la tabla de soluciones de cada uno de los requerimientos y propuestas se realizan bosquejos generales de la prensa briquetadora. Asimismo, apoyados en este bosquejo, memoria de cálculos y modelos de resistencia y rigidez se diseñó el plano general (ver Anexo J) de la prensa, generando posteriormente los planos de detalle o taller de cada uno de los componentes.

2.5 Diseño del control de error

Se implementó un diseño de muestreo y observaciones donde cada muestra tiene igual posibilidad de asignación y estudio bajo las mismas condiciones para aleatorizar las muestras, con el fin de eliminar la propagación del error. A continuación, se desarrolla el diseño de muestreo y observaciones.

2.5.1 Diseño de muestreo y observaciones

Se agruparon las muestras dependiendo del lugar de procedencia, etiquetándose cinco muestras por cada lugar de procedencia [51]. Los lugares de procedencia están enfocados en las tres principales zonas geográficas del país donde se cultiva Palma de Aceite Africana. Considerando que las condiciones ambientales y suelos son factores determinantes en las características de la biomasa residual y el diseño de muestreo debe ser completamente aleatorio (DCA) [51]; asimismo, como el material de estudio es completamente homogéneo y/o tienen la misma capacidad de respuesta y la probabilidad de ser asignado [51], se plantea un DCA por cada región o zona de procedencia. Como ya se mencionó las muestras se asignaron aleatoriamente del total de biomasa obtenida por cada región; en función de la cantidad dependiente del peso y longitud requerida, para obtener las briquetas de dimensiones y durabilidad objetivo.

Para lograr el objetivo de la investigación de formular la ecuación característica del proceso de densificación de biomasa residual proveniente de Palma de Aceite Africana; se requiere, la combinación de niveles que optimizan la densidad aparente, índice de durabilidad y la resistencia a la compresión de la briqueta [51]. El arreglo de datos (A_d) fue factorial simétrica de tres niveles. Se tomó como base del factor las variables independientes esenciales (F); para lo cual, cada variable esencial contó con tres niveles de valores (N) y cinco réplicas (R) para cada una de las tres zonas de cultivo (C). A continuación, se fórmula el diseño factorial:

$$A_d = R \cdot C \cdot F^N \quad \text{Ecuación 2-1}$$

Por lo tanto, el arreglo de datos y corridas requeridas son: $A_d = 5 \cdot 3 \cdot 3^3 = 405$

2.6 Ensayos y mediciones

Para parametrizar el proceso de densificación es necesario obtener rango o valor ideal para cada variable influyente, para lo cual se realizaron mediciones de los factores de tratamiento y clasificación según procedimientos estipulados en estándares internacionales para contenido de humedad, poder calorífico, densidad aparente, durabilidad, porcentaje de cenizas y composición química [52].

2.6.1 Procedimiento para la medición del contenido de humedad de la biomasa residual basado en ASTM E 871

El método para determinar el contenido de humedad se basa en la medición de pérdida de peso por parte de la muestra; según, el procedimiento establecido por ASTM E 871 la muestra se lleva a 103 °C manteniendo condiciones controladas de 1 atmósfera y tiempo [53, 14]. Fue necesario para realizar la medición de un horno con dispositivo para controlar temperatura, contenedor, desecador y balanza calibrada [53]. Se ejecutó el procedimiento establecido en ASTM E 871: Se tomaron muestras contenidas en empaque hermético. Lo anterior con el propósito de evitar que la exposición al medio ambiente variara el contenido

de humedad en las muestras [53]. Se pesó una muestra de 50 g y durante 30 minutos se sostiene a una temperatura de 103 ± 1 °C en un horno Marca Adam Modelo AMD 50 con condiciones atmosféricas controladas. Aclarando, que se tomó como peso estándar del contenedor (W_c) de 0,02 g [53]. Posteriormente se enfrió en un desecador. Una vez alcanzada la temperatura ambiente se realizó una medición de verificación; llevando, la muestra tomada del mismo empaque hermético durante 16 h a una temperatura de 103 ± 1 °C. Se realizaron mediciones hasta que la diferencia entre las dos mediciones no fuera mayor a 0,2 % [53]. A continuación, se presenta la fórmula utilizada tomada del estándar ASTM E 871 para el cálculo del porcentaje de humedad [53].

$$W = \left[\frac{W_i - W_f}{W_i - W_c} \right] \cdot 100 [\%] \quad \text{Ecuación 2-2}$$

2.6.2 Procedimiento de medición de densidad aparente de biomasa

Para el procedimiento de medición de densidad aparente se realizó utilizando la siguiente relación entre masa y volumen:

$$\text{Densidad Aparente} = \frac{\text{Masa de la briqueta}}{\text{Volumen de la briqueta}} \quad \text{Ecuación 2-3}$$

En la expresión anterior, la unidad de la masa es gramos y la de volumen es mm^3 ; por lo tanto, la densidad aparente será expresada en gr/mm^3 ; destacándose el hecho, de que posteriormente se convirtieron a kg/m^3 . Luego del proceso de fabricación de las briquetas, se tomó cada una de las muestras y se midió su diámetro y longitud registrándolo en una hoja de cálculo. Asimismo, se procedió a realizar medición de su masa. Se utilizaron instrumentos con una resolución de 0,5 mm y 0,1 g respectivamente. Luego, al registro de los datos se procedió a calcular la densidad aparente de cada una de las briquetas; revisando la consistencia de los datos con los obtenidos en la revisión bibliográfica y la tendencia para cada factor de tratamiento.

2.6.3 Procedimiento de medición de resistencia a la compresión

Para la determinar de la resistencia a la compresión se realizó ensayo utilizando máquina Shimadzu AGX PLUS de 300 kN ubicando la briqueta como se observa en la Figura 2-6; aclarando, que la norma guía del procedimiento fue ASTM E 9, método estándar para ensayos de compresión. El ensayo se realiza aplicando una carga progresiva de compresión axial sobre la muestra; midiendo los incrementos hasta el punto de ruptura por resistencia a la compresión. Se realizan mediciones a dos probetas para cada conjugación de variables del diseño experimental. Para la realización del ensayo no se requirió realizar adaptación para evitar el pandeo debido a que la briqueta posee una longitud similar a su diámetro. Paralelamente, la briqueta cumplió con las dimensiones de la Tabla 2 de ASTM E9-89a; permitiendo, la geometría de la muestra la aplicación vertical de la carga.

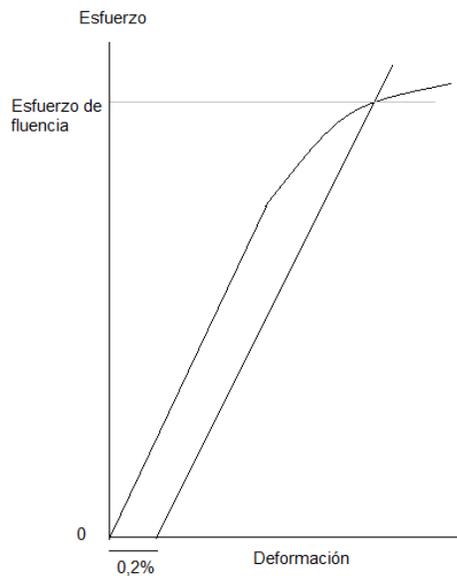


Figura 2-6. Curva esfuerzo-deformación. Adaptada de ASTM E 9-89a [56].

Asimismo, se realizó verificación del equipo de medición de carga; asegurando la validez de los resultados. Por otra parte, el valor del esfuerzo de fluencia lo entregó el equipo de medición y se realiza verificación utilizando la gráfica esfuerzo-deformación; encontrando, la intersección con la curva de dicha grafica para las muestras con línea al 0,2 % paralela a la recta de la zona elástica como se observa en la Figura 2-6.

El ensayo de compresión se realiza a velocidad constante de 1 mm/min; obteniéndose, velocidad de deformación constante durante la prueba como se recomienda en el estándar mencionado. Asimismo, el valor de la resistencia última al esfuerzo de compresión es entregado por el equipo de medición y este es tomado en el instante anterior a la fractura. Siendo, tabulados los datos obtenidos y promediando para cada factor de tratamiento en los Anexos L, M y N respectivamente. En la Figura 2-7 se muestra el ensayo de resistencia a la compresión realizado.



Figura 2-7. Ensayo de resistencia a la compresión. Fuente: Autor.

2.6.4 Procedimiento para determinación de la durabilidad de briquetas de biomasa basado en la norma ASTM E 1288

El ensayo de medición de durabilidad se realiza con ayuda de un tambor giratorio. Esta prueba se basa fundamentalmente en pesar cada una de las muestras, ubicarlas en el interior de un tambor giratorio durante un tiempo de 5 min que gira a una velocidad angular de 50 rpm [50]. Una vez transcurrido este tiempo se detiene el tambor y las fibras que se

han desprendido de las briquetas en el interior del tambor son recogidas. Posteriormente, se realiza el pesaje de cada una de las muestras para el cálculo del índice de durabilidad, el cual es definido como la relación entre la masa final y masa inicial de las briquetas, dado como porcentaje [50]. Cada vez que se realiza un ensayo se realiza la limpieza del interior del tambor con ayuda de un cepillo, para evitar algún tipo de contaminación entre ensayos.

2.6.5 Procedimiento de determinación de porcentaje de cenizas basado en la norma ASTM E 1755

La determinación del porcentaje de cenizas se basa en la medición del porcentaje de masa de los residuos; luego, de someter a las muestras a oxidación empleando una temperatura entre 575 a 625 ± 25 °C [54]. A continuación, se relaciona cada uno de los pasos para realizar la medición de porcentaje de cenizas basado en ASTM E1755. En la realización del ensayo se utilizaron crisoles de platino herméticamente cerrados con capacidad de más de 50 ml, horno con temperatura controlada entre 105 y 600 ± 2 °C, una balanza de 0,1 mg de precisión y desecador. Previamente se realizó pesaje de cada una de las muestras de biomasa, siendo el peso de estas por recomendación del estándar 2 g [54]. Posteriormente, se realiza la ignición del crisol vacío dentro de horno a temperatura de 575 °C durante 3 h, se enfría en un desecador y se realiza pesaje [54]. Luego se introduce en el horno el crisol con la muestra de biomasa y se lleva el horno a una temperatura de 575 °C por 3 h; para, evitar incineración de las fibras se debe llevar esta temperatura de manera paulatina iniciando con 250 °C aumentando a 10 °C/min manteniendo 30 min como se recomienda en la norma. Posteriormente, se enfría en desecador y se realiza el pesaje de las muestras para determinar el porcentaje de ceniza. El procedimiento anterior se repite hasta que la diferencia en peso fue de 0,3 mg y se garantice la eliminación de todo el carbono; advirtiéndose que, por recomendación de la norma se realizó la buena práctica de no retirar la tapa del crisol para impedir la absorción de humedad [54]. A continuación, se presenta la relación para el cálculo de porcentaje de cenizas [54]:

$$\% \text{ Ash} = \left[\frac{M_{\text{ash}} - M_{\text{cont}}}{M_{\text{od}} - M_{\text{cont}}} \right] \cdot 100\% \quad \text{Ecuación 2-4}$$

2.6.6 Procedimiento de determinación de poder calorífico basado en la norma ASTM D 240

El método se basa en la medición de una muestra de análisis, preparada a partir de biomasa residual proveniente de Palma de Aceite Africana. Para la realización de las mediciones se ejecutó el siguiente consecutivo de operaciones basado en el procedimiento establecido en

Se inició con el pesado de las muestras distribuyendo los compuestos de manera homogénea en el recipiente; pesando anticipadamente 1 gr de la muestra. Posteriormente, se adiciono 1,0 mL de agua en la bomba usando una pipeta; previamente, enjuagando la bomba y removiendo el exceso de agua. Una vez agregada el agua en la bomba se cargó la bomba con oxígeno a una presión entre 2,03 a 3,04 MPa (20 a 30 atm) [55]. Las observaciones y mediciones se realizaron mediante el método isotérmico Jacket registrando la temperatura cuando el equilibrio fue alcanzado de la siguiente manera:

Después de 5 min de iniciado el aumento de temperatura por llama se alcanzó el equilibrio; registrando los datos de la temperatura durante los primeros 5 minutos con un intervalo de 1 min.

A continuación, se presentan las fórmulas usadas para el Cálculo de temperatura de acuerdo a cada uno de los métodos utilizados:

- Aumento de la temperatura en el método calorímetro isotérmico de Jacket [56]:

$$T = T_c - T_a - r_1(b - a) - r_2(c - b) \quad \text{Ecuación 2-5}$$

Posteriormente se calcula el poder calorífico realizando correcciones según lo descrito en el numeral 10.3 del estándar ASTM D 240.

3. Capítulo: Análisis y discusión de resultados

En este Capítulo se presentan los resultados de las mediciones realizadas a propiedades térmicas, mecánicas y físicas de las briquetas fabricadas con tusa de palma de aceite. Asimismo, su análisis y discusión referenciando valores ideales esperados y obtenidos; teniendo en cuenta, procedimientos realizados estandarizados, apreciaciones de instrumentos y condiciones de ensayos.

3.1 Análisis de propiedades mecánicas

En la Tabla 3-1 (ver Anexo L) se muestran los resultados obtenidos para mediciones de las propiedades mecánicas, tales como densidad, índice de durabilidad y resistencia a la compresión de las briquetas cuyas muestras proceden del cultivo de Fundación; asimismo, en la Tabla 3-2 y Tabla 3-3 (ver Anexos M y N) se exhiben los resultados del cultivo de la Zona Central y Zona Oriental procedentes de Sábana de Torres y Puerto Gaitán, respectivamente.

Mediante el uso de software estadístico se realizan corridas de los datos obtenidos tabulados; graficándose, cada uno de los factores de clasificación vs. los factores de tratamiento. A continuación, se presentan las gráficas de los resultados presentando primero los resultados de propiedades mecánicas de acuerdo a su relevancia para la investigación. Posteriormente se realiza el análisis de resultados. Inicialmente se muestran

los resultados para densidad aparente, seguido por el índice de durabilidad y resistencia a la compresión.

Para la densidad aparente los resultados tienen un coeficiente de correlación de 84,53 % y un error absoluto medio de 0,048 g/cm³; teniendo en cuenta las tres variables experimentales independientes. La influencia de cada una de estas variables se puede observar en las Figuras 3-1 y 3-2.

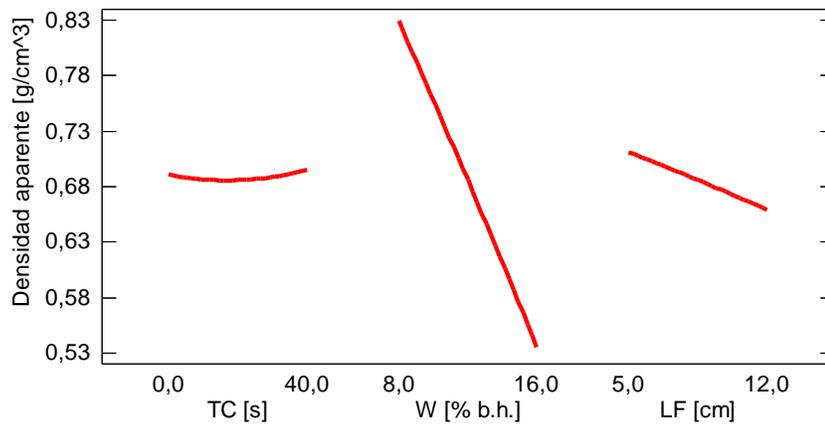


Figura 3-1. Grafica de efectos principales para densidad aparente. Fuente: Autor

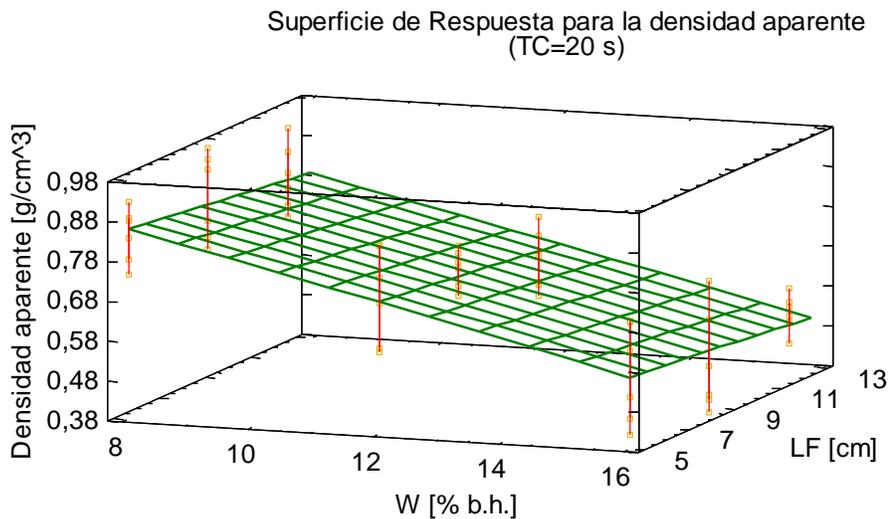


Figura 3-2. Superficie de respuesta para la densidad aparente. Fuente: Autor.

Del procesamiento estadístico de los datos experimentales también se obtiene la ecuación ajustada para el modelo de densidad aparente. Luego de eliminar los coeficientes estadísticamente no significativos, de acuerdo al ANOVA, la expresión para la densidad aparente queda como:

$$D_a = 1,25167 - 0,0423647W - 0,021983LF \quad \text{Ecuación 3-1}$$

De las Figuras 3-1 y 3-2 se concluye que para el factor de clasificación de densidad aparente (D_a) la influencia de mayor a menor de los factores de tratamiento son el porcentaje de humedad (W), longitud de fibra (LF) y tiempo de compactación (TC). Aclarando que la variable de longitud de fibra posee una influencia del 15 % en la densidad aparente. Por otra parte, no hay una influencia significativa del tiempo de compactación en la densidad aparente; siendo, el doble el peso en los resultados de la longitud de fibra sobre el tiempo de compactación en los resultados de la densidad aparente. Asimismo, el nivel de tratamiento óptimo de porcentaje de humedad para obtener las densidades más altas es del 8% b.h.; siendo, el valor máximo de densidad de 0,83 g/cm³.

Analizando específicamente el contenido de humedad se destaca el hecho de que a mayor porcentaje de humedad se alcanza una menor densidad aparente; siendo, su comportamiento lineal descendente con una pendiente de 0,0375. De manera contraria, el tiempo de compactación es directamente proporcional a la densidad de las briquetas. No obstante, al variar el tiempo de compactación el aumento de la densidad no es tan marcado como el obtenido al disminuir el contenido de humedad. Por su parte, la longitud de fibra es inversamente proporcional a la densidad de la briketa; la tasa de disminución de densidad a medida que aumenta la longitud de la fibra es de 7,4e-6 kg/m³ por cada centímetro de longitud de fibra. Lo anterior debido a que a menor longitud de fibra mejor será la acomodación del material para un volumen dado, por consiguiente, se incrementará la densidad de la briketa. Por otra parte, en la Figura 3-1 se observa la curva de los resultados del tiempo de compactación; se grafican los 27 puntos de la combinatoria de acuerdo a los anexos L, M y N; siendo, el valor mínimo alcanzado de densidad aparente dependiendo del tiempo de compactación 0,50 gr/cm³.

En la Figura 3-3 se puede observar el diagrama de Pareto para densidad aparente (D_a). Donde se observa el claro efecto que tiene el contenido de humedad sobre los resultados siendo su influencia seis y doce veces mayor que la de longitud de la fibra y tiempo de compactación, respectivamente. Asimismo, la variable contenida de humedad por si sola tiene nueve veces mayor influencia en los resultados, que la combinación ideal de longitud de la fibra y tiempo de compactación y el área ideal de la combinación contenido de humedad y longitud de la fibra. Lo anterior debido a que el contenido de humedad es quien determina la fuerza de compactación e influye en la activación de la lignina y su efecto en la plastificación del material densificado. Asimismo, se observa (color gris en la barra con signo negativo) que la influencia del contenido de humedad y longitud de fibra es inversa. Por otra parte, no se observa influencia significativa de las interacciones entre variables independientes y/o dependencia cuadrática de las mismas.

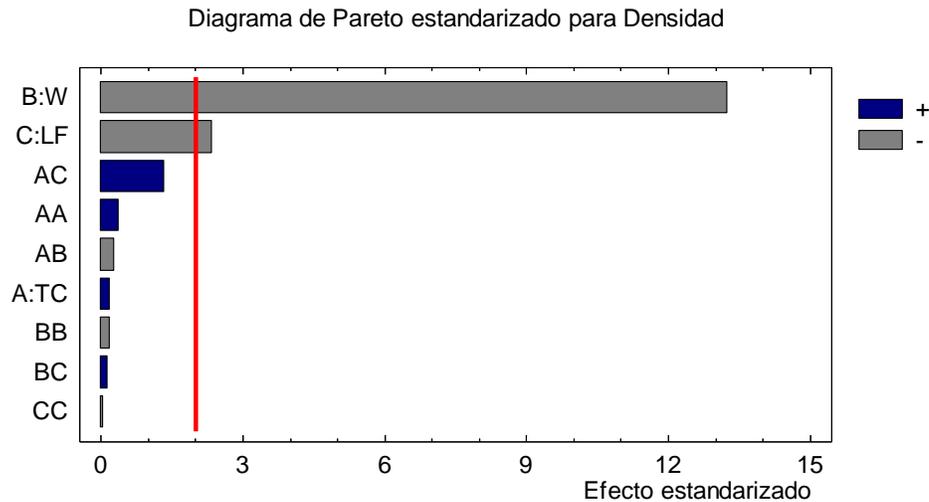


Figura 3-3. Diagrama de Pareto estandarizada para D_a .

Los resultados para el índice de durabilidad (ID) obtenidos mediante software estadístico especializado aparecen en la Figura 3-4. Donde se observa la influencia del tiempo de compactación, contenido de humedad y longitud de fibra. Destacando, que el coeficiente de correlación fue de 62,40 %, con un error absoluto medio de 0,667 %; siendo el punto máximo para las curvas del comportamiento de tiempo de compactación y longitud de fibra de 99,3 % y 45,7 kN, respectivamente.

Es de resaltar que la diferencia entre la influencia de los factores de tratamiento no es tan grande como la existente para la densidad aparente. Al igual, que en la densidad aparente la variable de mayor incidencia es el porcentaje de humedad y su valor ideal es 8 % b.h; agregando, que considerando los valores de energía de entrada y resultados obtenidos es el valor ideal para obtener resultados óptimos de Índice de Durabilidad. A medida que aumenta el contenido de humedad el índice de durabilidad decrece a una tasa de 0,225 por cada 1 % b.h. de humedad. En la figura 3-4 se observa que para un tiempo de compactación superior a 37 s la durabilidad decrece levemente; lo anterior es ratificado en la Tabla Q-2 de Anova; por lo tanto, es este el valor máximo ideal obtenido de la extrapolación

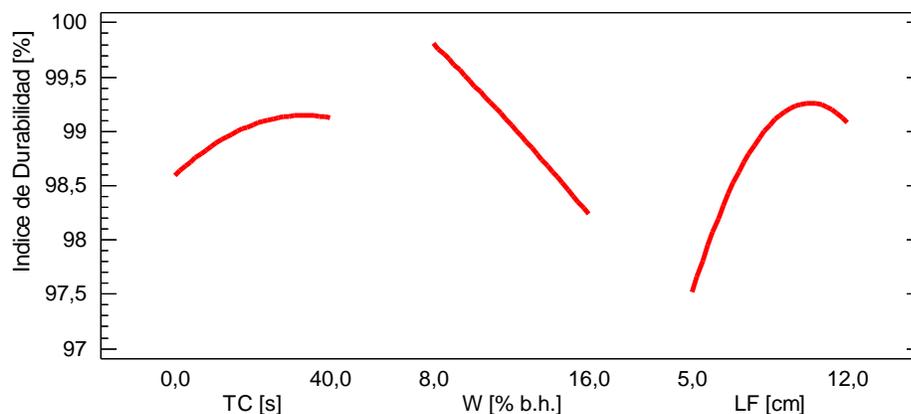


Figura 3-4. Gráfica de efectos principales para el índice de durabilidad. Fuente: Autor.

En el caso de la longitud de la fibra, a mayor longitud de fibra es mayor el entrelazamiento de las mismas, evitando un mayor desprendimiento; sin embargo, si esta longitud es superior a 8,53 cm el índice de durabilidad comienza a decrecer debido a que se dificulta el entrecruzamiento entre las fibras y ocurre un fenómeno de restitución elástica más pronunciado del material de las briquetas. Lo anterior se evidenció por medio de la observación de las briquetas, varias horas después de realizar su prensado. En la Figura 3-5 se puede observar la superficie de respuesta para el índice de durabilidad. Asimismo, el coeficiente de correlación para el índice de durabilidad es 62,4%; el cual es bajo, pero

se encuentra dentro del rango de valores posibles para algunos tipos de densificación de biomasa.

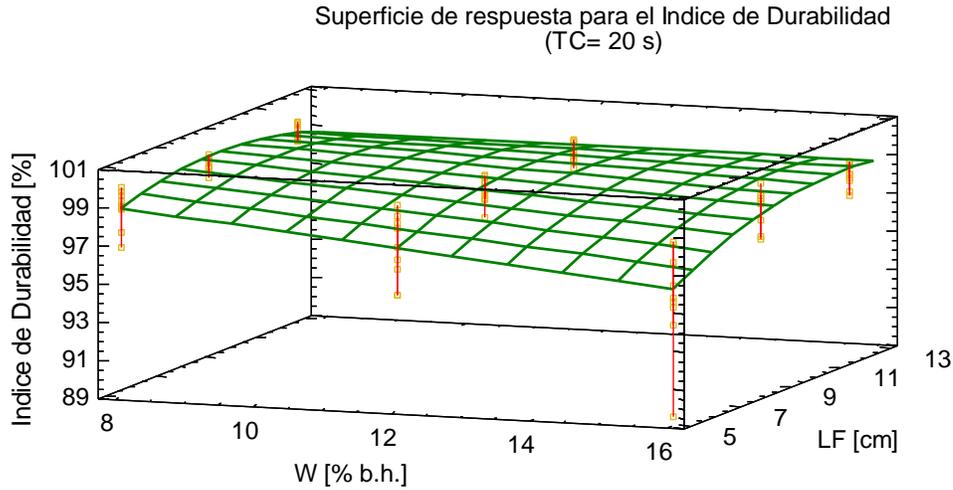


Figura 3-5. Superficie de respuesta para el índice de durabilidad. Fuente: Autor.

Del procesamiento estadístico de los datos experimentales también se obtiene la ecuación ajustada para el modelo de Índice de Durabilidad. Luego de eliminar los coeficientes estadísticamente no significativos, de acuerdo al ANOVA, la expresión para el Índice de Durabilidad queda como:

$$ID = 98,9144 - 0,595499W + 0,85031LF - 0,0622373LF^2 + 0,0432341W \cdot LF \quad \text{Ecuación 3-2}$$

El comportamiento del tiempo de compactación y longitud de fibra es similar; igualmente, a lo ocurrido en la densidad aparente; donde, la influencia de la longitud de fibra es mayor al tiempo de compactación. Aclarando, que los valores óptimos para longitud de fibra y tiempo de compactación son de 8,53 cm y 21 s, respectivamente. Por lo tanto, con estos parámetros descritos se obtuvo un máximo del índice de durabilidad de 99,83%. Lo anterior es debido a que se crea un ambiente propicio para la activación de la lignina, influido por la temperatura de 90 ± 3 °C y un contenido de humedad bajo; por otra parte, la longitud de fibra influye en los resultados a través del bloqueo mecánico entre fibras; y el tiempo de

compactación influye a través del proceso de plastificación evitando el desprendimiento de fibras. El proceso de plastificación se desarrolla bien cuando el tiempo de compactación es de 21 s, debido a la tasa de vaporación de la humedad no es significativo para este valor. Es decir, se requiere activación de la lignina, tiempo de plastificación y evitar la vaporización de la misma.

En la Figura 3-6 se observa la paridad de la influencia del contenido de humedad y la longitud de la fibra; siendo, significativa la influencia de la primera. Además, se destaca el hecho de que la combinación entre contenido de humedad y longitud de fibra tiene el mismo peso en los resultados que el tiempo de compactación como se observa en la Figura 3-6; adicionalmente, la incidencia en el índice de durabilidad al combinar las variables tiempo de compactación y longitud de fibra es semejante al combinar tiempo de compactación y contenido de humedad.

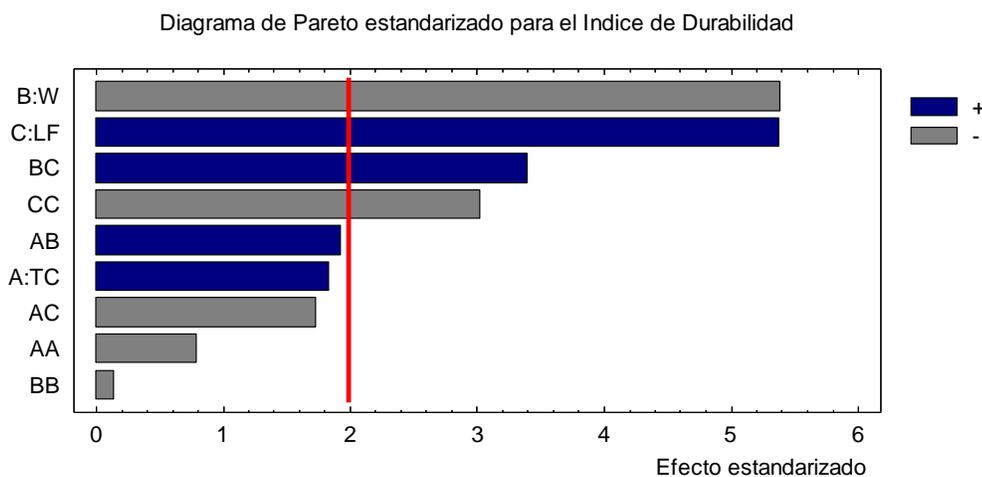


Figura 3-6. Diagrama de Pareto estandarizado para índice de durabilidad. Fuente: Autor.

El resultado de la resistencia a la compresión se observa en las Figuras 3-7 y 3-8. El modelo obtenido presenta un coeficiente de correlación de 70,19%, con un error absoluto medio de 5,066 kN. Se evidencia que los factores de tratamiento de mayor influencia son el contenido de humedad y la longitud de la fibra. Además, en el índice de durabilidad es mayor la influencia del primero sobre el segundo factor mencionado. El comportamiento de la resistencia a compresión de las briquetas con el tiempo de compactación es similar al obtenido para el índice de durabilidad. Se alcanza un máximo de resistencia a la

compresión de 35,7 kN para un valor ideal de tiempo de compactación de 11,6 s. Paralelamente, la gráfica de contenido de humedad vs resistencia a la compresión muestra al igual en lo sucedido con la densidad aparente e índice de durabilidad, este factor de tratamiento es el de mayor influencia. Asimismo, el valor ideal es 8% b.h. para obtener un valor máximo de resistencia a la compresión de 35,7 kN. También, se resalta del comportamiento que a medida que se aumenta el contenido de humedad decrece a una tasa de 2,38 kN por cada 1% b.h. que se aumente. Lo anterior debido a que la fuerza necesaria para realizar el proceso de compactación es función del contenido de humedad. Sin embargo, a menor contenido de humedad mayor será la energía requerida, siendo necesario un balance entre parámetros del proceso para lograr las mejores características. El coeficiente de correlación para resistencia a la compresión es de 70,19 %; el cual es bajo, pero se encuentra en el rango de valores esperados para biomazas.

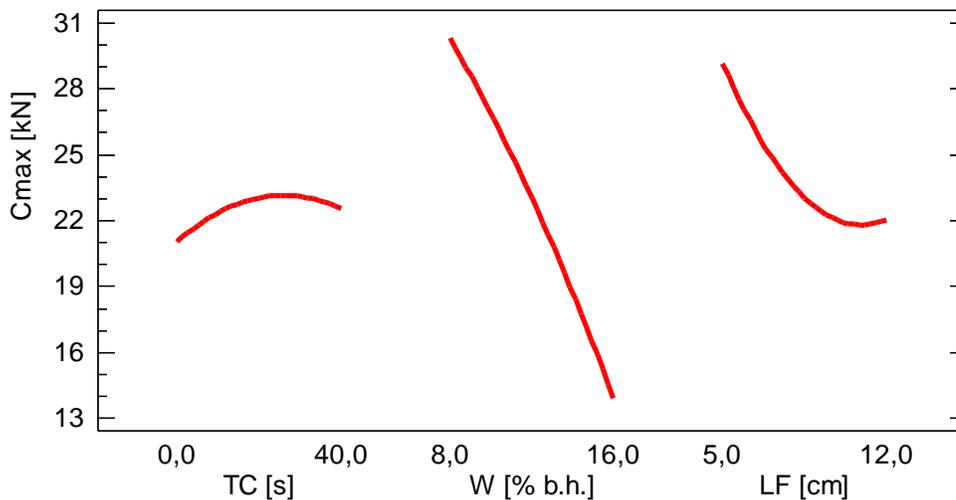


Figura 3-7. Efectos principales para la resistencia a la compresión. Fuente: Autor.

De acuerdo al modelo estadístico matemático obtenido, el comportamiento de la curva para longitud de la fibra exhibe un valor ideal para una longitud de fibra de 5 cm, obteniendo un máximo de resistencia a la compresión de 29,5 kN. Este valor decrece hasta que la longitud de la fibra es 10 cm; lo anterior debido, a que a mayor longitud de fibra menor es

su compactibilidad, como se observa en los resultados de densidad aparente; asimismo, el espaciado entre fibras aumentará produciendo disminución en la resistencia a la compresión. Además, se muestra un leve aumento en la resistencia posterior a longitudes mayores a 10 cm, debido a que ésta se estabiliza alrededor de los 23 kN, por la resistencia propia de la estructura de cada fibra. Agregando, que se establecen los rangos ideales de valores donde se presenta una influencia significativa por medio de ensayos preliminares realizados.

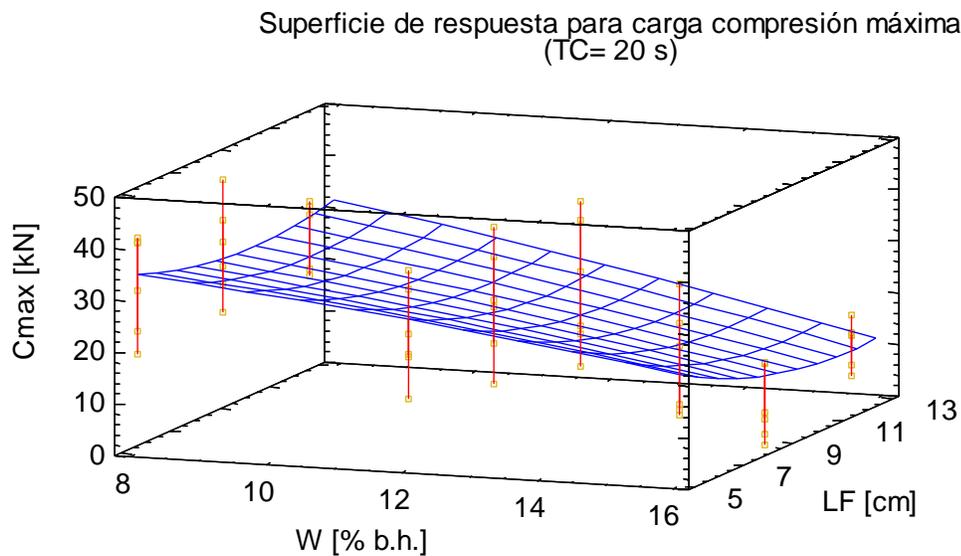


Figura 3-8. Superficie de respuesta para la resistencia a la compresión. Fuente: Autor.

Del procesamiento estadístico de los datos experimentales también se obtiene la ecuación ajustada para el modelo de resistencia a la compresión. Luego de eliminar los coeficientes estadísticamente no significativos, de acuerdo al ANOVA, la expresión para la resistencia a la compresión queda como:

$$C_{max} = 55,5228 + 0,597917W - 4,2913LF + 0,056161TC \cdot LF \quad \text{Ecuación 3-3}$$

En la Figura 3-9 se presenta el diagrama de Pareto, donde se observa que el contenido de humedad es la variable de mayor influencia. Además, se aprecia que el efecto combinado de los factores de tratamiento no es significativo en los resultados.

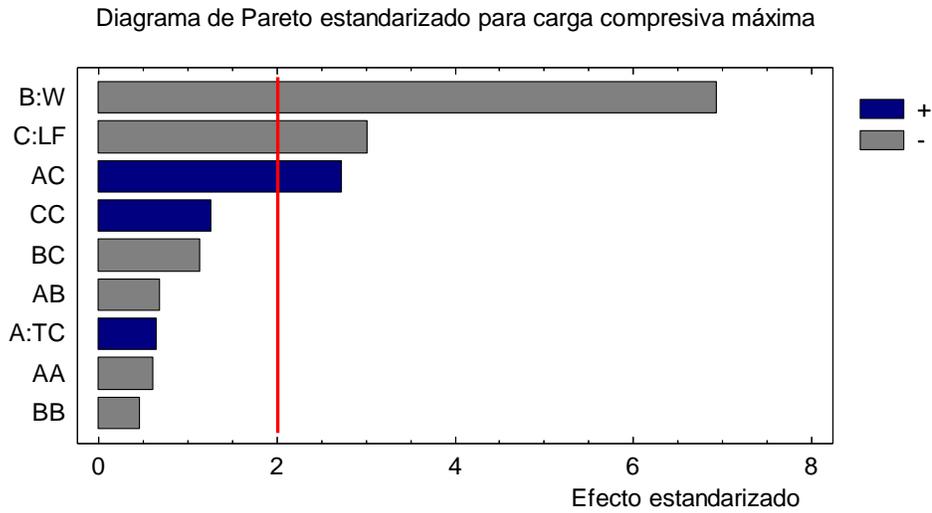


Figura 3-9. Diagrama Pareto estandarizada para resistencia a la compresión. Fuente: Autor.

Del anterior análisis, se establece que los valores ideales para las variables cuantitativas esenciales son: contenido de humedad de 8% b.h., longitud de fibra 85 mm y tiempo de compactación de 20 s. Consecuentemente, para establecer la forma de unión entre fibras se realizó observación de las briquetas por medio de estéreo microscopía y microscopía electrónica de barrido.

3.1.1 Análisis con estéreo microscopía y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

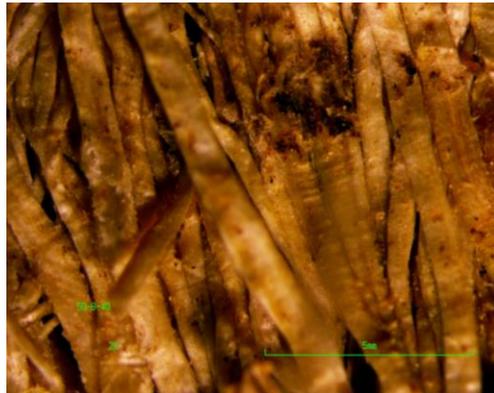
Se realizaron observaciones mediante estéreo microscopía y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés) de las briquetas con mejores características de propiedades mecánicas y aquellas de resultados deficientes para establecer comportamientos en la unión de fibras. En la Figura 3-10 se observa el perfil de la briketa al realizar observación con estéreo microscopía.



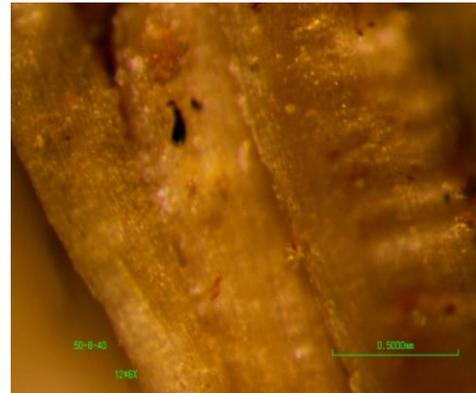
Aumento 2X: Briqueta de 8% b.h., 85 mm, 20 s



Aumento 12,6X: Briqueta de 8% b.h., 85 mm, 20 s



Aumento 2X: Briqueta de 8% b.h., 50 mm, 20 s



Aumento 12,6X: Briqueta de 8% b.h., 50 mm, 20 s



Aumento 2X: Briqueta de 16% b.h., 85 mm, 20 s



Aumento 6X: Briqueta de 16% b.h., 85 mm, 20 s

Figura 3-10. Estereomicroscopía para un grupo de briquetas seleccionadas. Fuente: Autor.

Se realizaron observaciones en muestras de 8 % b.h., 85 mm y 20 s; 8 % b.h., 50 mm y 40 s y a briquetas con 16 % b.h., 85 mm y 20 s respectivamente. Como resultado se aprecia, para un aumento de 2X, una mejor acomodación de las fibras para longitudes de 50 mm en comparación con las longitudes de 85 mm. Sin embargo, el entrelazamiento para la primera longitud es pobre comparado con el que se aprecia para la longitud de fibra de 85 mm. Por otra parte, con un aumento de 2X hasta 12,6X se puede observar mayor superficie soldada entre fibras para briquetas con un contenido de humedad del 8 % b.h., cuando se compara el área unida, fusionada o soldada con briquetas con contenido de humedad del 16 % b.h. Debido a lo anterior, se evidencia que contenidos de humedad de 8 % favorecen la unión entre las fibras al presentar mayor área soldadas entre las mismas. Asimismo, a menor longitud de fibra mayor será su acomodamiento, pero su entrelazamiento será deficiente; siendo la longitud de 85 mm ideal para un correcto entrelazamiento. Por otra parte, en la Figura 3-11 se presentan observaciones realizadas con SEM de briquetas de 16 % b.h., 85 mm y 20 s; asimismo, en la Figura 3-12 se exhibe SEM de muestras de 8 % b.h., 85 mm y 20 s. Por último, en la Figura 3-13 se presenta la imagen SEM de briquetas con las mejores características respecto a propiedades mecánicas (valores 8 % b.h., 85 mm y 20 s); exhibiéndose una menor zona de unión superficial entre fibras en las briquetas con contenidos de humedad de 16 % b.h. respecto a briquetas con porcentaje de humedad del 8 % b.h.

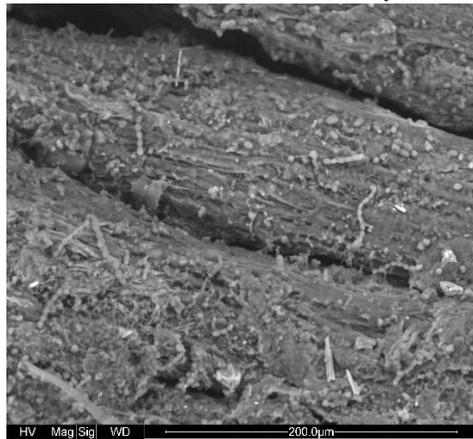
Las fibras de 50 mm poseen mayor zona de unión entre sí respecto a las fibras de 85 mm; no obstante, es poco su grado de entrelazamiento. En las fibras de 85 mm se notan zonas espaciadas entre sí; comparando, con las fibras de 50 mm se presentan zonas de menor área de espaciado entre fibras. Por lo tanto, a menor tamaño de fibra mejor será su acomodamiento. En concordancia con los resultados de caracterización; se establece, que las briquetas que poseen mayores zonas soldadas entre sí o áreas blancas entre fibras, son las briquetas que poseen mayor densidad y resistencia a la compresión.



Aumento 50X: 16% b.h, 85 mm y 20 s.



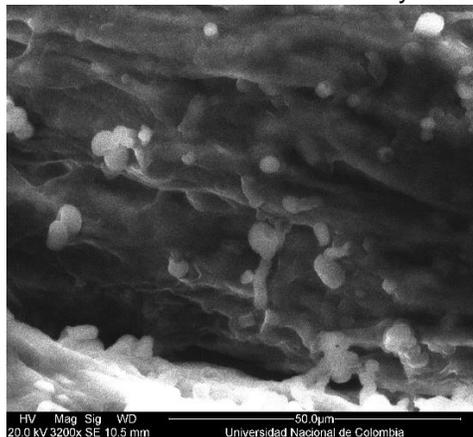
Aumento 200X: 16% b.h. 85 mm y 20 s.



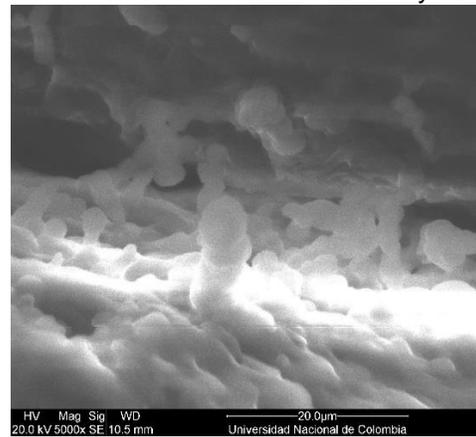
Aumento 800X: 16% b.h. 85 mm y 20 s.



Aumento 1000X: 16% b.h. 85 mm y 20 s.



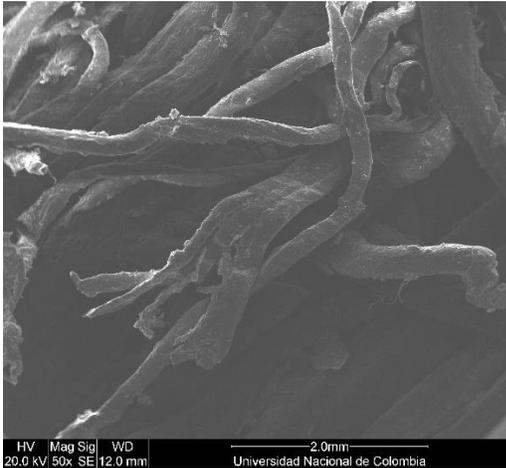
Aumento 3200X: 16% b.h., 85 mm y 20 s.



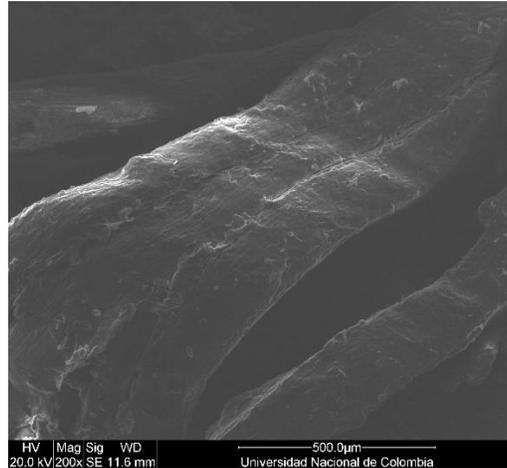
Aumento 5000X: 16% b.h. 85 mm y 20 s.

Figura 3-11. Microscopía de Barrido Electrónico para briqueta de 16% b.h. de contenido de humedad, 85 mm de longitud de fibra y 20 s de tiempo de compactación. Fuente:

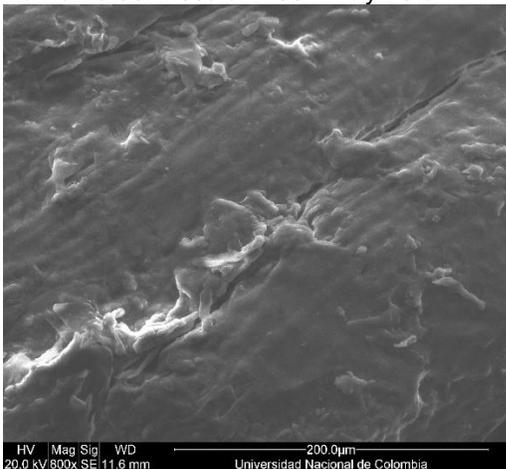
Autor.



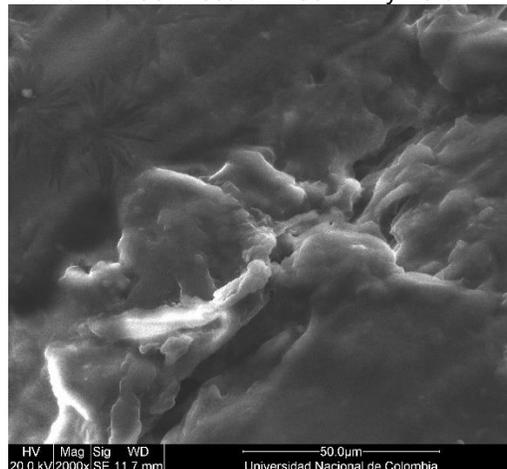
Aumento 50X: 8% b.h. 85 mm y 20 s.



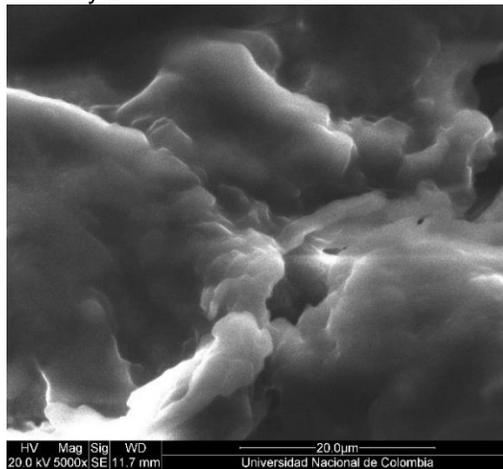
Aumento 200X: 8% b.h. 85 mm y 20 s.



Aumento 800X: 8% b.h. 85 mm y 20 s.

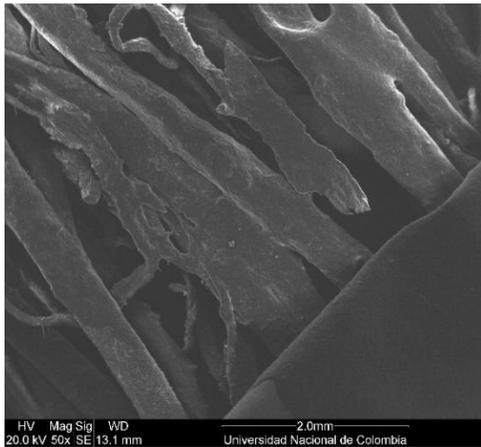


Aumento 2000X: 8% b.h. 85 mm y 20 s.

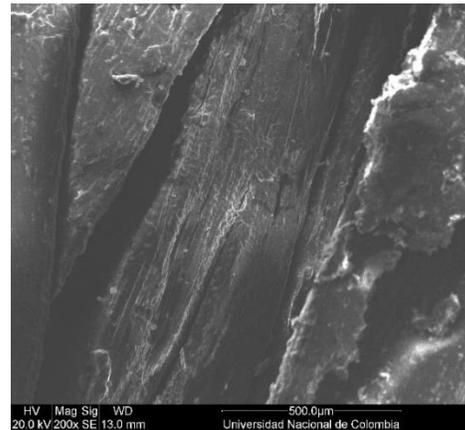


Aumento 5000X: 8% b.h. 85 mm y 20 s.

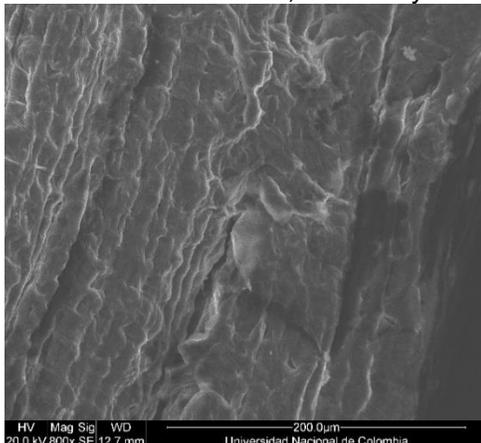
Figura 3-12. Microscopía electrónica de barrido para briqueta con 8% b.h. de contenido de humedad, 85 mm de longitud de fibra y 20 s de tiempo de compactación. Fuente: Autor.



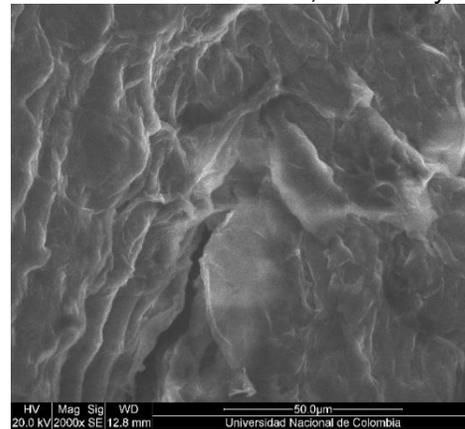
Aumento 50X: 50 mm, 8% b.h. y 20 s.



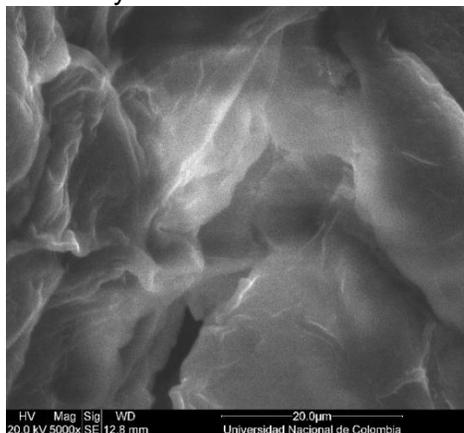
Aumento 200X: 50 mm, 8% b.h. y 20 s.



Aumento 800X: 50 mm, 8% b.h. y 20 s.



Aumento 2000X: 50 mm, 8% b.h. y 20 s.



Aumento 5000X: 50 mm, 8% b.h. y 20 s.

Figura 3-13. Microscopía electrónica de barrido para briqueta con 8% b.h. de contenido de humedad, 50 mm de longitud de fibra y 20 s de tiempo de compactación. Fuente: Autor.

Además, se realiza una comparación con imágenes de SEM obtenidas de estudios de biomásas similares a la de la tusa de palma de aceite, realizadas por otros autores como Huang [57] sobre carbonización de lignina en biodiesel producido por catálisis; donde se establece que la lignina o fibra envolvente de la biomasa se rompe permitiendo la salida de celulosa o hemicelulosa; paralelamente, se revisan otros artículos donde se aprecie imágenes de lignina. Como por ejemplo, el estudio sobre reubicación de lignina en bagazo de sorgo de Yan [58], donde se muestran las soldaduras entre fibras similar a las obtenidas; asimismo, el estudio sobre ciclo-dextrina injertada en lignina de Yang [59]; el cual, posee estudios de resonancia magnética nuclear; donde, se comenta que las áreas blancas observadas entre fibras es lignina; paralelamente se revisan conclusiones de estudios de lignina de Gong [60]; donde destacan el hecho, de que las zonas blancas que aparecen en las imágenes de SEM entre fibras es lignina activada por temperatura. Realizando analogía entre las imágenes obtenidas en la presente investigación (imágenes SEM obtenidas en laboratorio de la Universidad Nacional de Colombia) con imágenes de otros autores [59, 69], existe la posibilidad de que las zonas blancas entre fibras sea lignina; con la aclaración de que no se puede afirmar categóricamente.

3.2 Análisis de composición química y propiedades térmicas

Se realizó análisis elemental mediante analizador orgánico elemental utilizando equipo Thermo Scientific Flash 2000 CHNS/O en los laboratorios de Química de la Universidad Nacional de Colombia a las muestras a las cuales se realizó observaciones mediante estéreo microscopía y Microscopía Electrónica de Barrido, con el propósito de conocer la composición en cuanto a carbono, nitrógeno, hidrogeno, azufre y oxígeno, este último por diferencia. Se agrega en el ensayo 5 mg de V_2O_5 para una mejor reacción del Azufre y permitir su mejor detección; destacándose el hecho de que no se detectó presencia de

Azufre en las muestras. Se puede concluir que no se generaron compuestos SO_x durante la combustión para la producción de energía utilizando tusa de palma de aceite como materia prima. Asimismo, individualizando resultados se observan los datos obtenidos para el cultivo Zona Norte en la Figura 3-14 listados en Tabla 3-4, donde se destaca que el Carbono es el elemento de mayor presencia, seguido por Hidrogeno y Nitrógeno.

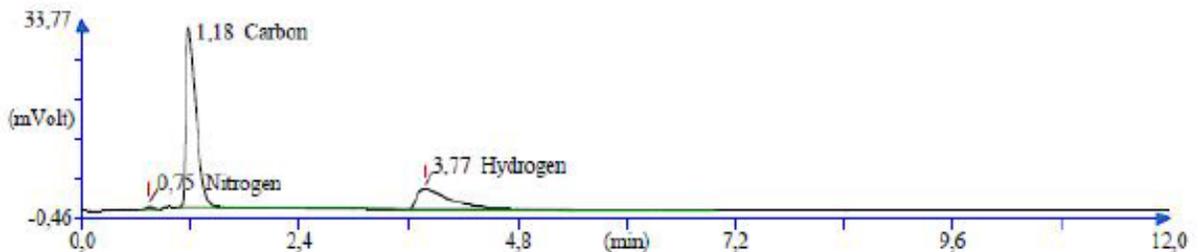


Figura 3-14. Resultado de análisis elemental para cultivo proveniente de Fundación.

Fuente: Autor.

Tabla 3-1. Tabla de resultados de análisis elemental para cultivo Fundación.

Elemento	Porcentaje [%]
Carbono	40,8091
Hidrogeno	5,6657
Nitrógeno	1,0112
Total	47,4860

En la Figura 3-15 listada en Tabla 3-5 se observan los resultados obtenidos para la Zona Central. Donde se destaca una mayor presencia de carbono, hidrogeno y nitrógeno respecto a los otros dos cultivos.

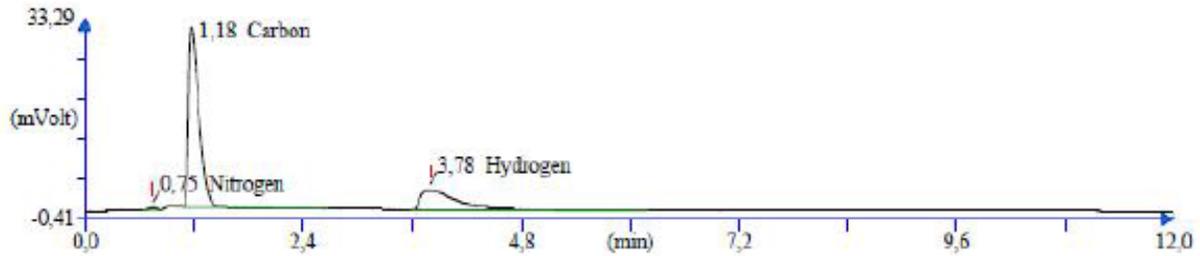


Figura 3-15. Resultado de análisis elemental para cultivo Sabana de Torres. Fuente: Autor.

Tabla 3-2. Tabla de resultados de análisis elemental para cultivo Sabana de Torres.

Elemento	Porcentaje [%]
Carbono	47,6872
Hidrogeno	6,2011
Nitrógeno	1,0359
Total	54,9277

En la Figura 3-16 listada en Tabla 3-6 se presentan los resultados obtenidos para el cultivo Zona oriental; exhibiendo, un menor contenido de carbono respecto a las otras dos zonas, aunque con un mayor porcentaje de Hidrogeno respecto a la zona Norte.

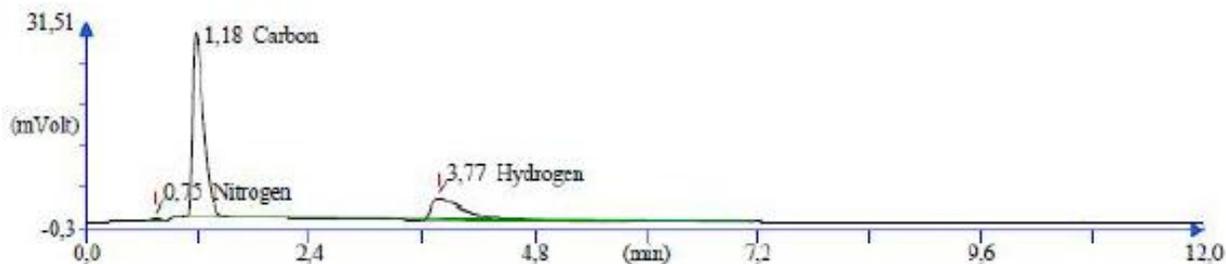


Figura 3-16. Resultado de análisis elemental para cultivo Puerto Gaitán. Fuente: Autor.

Tabla 3-3. Tabla de resultados de análisis elemental para cultivo Puerto Gaitán.

Elemento	Porcentaje [%]
Carbono	37,7644
Hidrogeno	5,9680
Nitrógeno	1,0136
Total	44,7460

Se señala que las mediciones que son mostradas en las Tablas 3-1 a 3-3 son en base húmeda.

Adicionalmente, se realiza ensayo de poder calorífico de acuerdo a la norma ASTM D 240. La cual establece un método estándar para la medición del calor de combustión por medio de un calorímetro de bomba. Para lo cual se emplea una balanza Mettler Toledo modelo AB 204 SNR 111660708 y Calorímetro IKA C 2000 Basic S1, operando en modo isoperbólico. Asimismo, se usó oxígeno industrial extraseco grado 2,7 a una presión de 30 bar. La temperatura de la chaqueta del calorímetro fue controlada a 25 °C.

El contenido de cenizas se determina dada la importancia que se le confiere en las normas para briquetas, estableciéndose niveles permitidos para correcciones establecidas por la

norma. Se puede afirmar que las briquetas fabricadas con tusa de palma de aceite poseen un contenido de ceniza que se encuentra dentro de los valores permitidos por la normatividad europea. El contenido de cenizas también fue empleado en la estimación del poder calorífico utilizando correlaciones empíricas. Lo anterior, permitió comparar los valores de poder calorífico superior obtenidos en laboratorio con los estimados. En la Tabla 3-7 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos realizados en laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia.

Tabla 3-4. Poder calorífico por cultivo en base húmeda.

Zona de procedencia	Poder Calorífico Superior (HHV) [MJ/kg]
Cultivo de Fundación	18,631
Cultivo Sábana de Torres	17,845
Cultivo Puerto Gaitán	18,197

Adicionalmente, como ya se mencionó se determinó mediante ensayo basado en procedimiento descrito en ASTM E1755, el contenido de cenizas; arrojando un resultado promedio de 5,6249 % para los tres cultivos. Por otra parte, para establecer el valor teórico del poder calorífico; autores han generado correlaciones basadas en los datos de HHV obtenidos para biomásas; por lo tanto, se utilizan las correlaciones para cálculo del poder calorífico basado en los resultados de contenido de cenizas y análisis de composición química; obtenidos, para biomásas similares a la tusa; destacando, el hecho de que sus coeficiente de correlación en la literatura oscila entre 0,6 a 0,7, respecto, a los valores obtenidos mediante ensayo.

El cálculo de poder calorífico se divide en tres grupos como son: basado en análisis próximo, análisis último y composición química. Dentro del análisis próximo se encuentran correlaciones basadas en contenido de cenizas, material volátil y Carbono fijo; escudriñando, en estas correlaciones se encuentran la correlación de Sheng y Azevedo [61]; la cual, se basa en el contenido de cenizas. En la Tabla 3-

8, se presenta la fórmula para hallar el valor según la correlación de Sheng y Azevedo [61] para análisis próximo.

Tabla 3-5. Cálculo de HHV basado en análisis próximo.

Correlación de Sheng y Azevedo [61]	Poder calorífico [MJ/kg]	Coefficiente de correlación teórico
$HHV = 19,914 - 0,2324 Ash$	18,607	0,625

Asimismo, para el cálculo de valor teórico del HHV basado en el análisis último; se encuentran las correlaciones enunciadas en la Tabla 3-9; las cuales se basan en la presencia de Carbono, Hidrogeno, Oxigeno, Nitrógeno, Azufre y contenido de cenizas.

Tabla 3-6. Correlaciones para cálculo de HHV basado en análisis último.

Correlaciones basadas en análisis último	Fórmula	Coefficiente de correlación teórico
Tillman [61]	$HHV = 0,4373C - 1,6701$	0,666
Sheng y Azevedo [61]	$HHV = 0,3259C + 3,4597$	0,758
Boie [61]	$HHV = 0,351C + 1,16225H - 0,1109O + 0,0628N + 0,10465S$	0,720
Graboski y Bain [61]	$HHV = 0,328C + 1,4306H - 0,0237N + 0,0929S - (1 - Ash/100)(40.11H/C) + 0,3466$	0,647
Jenkins [61]	$HHV = 0,301C + 0,525H + 0,064O - 0,763$	0,792

En la Tabla 3-7, se presenta el cálculo del poder calorífico basado en correlaciones para análisis último.

Tabla 3-7. Cálculo del poder calorífico basado en correlaciones.

Correlación	HHV, cultivo Fundación [MJ/kg]	HHV, cultivo Sabana de Torres [MJ/kg]	HHV, cultivo Puerto Gaitán [MJ/kg]
Tillman	16,176	19,183	14,844
Sheng y Azevedo	16,759	19,001	15,767
Boie	15,159	18,196	14,442
Graboski y Bain	16,651	20,005	15,358
Jenkins	17,856	19,731	17,273

Se debe aclarar que las muestras para la medición de poder calorífico, contenido de cenizas y composición química fueron obtenidas de las mismas briquetas. Es decir, se seleccionaron tres briquetas, una por cada cultivo con similares condiciones (8 % de contenido de humedad, 85 mm de longitud y tiempo de compactación de 20 s) de acuerdo a resultados de valores ideales obtenidos en medición de propiedades mecánicas. Como consecuencia, de cada briqueta fueron obtenidas muestras que fueron de manera independiente entregadas para ensayos en los Laboratorios de Química y de Combustibles de la Universidad Nacional de Colombia.

A continuación, se realizará un análisis de los resultados obtenidos, utilizando los datos obtenidos de composición química para calcular el poder calorífico basado en correlaciones. Se aprecia que existe similitud entre los resultados de las correlaciones y los obtenidos de manera experimental. Por otra parte, las diferencias encontradas obedecen a diferencias en contenido de carbono encontradas en el análisis de composición elemental.

Realizando comparación entre el valor promedio de los datos obtenidos experimentalmente, el cual es de 18,2 MJ/kg; donde, no se presentan desviaciones

en las mediciones, y el valor calculado por correlación basado en análisis próximo de 18,6 MJ/kg cuyo coeficiente de correlación es 0,625, se concluye que el poder calorífico es superior a 18 MJ/kg. De igual manera, al realizar una comparación con los valores de análisis último se encuentran diferencias entre los valores calculados por medio de las correlaciones de análisis último y los resultados experimentales. A continuación, se enuncian las diferencias: menor valor de poder calorífico calculado por medio de correlaciones para el cultivo Puerto Gaitán, difiriendo de los datos experimentales donde fue el valor intermedio entre los cultivos. Asimismo, el valor más alto del poder calorífico se presenta en el cultivo de Sabana de Torres. El cual, experimentalmente fue el cultivo de menor valor de poder calorífico. Sin embargo, es de aclarar que la diferencias en los datos experimentales entre cultivos variaron en tan solo 786 kJ/kg; mientras, en los datos obtenidos en correlaciones oscilaron 4,647 MJ/kg. Por otra parte, si se revisan los resultados de la correlación de Sheng y Azevedo [61] para análisis próximo, y se compara con la correlación para análisis último, se encuentra que el poder calorífico en promedio es superior a los 17 MJ/kg. Además, este valor es el menor de los obtenidos de manera experimental (ver dato experimental de cultivo Sabana de Torres). De manera similar sucede al promediar los datos de las demás correlaciones para los cultivos estudiados. Por lo tanto, el poder calorífico medido de manera experimental y también calculado de manera teórica para la tusa de Palma de Aceite Africana es en promedio superior a 17 MJ/kg.

4. Análisis del impacto ambiental y socio-económico

4.1 Contexto y problemática socio-económica y ambiental del sector palmero

La ubicación geográfica del territorio colombiano genera condiciones ideales para los cultivos de Palma de Aceite Africana. Es así como suelos fértiles, alto contenido de humedad del ambiente, bastas planicies con alturas menores a 1200 m, temperaturas entre los 25 y 35 °C y regiones con bondadosa mano de obra en el sector agrario entre otras proporcionan condiciones atractivas a empresarios e inversionistas [5, 61]. Contextualizando, social y económicamente los cultivos de Palma Africana dentro del sector agrario colombiano; se encuentra, que éste hace dos décadas ha decantado por dirigirse a cultivos de rentabilidad tardía como Caucho, Cacao y Palma de Aceite Africana; destacando que los cultivos de Palma de Aceite son una alternativa económica dentro del dinamismo de las regiones donde tiene presencia. Asimismo, los terrenos donde actualmente se desarrollan estos cultivos en el pasado se extraía madera [62]; creando, en sus poblaciones relaciones socio-económicas propias de regiones dependientes de la explotación de los recursos naturales, dando origen a las interacciones entre los diferentes grupos que componen las zonas de cultivos de Palma Africana. En el país hacia el 2010 se encontraban sembradas 379 611 hectáreas de Palma de Aceite Africana (*Elaeis guineensis*), lo cual se ha incrementado en 23 %, contando en el 2015 con 466 185 hectáreas de cultivos en 11 departamentos (ver Anexo A) [5]. Estas regiones cultivadas

produjeron en el 2015 según la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (Fedepalma) 6 252 774 toneladas de fruta o corozo; teniendo en cuenta, porcentajes de participación del 39,3 % para la Zona Oriental, 30,3 % para la Zona Norte, 28,5 % para la Central y el 2 % para la Zona Sur-occidental. En la Figura 4-1 se puede ver la progresión histórica de la fruta procesada en Colombia para los últimos cinco años. Para extraer la cantidad mencionada de productos como aceites y torta de palmiste en Colombia se encuentran 50 plantas de beneficio ubicadas en 25 municipios, cuya labor es el acopio de la materia prima, también se encuentran activas 43 plantas extractoras. Esta producción nacional generó para el 2015 según Cenipalma 1 264 311 toneladas de tusa, 853 504 toneladas de fibra del mesocarpio y 352 031 toneladas de cuesco, como ya se mencionó [6]. Las anteriores cantidades de producción se han sostenido por las mejoras implementadas en asistencia de los cultivos; restaurando los afectados por la enfermedad de pudrición del cogollo ocurrida en el 2013; la cual, fue generada por la deficiente nutrición de los mismos. También se ha mejorado el rendimiento por hectárea de producción. Es así como el rendimiento sostenido por hectárea ha sido de aproximadamente 16 toneladas de corozo por hectárea desde el 2010 hasta el 2015 [5]. Por otro lado, los empleos generados por los cultivos de Palma Africana en un periodo de seis años comprendidos entre 2002 al 2008 se incrementaron en 93 %; pasando de 76 000 a 146 000 empleos directos según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [61], beneficiando principalmente la mano de obra no calificada, ocupando al 77 % de los habitantes de las regiones donde hay presencia de cultivos. Se destaca que el 14 % de estos empleos son generados por la cosecha y extracción de los productos en las plantaciones [61].

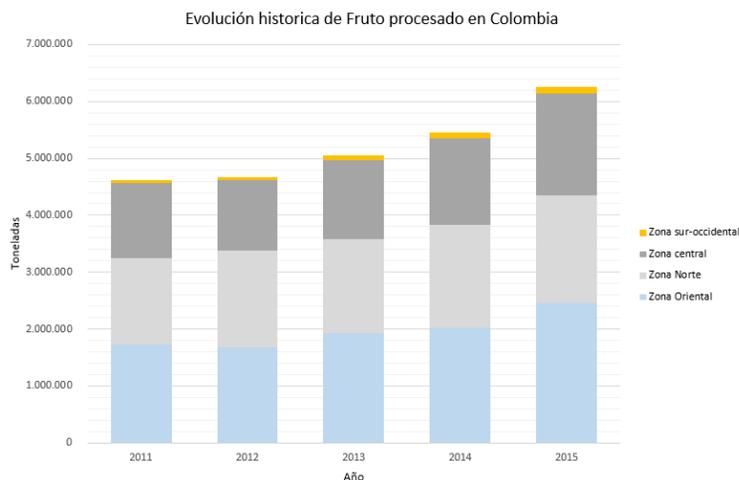


Figura 4-1. Evolución histórica anual de fruto procesado en Colombia. Adaptado de Fedepalma- Sispa, fecha de corte 4 de abril del 2016 [5].

El análisis del impacto socio-económico se realizó basado en análisis cualitativo y cuantitativo generado por la presencia de cultivo de Palma Africana en cada región; asimismo, del impacto social de los cultivos y su aporte en la formación de relaciones entre los diferentes actores; de igual manera, se realiza revisión bibliográfica exhaustiva a la problemática actual presentada en las regiones donde se cultiva Palma de Aceite Africana. Cualitativamente, los cultivos de Palma de Aceite Africana se dividen en tres grupos de interés; el primer grupo hace referencia a cultivos propiedad de empresas cultivadoras y/o extractoras. Estas últimas poseen una extensión de hectáreas cultivadas en etapa de producción para el sostenimiento y rentabilidad de las mismas [61]. El segundo grupo de cultivos hace referencia a cultivos de sistemas organizacionales de trabajadores conocidos como cooperativas en el entorno nacional, e internacionalmente como Pymes; los cuales, venden la fruta o corozo puestos en las plantas extractoras de las diferentes empresas. Es decir, trabajadores asociados con empresas con tareas específicas de bienes y/o servicios regulados en el 2008 por la Ley 1233 y el Decreto 3553 [61]. Por último, el tercer grupo hace referencia a propietarios de tierras con extensiones grandes y medianas que han dedicado una parte de sus terrenos como alternativa de sostenimiento y rentabilidad de su usufructo o núcleo familiar, respectivamente. Esta modalidad se le conoce con el nombre de Alianzas Productivas Estratégicas (APE); denominadas así, por su orquestación como

integrador entre los productores propietarios de tierra y las plantas extractoras [61]. Asimismo, las APE para Fedepalma son “arreglos institucionales con efectos positivos de competitividad de la agroindustria, con equidad redistributiva de los beneficios” que congregan a 5359 pequeños productores de materia prima [5]. La diferencia entre el primer grupo respecto a los otros radica que los últimos dos son solo proveedores de fruta o corozo debido a la carencia de tecnología inicial para la germinación y desarrollo de las primeras etapas de la semilla. Además, debido a que la infraestructura para extracción la poseen las empresas y el refinamiento de los productos como aceites y palmiste en su etapa final se ubica en ciudades como Bogotá y Barranquilla, ocasiona que los grupos de las APE y cooperativas sean proveedores del primer grupo, siendo lo anterior la mayor diferencia que enmarca la dependencia económica y las relaciones laborales [63]. Hacia el año 2007, en documento CONPES dedicado al logro de objetivos del milenio destaca que el sector agrario requería de los cultivos de palma como auxiliador socio-económico debido a su capacidad de ingresos y cambios en las relaciones laborales de los trabajadores, mejorando el bienestar de los habitantes de las regiones. Lo anterior difiere con lo descrito en el trabajo de tesis de La Rotta y la fundación Konrad Adenauer sobre efectos sociales del Cultivo de Palma Africana [62]; donde, se comenta que el estado colombiano ha creado incentivos para que se incrementen los cultivos de palma; pero, debido a la inequidad sobre la propiedad feudal y la falta de recursos por parte del campesinado para que la actividad palmera sea un negocio rentable, los cultivos de Palma han fomentado el estancamiento de la calidad de vida de los trabajadores. Sin embargo, el crecimiento de los cultivos de Palma de Aceite persiste debido a programas estatales, esfuerzos de gremios y campesinos que encuentran en esta actividad dividendos que les permite brindar sostenibilidad a sus empresas y familias [61]. Además, la fundación Konrad Adenauer plantea ventajas y desventajas de este tipo de organizaciones laborales pertenecientes al segundo grupo desde el punto de vista social, las cuales son resumidas en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1. Ventajas y desventajas de las Cooperativas de Trabajo Asociado desde el punto de vista laboral, según fundación Konrad Adenauer [62].

Ventajas	Desventajas
Autonomía y autogestión.	Su constitución es promovida directamente por las empresas, no es voluntaria.
Formación de micro-empresarios.	Tercerización laboral.
Realización de propuestas en negociaciones y condiciones de actividad.	Compensaciones impuestas de acuerdo al mercado.
Aumento de los ingresos por cada trabajador.	Los ingresos dependen de la estacionalidad de los cultivos. Los trabajadores deben asumir su seguridad social.
Manejo de horarios laborales.	Jornadas laborales superiores a las legales.
Trabajo estable.	Rotación entre cooperativas y desertión de los trabajadores por las condiciones laborales y largas jornadas.
Las relaciones armónicas dependen de las compensaciones de los trabajadores.	No renovación de contratos por protestas y demandas al terminar los periodos de estos.
Manejo de sus propios recursos.	Divisiones entre miembros e inculpaciones por manejo de recursos.
Vigilancia y control de Supersolidaria y Minprotección.	Organismos sin capacidad de controlar y constantes cambios de regulaciones.

Además, dentro del impacto social que ha tenido la presencia del tercer grupo en Colombia se encuentra la sustitución de cultivos ilícitos por cultivos de Palma de Aceite Africana en regiones de conflicto como parte del programa Plante. Lo anterior ha ocurrido en regiones como San Pablo en Bolívar y en el Catatumbo, en territorios como Sardinata, Zulia y Puerto Santander, incluso en el Magdalena Medio se implementó el programa de Desarrollo y Paz para sustitución de cultivos ilícitos [61]. Paralelamente a la anterior influencia positiva de sustitución de los cultivos ilícitos por palma de aceite por parte de los campesinos en Colombia, se debe de comentar los pro y contra de esta modalidad de producción. Iniciando por comentar que las APE fomentan el carácter autónomo empresarial del campesino. Sin embargo, depende de las empresas extractoras conocidas como socio

integrador, las cuales fijan el precio del producto, volúmenes y suministro de semillas. Además, para adquirir los recursos para la financiación de los cultivos se crean sociedades solidarias que responderán por compromisos financieros. Pero los riesgos los asumen los cultivadores del tercer grupo. Asimismo, el producto debe ser entregado en las plantas extractoras, por lo que el campesinado debe asumir el transporte y parafiscales de sus trabajadores, fomentando la creación de Unidades Productivas. Adicionalmente, en este tipo de sociedades entre propietarios de tierras y las empresas extractoras, los últimos garantizan la compra del producto de los primeros [61].

Desde el punto de vista ambiental, se destaca el hecho del crecimiento exponencial de los cultivos de Palma de Aceite Africana en Colombia. Lo cual según la Rotta [62] ocasiona dentro de sus consecuencias ambientales disminución de la biodiversidad de la flora y la fauna en cada una de las regiones. Asimismo, puede generar desertificación de los suelos por cambio de composición debido a uso de fertilizantes como lo describe el Instituto Humboldt [61]. Por otra parte, en publicación sobre aspectos ambientales realizada por Comisión Intereclesial de Justicia y Paz, se destaca el hecho de la necesidad de planteamiento de energías sustitutas al petróleo. Comentándose que la posibilidad de reemplazar dicha fuente energética por cultivo de palma de aceite requiere aproximadamente el 40 % de las zonas cultivables del país. Por lo tanto, generaría directa competencia con sembradíos de cultivos de alimentos; y produciría una seria amenaza para la biodiversidad [64, 65]. Lo anterior, plantea una difícil situación binomial entre seguridad energética y alimentaria; consecuentemente se requiere el planteamiento de un punto de equilibrio entre el máximo de cultivos de palma de aceite africana ambientalmente sostenible sin amenazar la biodiversidad, y los sembradíos requeridos para garantizar la cuota alimentaria de la población del país. Asimismo, su integración con otras propuestas energéticas sustitutas [64]. Paralelamente, se destaca el hecho de que los cultivos de Palma Africana utilizan gran cantidad de fungicidas, plaguicidas y herbicidas; lo anterior, ocasionado por la gran presencia de plagas; debido a, no ser un cultivo originario de Colombia; causando, contaminación de fuentes de agua y en ocasiones afectación a otras especies de flora [64]. Adicionalmente, después del periodo de producción de corozo de

Palma Africana (50 años), los suelos no pueden ser usados para otros cultivos diferentes a Palma Africana debido a la desecación, desertificación y uso masivo de productos químicos [64]; siendo lo anterior, un agravante a la problemática de la biodiversidad en las regiones donde tienen presencia estos cultivos. Lo anterior, acrecienta la necesidad de plantear un punto de equilibrio al trinomio de la seguridad energética-alimentaria-biodiversidad. Consecuentemente, según la Comisión de Justicia y Paz y el Instituto Humboldt de no encontrar el equilibrio grandes extensiones de tierra pasarán de ser “desierto verde a zonas desérticas reales” [64]; amenazando, la fauna existente en estas regiones, al ser la biodiversidad de la flora su fuente de manutención [64].

Por otra parte, con relación a las emisiones el Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia ha regulado el límite de emisiones en fuentes estacionarias, como calderas que utilizan biomasa como fuente combustible, en 10 mg/m^3 de carbono orgánico total, así como la prohibición de descarga de sus aguas a fuentes naturales. Asimismo, a las plantas extractoras la UPME establece el cambio de porcentajes de emisión de materia orgánicas por Demanda Biológica de Oxígeno DBO, Demanda Química de Oxígeno DQO y Sólidos Totales Suspendidos TSS, Cloruros y Sulfatos; aclarando, que estos no pueden encasillarse con las actuales regulaciones existentes para sistemas de tratamiento de las plantas extractoras; comprometiendo a lagunas actualmente utilizadas; con el objeto de disminuir el impacto ambiental al ser las demandas más rigurosas que la anterior normatividad. De igual manera, se está trabajando sobre la regulación para convertir las plantas extractoras en refinerías; las cuales deben ser sostenibles ambiental y económicamente; así, como otorgar protección a través de sistemas sociales a sus empleados [66].

4.2 Prospectiva económica para el sector palmero sobre la densificación de la tusa

Conociendo el panorama ambiental y social que contextualizan los cultivos de Palma Africana en Colombia; es prioritario indagar por los beneficios económicos generados por esta actividad. Los productos obtenidos por la extracción de fruta de Palma de Aceite que representan actualmente ingresos para las plantas extractoras se encuentran los aceites

de palma y de palmiste, palmiste y torta de palmiste; cuyos precios en promedio por tonelada de producto, para el primer trimestre del 2016, son \$ 1 500 000 para el aceite de palma, \$ 2 000 000 para el aceite de palmiste, \$ 700 000 para el palmiste y \$ 200 000 para la torta de palmiste [5]. En la Figura 4-2 se presenta el historial de precios para cada producto para los últimos cinco años. Paralelamente, según García en estudio sobre generación y usos de biomasa de Palma de Aceite en Colombia publicado en revista Cenipalma, los porcentajes en volumen de producción son el 20 a 23 % de aceite de palma, 2 al 2,5% de aceite de palmiste y del 2 al 3% de torta de palmiste, dependiendo de la zona de procedencia [67].

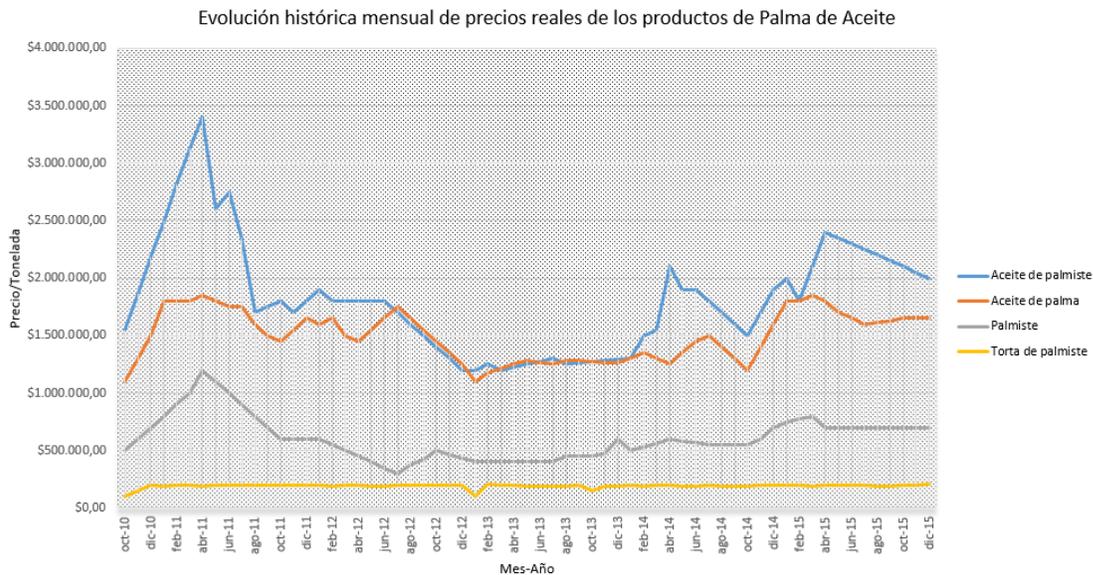


Figura 4-2. Evolución histórica de precios de productos de Palma de Aceite. Adaptado de Fedepalma-Sispa, fecha de corte el 4 de abril del 2016 [5].

En la Figura 4-2 es posible apreciar el comportamiento de los precios de los productos derivados de cultivos de palma de aceite en las plantas extractoras. Estos últimos representan ingresos que se encuentran entre \$1,8 a \$1,2 billones, por concepto de aceite de palma, COP\$3,3 a 1,2 billones por concepto de aceite de palmiste, y 31 mil millones por concepto de torta de palmiste en el 2015 [5]. Lo anterior, refleja una variación de precios

dependiendo de la oferta de estas materias primas en tiempos de alta y baja producción. Adicionalmente, a los productos mencionados los cuales son productos en crudo obtenidos en cada planta; según, Acepalma se obtienen mediante refinación aceite de palmiste blanqueado, aceite de palma alto oléico, aceite de palma refinado RBD, estearina de palma, oleína de palma, ácidos grasos destilados de palma, glicerina cruda, glicerina USP, gliserina técnica y biodiésel de palma [68]. Asimismo, los beneficios económicos para las APE y para las cooperativas en conjunto son de 200.000 pesos por tonelada puesta en cada planta extractora o de beneficio; pero, los costos asociados por cada tonelada de fruto puesta en la planta extractora se encuentra el transporte, personal de cosecha y sistemas de cargue. Paralelamente, cada campesino dedicado a labores de cosecha de Palma Africana obtiene dividendos de 50 000 pesos por tonelada puesta en cada centro de acopio en la parcela de los cultivos; advirtiéndose, que el pago de seguridad social, transporte y herramientas utilizadas en las labores debe realizarla cada trabajador [5, 61].

Lo anterior es el lucro económico dejado por los productos derivados del corozo o ciruelas. Sin embargo, en la actualidad no se utiliza las otras partes del fruto como lo son la tusa y la fibra; sino que se desecha o retorna al cultivo como abono en el caso de la tusa, y la fibra es utilizada en una parte como medio combustible de la caldera. Por lo tanto, se está desechando alrededor del 27 % del fruto; el cual, podría ser densificado agregando un valor a la tusa, para posterior comercialización como briqueta, y así poder ser utilizada doméstica y/o industrialmente para la generación de electricidad y calor.

Individualizando, los beneficios socio-económicos dentro de las aplicaciones de la densificación de biomasa residual proveniente de Palma de Aceite Africana se encuentra su utilización para la producción de energía eléctrica, como alternativa de sustitución a las actuales fuentes de generación de energía eléctrica; por lo tanto, la tusa puede ser usada para generación de energía en aquellos lugares de difícil acceso (ver anexo N). Estos últimos, debido a su ubicación geográfica no cuentan con el sistema de interconexión a la red nacional y su costo de instalación es elevado; estas regiones aisladas representan el 66 % del territorio colombiano [1] y en ellas habitan el 4,2 % de la población colombiana; representando un total de 493 128 usuarios [69]. Sin embargo, en estas regiones la biomasa es abundante, y existe la posibilidad de implementar alguno de los procesos

bioquímicos tales como fermentación alcohólica, digestión anaeróbica y aeróbica; termoquímicos como pirólisis, gasificación, licuefacción y combustión; y, fisicoquímicos como extracción y transesterificación [1, 5]. El uso de procesos termoquímicos como gasificación es viable por su sistema simple para la producción de combustible utilizando biomasa residual proveniente de cultivos de Palma Africana en lugares apartados [1]. Por ejemplo se puede utilizar gasificación; el cual, es un proceso de transformación termoquímica mediante el cual el material orgánico se transforma en gases combustibles; siendo, una alternativa de producción de energía eléctrica descentralizada en zonas no interconectadas donde el costo de generación eléctrica lo justifique. La energía de los gases producto de la gasificación obtenidos mediante combustión está determinada entre otras propiedades por las físico-químicas de la biomasa; lo cual, determina la cantidad de gases generados y la adecuación de las instalaciones para el proceso [1]; consecuentemente es primordial la caracterización de variables como contenido de humedad y cenizas realizada en esta investigación. Asimismo, escudriñando el consumo energético promedio mensual por persona es de 38 kWh [70] y para una familia de cuatro personas es de 152 kWh en el oriente colombiano, en la costa atlántica de 55 kWh por persona y 220 kWh por familia, en el centro del país 59 kWh por persona y 236 kWh por familia y en el sur-occidente colombiano 36 kWh por persona y 128 kWh por núcleo familiar [71]; teniendo en cuenta, que según el DANE cuatro es el promedio de integrantes de familias para Colombia [72]. Además, el Ministerio de Minas y Energía a través de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) [73] calculó en su proyección de demanda energética para Colombia una tasa de crecimiento de 3,7% en consumo de energía para el periodo entre 2011 al 2023; por consiguiente, los cálculos para estimación de flujo de tusa por mes se realizaron teniendo en cuenta los promedios por región para Colombia y la tasa de crecimiento.

La tusa de Palma Africana según publicación realizada por Cenipalma posee un poder calorífico superior de 8,16 MJ/kg [74], para una porcentaje de humedad del 60%; advirtiendo, que la diferencia con el valor medido de manera experimental se basa en la diferencia del contenido de humedad siendo, consecuente con la gráfica de resultados realizada por Aziz [68] en su estudio sobre optimización de biomasa de palma; asimismo, en la gráfica mencionada se destaca un poder calorífico de 17,17 MJ/kg para un contenido

de humedad del 10% b.h.; por otra parte, según García un kilogramo de tusa de Palma Africana produce ~2 kWh de energía eléctrica kg [74]. Sin embargo, al compararlo con el cuesco y fibra de la Palma Africana; cuyos, poderes caloríficos son 21,445 MJ/kg y 19,201 MJ/kg, respectivamente [74]; se observa, una leve desventaja al poseer menor poder calorífico; solventándolo, con el potencial de producción de biomasa; el cual, es cinco y ocho veces superior [74], respectivamente. Además, solo el 0,41% de la tusa producida es usada en las calderas de las plantas extractoras; contra, el 10% de la fibra [74]; brindando, mayor disponibilidad de uso como potencial energético. En la Tabla 4-2, se presenta el poder calorífico de diferentes biomásas, con el objeto de poder relacionar la capacidad de producción energética de cada biomasa y compararla con la tusa.

Tabla 4-2. Poder calorífico en base húmeda de biomásas diferentes a tusa [76, 77, 78, 79].

Biomasa	Poder calorífico J/kg
Corteza de madera	18 000
Maderas blandas	20 000
Madera de Pino	16 644
Madera de Eucalipto	18 640
Carbón vegetal	23 000-32 000
Fibra de fruta	17 570
Corteza de Haba	17 060
Biomasa de semilla de melocotón	19 423
Corteza de Pistacho	19 260
Corteza de Avellana	20 800
Corteza de Macadamia	20 206
Corteza de Algodón	16 376
Tamo de Café	17 686
Paja de arroz	15 614

Del análisis de impacto económico sobre la densificación de tusa de Palma Africana de Aceite se puede concluir que el mayor beneficio económico inmediato se encuentra en la posibilidad de usar las briquetas como fuente de energía calorífica y eléctrica. Para lo cual, se requiere el montaje de instalaciones para densificación en las regiones donde existen cultivos de Palma Africana. La implementación del proceso de densificación puede ser realizado desde tres frentes: el primero por parte de las plantas extractoras, las cuales anexarían a sus instalaciones plantas de densificación; el segundo frente, sería el montaje de plantas con una menor escala de producción por parte de los poseedores de cultivos cuya producción sea superior a 30 toneladas por día; y por último, los campesinos con cultivos de 10 a 20 hectáreas de cultivos pueden crear un tercer frente por medio de asociación a cooperativas existentes o creación de nuevas para la densificación de briquetas con objeto de comercialización. Aclarando, que en la actualidad existen mecanismos que les permitirán a los miembros del segundo y tercer frente la extracción de la parte central del tallo de la tusa conocido como pedúnculo [75]; lo cual, reducirá los costos del transporte al movilizar a la planta extractoras la menor cantidad de tusa y mayor cantidad de corozo o ciruelas. Lo anterior, generaría la necesidad de renegociar los contratos existentes en la actualidad con las plantas extractoras por tonelada de fruta; debido a, que en el presente los contratos establecen la entrega del fruto de palma en su totalidad; asimismo, el montaje de plantas para densificación de la tusa. El costo de la implementación de maquinaria para corte del pedúnculo del ramillaje de la tusa con una capacidad de producción de 400 kg/h es de USD\$ 6000 [75]; los cuales, son adicionales al cálculo de la inversión inicial del cálculo realizado en el Anexo O.

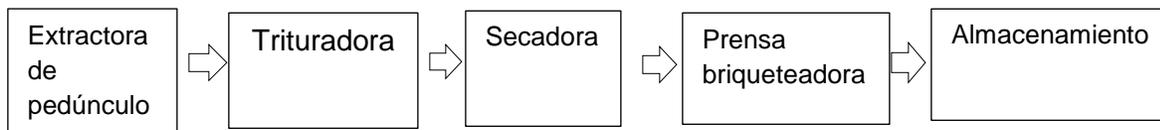


Figura 4-3. Esquema de planta para densificación. Fuente: Autor.

Por otra parte, el costo de realizar un montaje de planta de densificación para un flujo de entrada de fruto de 5 ton/h tiene una inversión inicial de COP\$ 1 227 000 000; alcanzando,

un punto de equilibrio a los 37 meses del inicio de la producción con una tasa interna de retorno del 21% (ver anexo O). Lo anterior permitiría la implementación del proyecto de densificación de tusa en las plantas extractoras, grandes cultivadores; y/o asociación de pequeños cultivadores. De lo anterior, se destaca que el proyecto es viable y genera un valor agregado a los cultivos de Palma Africana, consiguiendo que estos sean más atractivos a la inversión.

5. Conclusiones y trabajo a futuro

Como resultado de la presente investigación se plantean las siguientes conclusiones finales:

Varias de las investigaciones realizadas sobre densificación de biomasa se enfocan en comprender, cómo ciertos parámetros que caracterizan a la biomasa y al proceso de compactación influyen en la calidad final de las briquetas o pellets. Es importante señalar la dependencia de los resultados respecto al tipo de biomasa estudiada; no siendo posible, establecer un comportamiento unificado para la amplia variedad de biomasa disponible en la naturaleza. Sin embargo, un considerable número de autores concluyen que es la humedad de la biomasa, el factor que mayor influencia posee sobre la calidad final de la biomasa densificada; además, una característica final con frecuencia considerada es el poder calorífico que se obtiene de los pellets o briquetas. De la revisión del Estado de Arte se logró establecer que el contenido de humedad debió establecerse por debajo de 15 % b.h.; la presión de compactación alrededor de los 100 MPa; resaltándose, que por encima de 150 MPa su influencia en la calidad de las briquetas es débil. Por último, una temperatura de compactación suficiente para la activación de la lignina; aunque no muy elevada para proteger a la biomasa de la pérdida excesiva de humedad. En la presente investigación se consideraron como factores experimentales independientes el contenido de humedad, a la par con la longitud de la fibra y el tiempo de compactación, respectivamente. Destacando, que estos dos últimos factores no fueron considerados anteriormente por otros autores en el estudio de la densificación de la tusa de palma de aceite, y el análisis estadístico arrojó que son estadísticamente significativos.

En la actualidad se emplea un amplio rango de tecnologías para la obtención de pellets y briquetas; variando, en el principio mecánico de compactación utilizado. Sin embargo, el tipo de prensa más notoria es la prensa de tornillo sinfín; siendo, este último equipo el seleccionado para la realización del análisis técnico-económico.

De gran importancia resulta el estudio de los estándares para pellets y briquetas. Europa, Norteamérica y Asia cuentan con la normativa más completa y específica según las distintas clases de biomasa. Se resalta en todas, reglamentaciones de los diámetros y la relación de la longitud con el diámetro, el control del contenido de humedad, valores mínimos de densidad, composición química donde se establecen valores límites para sustancias peligrosas para la salud humana; y el control de las emisiones, principalmente para los óxidos de nitrógeno.

Se planteó un diseño factorial completo a tres niveles con tres factores experimentales: contenido de humedad, longitud de fibra y tiempo de compactación; con el propósito de estudiar el comportamiento de un conjunto de respuestas de tipo mecánicas y térmicas. Para el control del proceso de obtención y la propia fabricación de las briquetas se requirió el desarrollo de una briqueteadora experimental; siendo, el mecanismo de compactación idóneo para los fines de la investigación el accionamiento hidráulico del pistón. En este sentido se formuló un diseño paramétrico centrado en el cumplimiento de un conjunto de Especificaciones de Ingeniería (Ej.: relación de compresión, presión de compresión, temperatura, diámetro de la briqueta, repetitividad y control de parámetros, productividad, consideraciones de seguridad, etc.). De igual manera, en el diseño de la briqueteadora experimental resultó útil; en primer lugar, la compresión del problema experimental, sus factores independientes y respuestas a medir; y en segundo lugar, la herramienta de diseño basado en costos, lográndose un equilibrio entre el control de las variables del proceso y los costos de la instalación.

Como resultados estadísticos experimentales se obtienen una serie de modelos empíricos que explican de manera parcial la influencia del contenido de humedad, la longitud de la fibra y el tiempo de compactación en los distintos parámetros que caracterizan la calidad y aceptabilidad de las briquetas de tusa de Palma Africana de Aceite. Se señala en primer lugar la gran influencia sobre la densidad de la briqueta que posee el contenido de

humedad, y como esta propiedad se deteriora significativamente para niveles de contenidos de humedad altos; además, es preferible para obtener una densidad alta emplear longitud de fibra corta. En segundo lugar, se resalta que el factor experimental que mayor influencia tiene sobre el Índice de Durabilidad es el contenido de humedad seguido de la longitud de la fibra; contenidos de humedad bajos (<10 % b.h.) con fibras de más de 10 cm de longitud es lo recomendable para obtener ID>99 %. En tercer lugar, la resistencia a compresión de las briquetas resultó afectada por el contenido de humedad, la longitud de fibra y la interacción entre el tiempo de compactación y la longitud de fibra. Los mejores resultados de resistencia a la compresión son obtenidos para bajo contenido de humedad, longitud de fibra de 5 cm y tiempo de compactación de alrededor de 2,5 segundos.

El análisis de imágenes obtenidas por microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido permitió comprender un poco mejor los mecanismos de unión entre las fibras de la biomasa. En primer lugar, se evidencia un mecanismo de unión puramente mecánico, mediante entrecruzamiento y bloqueo entre las fibras. El cual es ayudado por “puntos de soldadura” creados en fibras adyacentes donde la lignina activada actúa como aglutinante y otros mecanismos secundarios de cohesión como los puentes H. Se observa como un alto contenido de humedad genera cierto distanciamiento relativo entre las fibras, una menor activación de la lignina; por consiguiente, menor cohesión entre las fibras. Asimismo, se aprecia como a mayor tiempo de compactación se obtienen zonas con activación de lignina más amplias y un mejor empaquetamiento de las fibras al interior de a briketa.

Con respecto al poder calorífico obtenido no se observan diferencias significativas entre los tres cultivos estudiados; tampoco, se encuentra una variación de esta propiedad térmica debido a los tratamientos empleados para la compactación de la biomasa. El poder calorífico obtenido para la tusa de palma africana de aceite se encuentra en el rango entre 17,8 MJ/kg y 18,6 MJ/kg. Por otra parte, respecto a las emisiones es de esperar ausencia o mínima presencia de óxidos de azufre dado que el contenido de azufre en la biomasa es inferior al 1%; por otro lado, deberá contarse con un sistema de combustión eficaz para las

briquetas de tusa, con relación a la temperatura de combustión y entrada de oxígeno; con el fin, de ejercer un control adecuado sobre las emisiones de óxidos de nitrógeno.

De la presente investigación experimental se puede concluir que la mejor briqueta de tusa de palma africana de aceite es obtenida con un contenido de humedad de 8 % b.h., 85 mm de longitud de fibra y un tiempo de compactación de 20 segundos. Con los niveles anteriores de los factores experimentales, incluyendo la presión y temperatura establecidas para el proceso de compactación; se obtiene, un peso balanceado entre las características de calidad mecánica (densidad, ID y resistencia a la compresión) logrando un buen desempeño mecánico y sin afectar el poder calorífico del material densificado.

En la presente investigación se realiza un esfuerzo por comprender el impacto socio-económico que podría tener la introducción de una planta de fabricación de briquetas en las regiones de producción de palma africana de aceite. Estas regiones se caracterizan por ser altamente dependientes de este cultivo; socialmente, es común encontrar situación de pobreza, ausencia de contratación directa y una baja remuneración en los empleos generados por este sector palmero. Lo anterior se acentúa debido al bajo nivel educacional y el bajo acceso a la educación, combinado con una situación compleja de orden público, que afortunadamente en los últimos años ha tenido tendencia a mejorar. Actualmente, la tusa de Palma Africana de Aceite se emplea fundamentalmente como abono orgánico, al regresarse a las plantaciones en su estado de salida de la planta extractora de aceite, por ende, se visualiza una oportunidad económica al agregarle valor a esta biomasa residual mediante un proceso de compactación. Eso último podría lograrse mediante alguno de los tres escenarios posibles: montaje de una planta anexa de fabricación de briquetas por parte de la planta extractora o de manera similar pero cerca a los cultivos; mediante, la conformación de una cooperativa por parte de los dueños de las plantaciones menores; y el montaje de plantas de densificado a menor escala por parte de grandes cultivadores no poseedores de plantas extractoras. Cualquiera de los tres escenarios traería como ventaja fundamental el incremento del valor de la biomasa residual, el reemplazo de combustible fósil por energía renovable local y la consecuente disminución del impacto ambiental (huella de carbono). Asimismo, se resalta como ventaja adicional para la segunda variante la posibilidad de un nuevo tipo de emprendimiento, por creación de cooperativas entre los

cultivadores que negociarían la tusa de vuelta con la planta extractora o incluso la creación de un modelo basado en el desespigado de la tusa en campo, para quedarse con el pedúnculo central del racimo. No obstante, este modelo de conversión de tusa a briquetas no sería un generador significativo de empleos para las regiones.

Del análisis técnico económico se concluye que sería rentable la instalación de plantas de fabricación de briquetas, en cualquiera de sus dos variantes, con capacidad de producción de 5 t/h; la cual, deberá contar con una inversión inicial de COP \$1 227 000 000, y se obtendrá una tasa de retorno de la inversión del 21 %.

La presente investigación plantea la necesidad a futuro de realizar estudio que permita establecer el elemento de la fibra que permite la “unión soldada” entre las mismas; por medio, de ensayos como resonancia u otros. Asimismo, establecer el comportamiento a nivel micro-estructural de la fibra ocurrido durante el proceso de aumento de temperatura necesario para la adhesión entre fibras. Lo anterior, con el objeto de comprender el comportamiento interno de las fibras en busca de mejorar las variables independientes del proceso de densificación. Por otra parte, se recomienda realizar estudios con diferentes principios de prensado al utilizado en esta investigación; no obstante, la bibliografía indica que los resultados de densificación más eficientes se obtienen mediante la utilización del principio de prensado por extrusión; pero, realizar estudios de densificación utilizando otros principios permitirá establecer diferencias para la tusa en cuanto a densidad, durabilidad y resistencia a la compresión; facultando la realización de balance costo-beneficio. Lo anterior, debido a que el comportamiento frente al proceso de densificación depende de la naturaleza de la biomasa como ya se mencionó.

Paralelamente, se pueden realizar estudios de densificación de otras biomásas utilizando la prensa de densificación utilizada en esta investigación; con el objeto, de parametrizar a futuro una prensa que permita la densificación de diferentes biomásas para uso en zonas rurales; y así, brindarles a diferentes sectores sociales del país la posibilidad de generar ingresos por medio de la comercialización de briquetas.

Asimismo, se puede plantear estudio de caracterización del proceso de densificación utilizando la mezcla de tusa con diferentes biomásas u agregar porcentajes de materia

como carbón; con el objeto, de incrementar el poder calorífico de las briquetas con el objeto de poder ser utilizado como combustible competitivo con fuentes actuales de alto poder calorífico. El anterior estudio debe realizarse buscando parametrizar el porcentaje de composición para dos o más biomasa u otras materias primas adicionales a la tusa; así como, su incremento en propiedades como densificación, durabilidad y resistencia a la compresión con el objeto de establecer el costo-beneficio del proceso adicional de mezcla de biomasa y plantear proceso secado integral o independiente de las mismas.

A. Anexo: Planta de beneficio y extractoras de Colombia

Tabla A-1. Listado de plantas extractoras de Colombia según censo de FEDEPALMA [5].

Plantas de beneficio y extractoras de Colombia						
Ubicación			Plantas de beneficio		Plantas extractoras	
Zona	Departamento	Municipio	Número de Plantas	Capacidad de producción	Número de Plantas	Capacidad de producción
				[ton/h]		[ton/h]
Norte	Cesar	Becerril	1	14	1	3
		Bosconia	1	10	1	1
		El Copey	1	6	1	2
		La Paz	1	15	1	1
	Magdalena	Aracataca	1	23	1	3
		Ciénega	6	89	5	35
		El Retén	2	12	1	3
Centro	Cesar	Río de Oro	1	32	1	1
		San Alberto	1	9	1	15
		San Martín	1	55	1	8
	Norte de Santander	El Zulia	1	9	1	9
	Santander	Puerto Wilches	4	57	3	20
Sur Occidental	Caquetá	Belén de los Andaquíes	1	10	1	20
	Cauca	Guapi	1	24	5	24
	Nariño	Tumaco	6	65	5	28
Oriental	Casanare	Aguazul	1	24	1	5
		Villanueva	2	24	1	1
	Cundinamarca	Paratabueno	1	17	1	1
	Meta	Acacias	5	55	4	1
		Barranca de Upía	2	20	1	1

	Cuburayo	1	12	1	1
	Cumural	2	21	1	25
	Puerto Gaitán	1	5	-----	-----
	San Carlos de Guaroa	5	75	4	3
	San Martín	1	3	-----	-----

B. Anexo: Sub-problemas de diseño

Tabla B-1. Sub-problemas diseño.

Ítem	Sub-grupo: Diseño Sub-problemas	Parámetros		
		Mejora	P	Empeora
1	Estructura resistente a carga estática y fluctuante.	Resistencia, confiabilidad	8	Peso, longitud
2	Sistema de Extracción de briqueta que sea práctico.	Forma, productividad, tiempos.	7	Confiabilidad, precisión en la medida.
3	Sistema de compresión debe proveer una presión variable y máx. de 100 MPa	Presión, fuerza	10	Resistencia, velocidad, Complejidad de control
4	El sistema térmico debe proveer una temperatura máx. 120 °C y en lo posible variable.	Temperatura,	10	Complejidad de control.
5	El sistema de compactación debe poseer la resistencia necesaria para soportar las fuerzas generadas en la compactación.	Resistencia, forma	8	Manufacturabilidad
6	El sistema de compactación deberá ser resistente al desgaste especialmente por abrasión.	Resistencia, confiabilidad, perdida de material, durabilidad	7	Manufacturabilidad.

C. Anexo: Sub-problemas de proceso

Tabla C-1. Sub-problemas de proceso.

Ítem	Sub-grupo: Procesos Sub-problemas	Parámetros		
		Mejora	P	Empeora
1	La alimentación de materia prima (mezcla Tusa aglomerante) debe poder realizarse de forma sencilla.	Productividad, Tiempo, facilidad de operación	8	Complejidad de dispositivo, pérdida de materia prima, velocidad.
2	Debe garantizar obtener briquetas de acuerdo a lo establecido en la norma ISO.	Forma, confiabilidad.	9	Adaptabilidad
3	El proceso de compactación debe realizarse de tal forma que se minimicen vibraciones que puedan generar errores en medidas.	Estabilidad del objeto, confiabilidad, precisión de medidas	9	Peso del objeto estacionario
4	Garantizar qué características de humedad, tamaño de grano, composición de mezcla y otras.	Adaptabilidad, productividad	8	Complejidad de control
5	El proceso de compactación debe poder realizarse de forma segura, uniforme, evitando choques entre piezas, eliminando imprecisiones que afecten la obtención de resultados óptimos.	Estabilidad del dispositivo, confiabilidad.	9	Complejidad de dispositivo, complejidad control.
6	El proceso de calentamiento debe poder realizarse de forma uniforme, de tal manera que se asegure que la briqueta obtenida tenga una constitución homogénea.	Temperatura, confiabilidad, precisión de medidas	8	Manufacturabilidad, complejidad en control.
7	Garantizar que las medidas de variables, se puedan obtener de forma sencilla y rápida.	Precisión medidas, confiabilidad.	9	Complejidad de dispositivos y control.
8	Controlar temperatura y presión que garantice la obtención de las características deseadas de la briqueta.	Temperatura, presión, confiabilidad,	9	Manufacturabilidad, complejidad en control.

D. Anexo: Sub-problemas de manufactura

Tabla D-1. Sub-problemas de manufactura.

Ítem	Sub-grupo: Manufactura Sub-problemas	Parámetros		
		Mejora	P	Empeora
1	La máquina debe poseer dimensiones y forma que permita su fácil instalación en el laboratorio de Diseño.	Forma, adaptabilidad	9	Área de objeto estacionario
2	Facilidad de fabricación por procesos convencionales.	Forma, Manufacturabilidad	10	Precisión en la medida,

E. Anexo: Matriz TRIZ.

Tabla E-1. Matriz TRIZ.

TRIZ Mejora vs Empeora		Resistencia	Confiabilidad	Adaptabilidad	Pérdida del material	Precisión	Velocidad	Manufacturabilidad	Área	Peso	Complejidad del dispositivo	Complejidad del control	Longitud
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Resistencia	1									26,27, 40,1	15,14, 28,26	11,3,1 0,32	
Confiabilidad	2			13,35 ,8,24						15,14, 28,26	13,35, 1	27,40, 28	15,29, 28,11
Adaptabilidad	3								1 5, 2				
Pérdida del material	4							15,34 ,33					
Precisión	5							6,35, 25,18			27,35, 10,34	26,24, 32,28	
Velocidad	6							35,13 ,8,1			10,28, 4,34		
Manufacturabilidad	7		2,36, 37			1,32,1 7,28							

Área	8											
Forma	9	10,4 0,16	1,15, 29		28,32, 1		1,32, 17,28					
Durabilidad	10						27,1, 4					
Tiempo	11	10,3 0,4		35,18, 10,39	24,34, 28,32					6,29		
Temperatura	12						1,35, 16				3,27,3 5,31	
Productividad	13	1,35, 10,3 8		28,10, 35,23	1,10,3 4,28		35,28 ,2,34			12,17, 28,24		
Presión	14	9, 18 ,3, 40				6,35,3 6	1,35, 16				2,36,3 7	
Fuerza	15					13,28, 15,12					36,37, 10,19	
Facilidad de operación	16			28,32, 2,34		18,13, 34	2,5,1 2			32,26, 12,17		
Estabilidad	17								21,35, 2,39			

Convenciones:  No existe relación.

 No hay solución en TRIZ4

F.Anexo: Tabla Solución de los sub-problemas

Tabla F-1. Solución de sub-problemas.

Traducción del problema	Principio de solución	Solución
Resistencia vs peso	26, 27, 40, 1	Segmentación.
Resistencia vs longitud	15, 14, 28, 26	Incremento de la curvatura.
Resistencia vs Manufacturabilidad	11, 3, 10, 32	Acción preliminar
Confiabilidad vs adaptabilidad	13, 35, 8, 24	Transformación del estado físico y químico de un objeto
Confiabilidad vs peso	15, 14, 28, 26	Incremento de la curvatura.
Confiabilidad vs longitud	15, 29, 28, 11	Precaución previa.
Confiabilidad vs complejidad del dispositivo	13, 35, 1	Segmentación.
Confiabilidad vs complejidad del control	27, 40, 28	Objetos baratos o de corta vida
Forma vs confiabilidad	10, 40, 16	Acción preliminar
Forma vs adaptabilidad	1, 15, 29	Partes dinámicas.
Forma vs precisión de medida	28, 32, 1	Segmentación.
Forma vs manufacturabilidad	1, 32, 17, 28	Segmentación.

Tiempo vs confiabilidad		
Tiempo vs pérdida de material	35, 18, 10, 39	Acción preliminar.
Tiempo vs precisión de medida		
Tiempo vs complejidad del dispositivo	6, 29	Multifuncionalidad o universalidad
Temperatura vs manufacturabilidad	1, 35, 16	Segmentación.
Temperatura vs complejidad del control	3, 27, 35, 31	Calidad local.
Presión vs resistencia	9, 18, 3, 40	Neutralización preliminar
Presión vs velocidad	6, 35, 36	Transformación del estado físico y químico de un objeto
Presión vs manufacturabilidad	1, 35, 16	Segmentación.
Presión vs complejidad del control	2, 36, 37	Separación
Fuerza vs velocidad	13, 28, 15, 12	Inversión.
Fuerza vs complejidad del control	36, 37, 10, 19	Expansión térmica
Estabilidad vs peso	21, 35, 2, 39	Pasar rápidamente
Adaptabilidad vs área	15, 16	Las soluciones no se contemplan factibles
Durabilidad vs manufacturabilidad	27, 1, 4	Objetos baratos o de corta vida

Perdida de material vs manufacturabilidad	15, 34, 33	Homogenización
Precisión de medidas vs manufacturabilidad	6, 35, 25, 18	Transformación del estado físico y químico de un objeto
Precisión de medidas vs complejidad del dispositivo	27, 35, 10, 34	Objetos baratos o de corta vida
Precisión de medidas vs complejidad del control	26, 24, 32, 28	Mediador
Productividad vs confiabilidad	1, 35, 10, 38	Transformación del estado físico y químico de un objeto
Productividad vs perdida de material	28, 10, 35, 23	Retroalimentación
Productividad vs precisión de medidas	1, 10, 34, 28	Acción preliminar.
Productividad vs manufacturabilidad	35, 28, 2, 34	Separación
Productividad vs complejidad del dispositivo	12, 17, 28, 24	Mediador
Velocidad vs manufacturabilidad	35, 13, 8, 1	Transformación del estado físico y químico de un objeto
Velocidad vs complejidad del dispositivo	10, 28, 4, 34	Acción preliminar.
Manufacturabilidad vs confiabilidad	2, 36, 37	Expansión térmica.
Manufacturabilidad vs precisión de la medida	1, 32, 17, 28	Segmentación

Facilidad de operación vs pérdida de material	28, 32, 2, 34	Separación.
Facilidad de operación vs velocidad	18, 13, 34	Las soluciones no se contemplan factibles
Facilidad de operación vs manufacturabilidad	2, 5, 12	Combinar
Facilidad de operación vs complejidad del dispositivo	32, 26, 12, 17	Redimensionar

G. Anexo: Modelo de Caja Gris

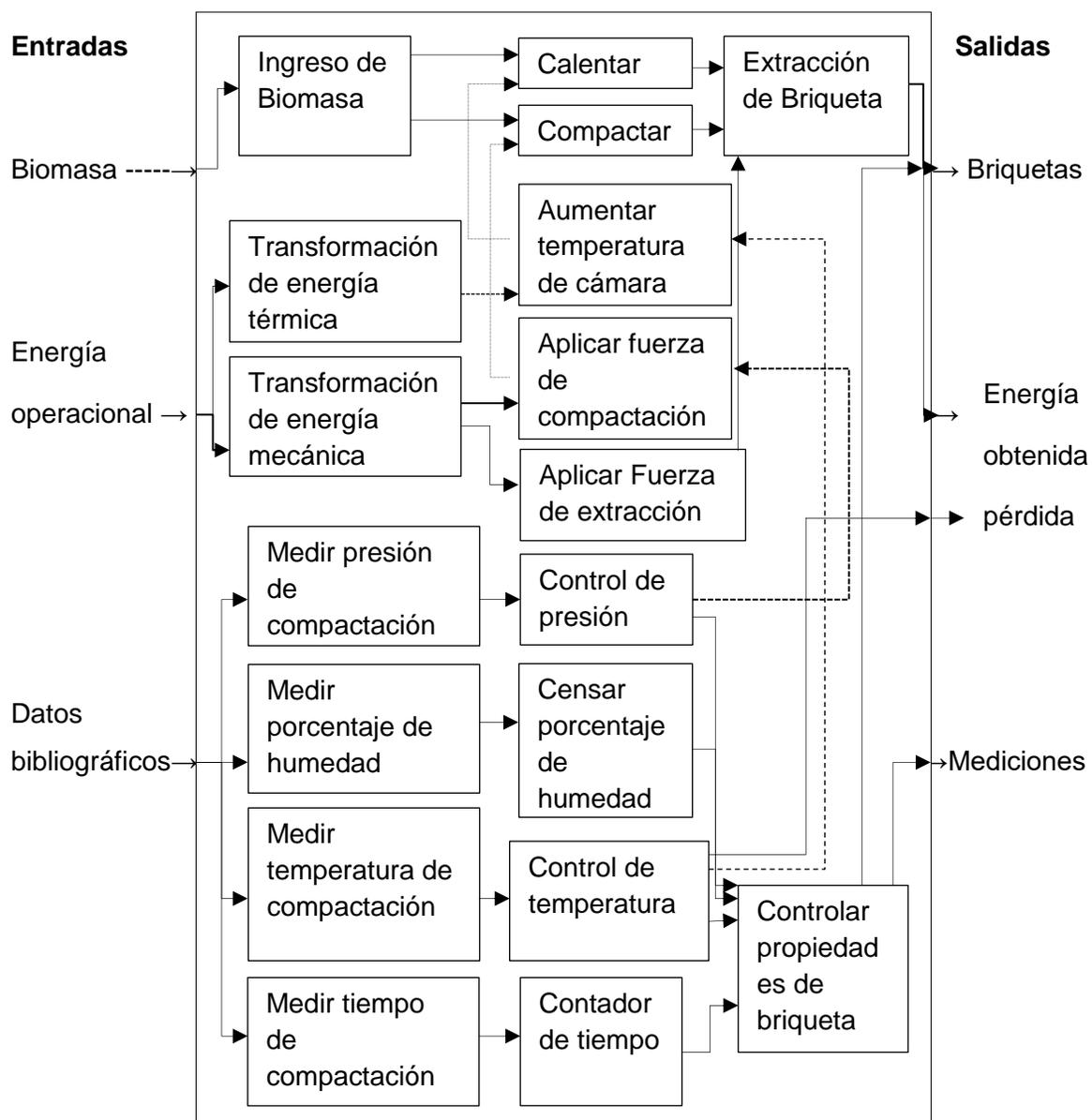


Figura G-1. Modelo de Caja Gris para diseño conceptual de Prensa Briqueteadora

H. Anexo: Diagrama de funciones

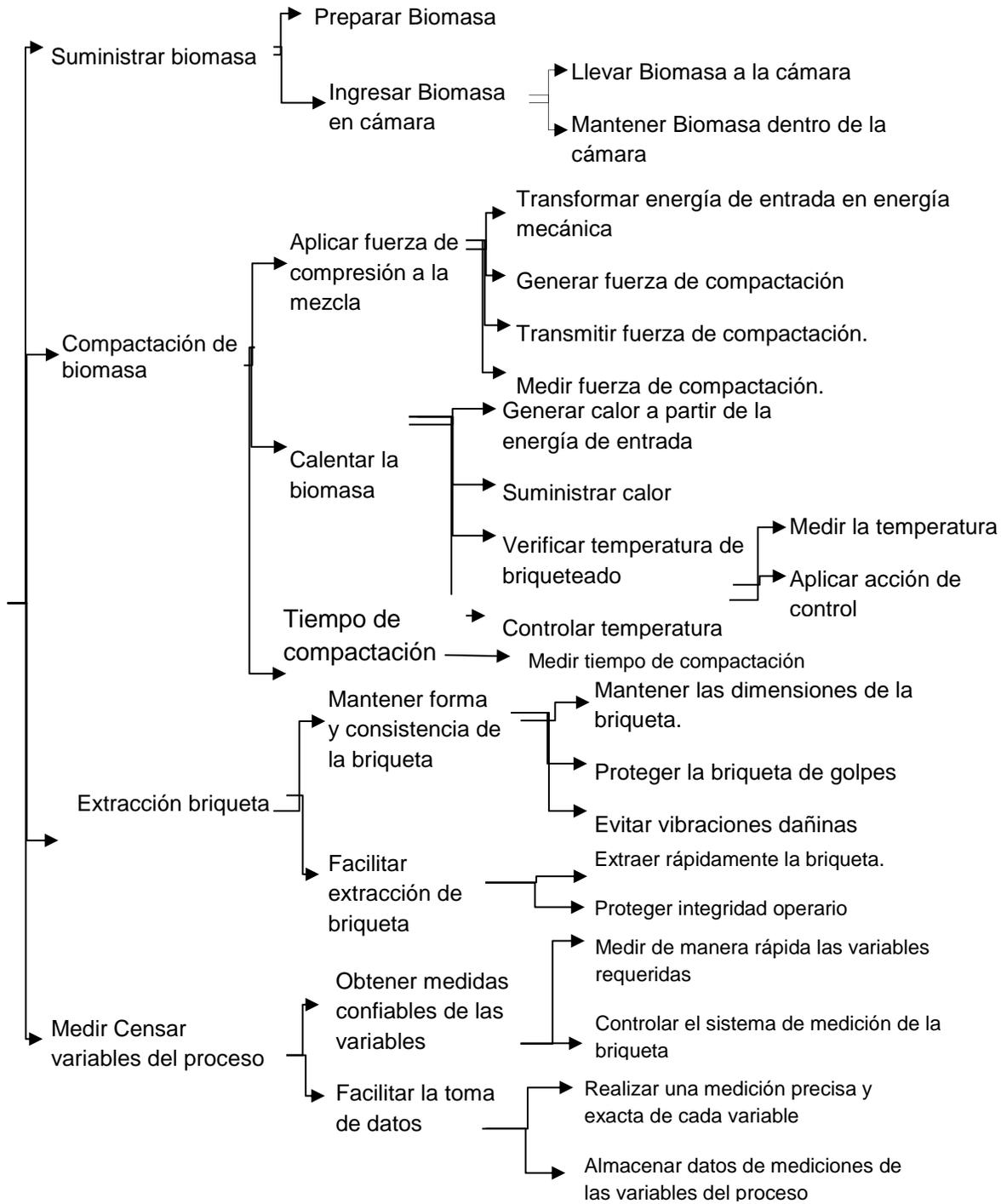


Figura H-1. Diagrama de funciones del proceso

I. Anexo: Solución a funciones

Tabla I-1. Tabla de soluciones a funciones.

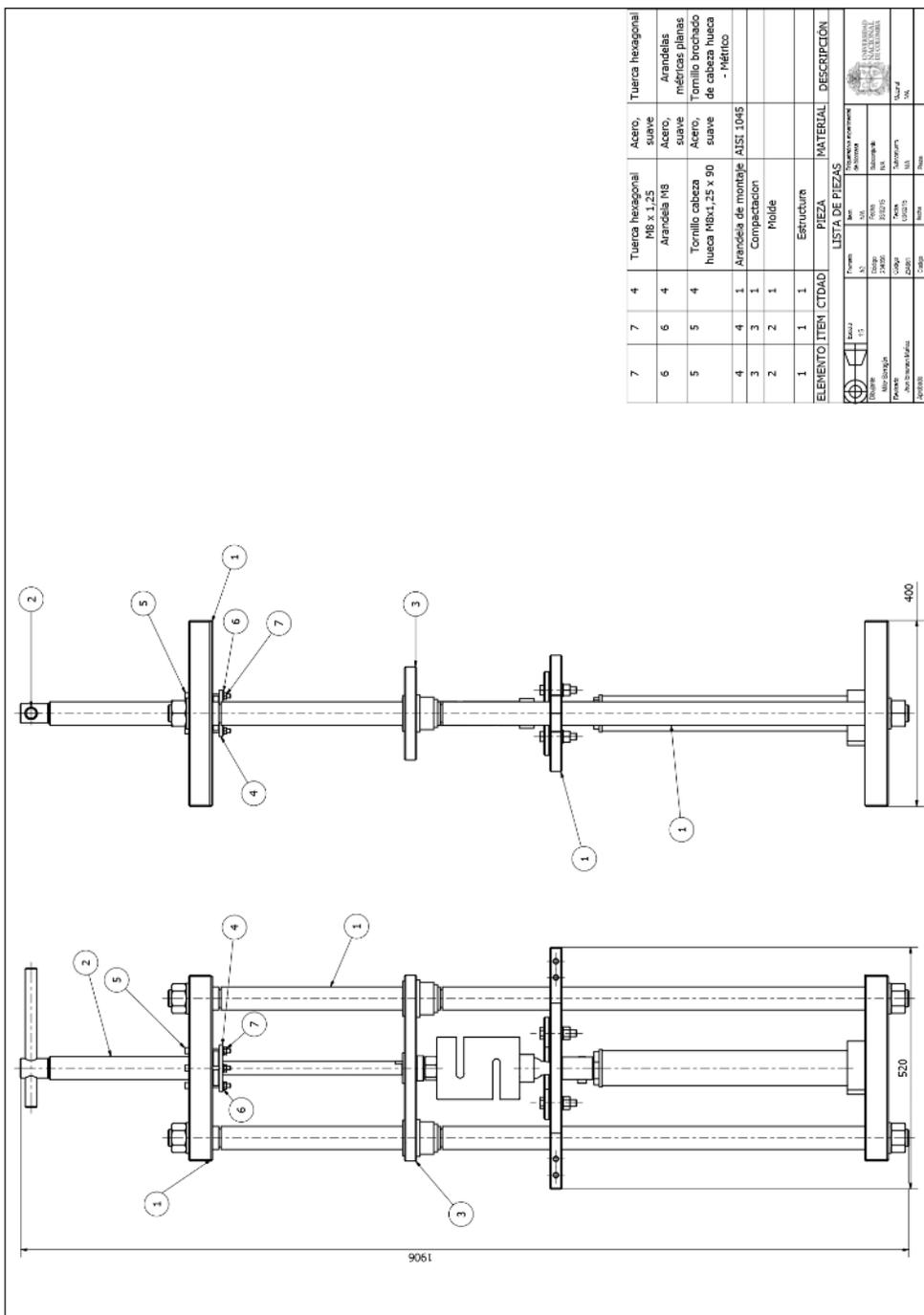
Sub-función	Soluciones	Descripción
Suministrar biomasa	Tornillo sinfín	Transporte de material por medio del movimiento del tornillo.
	Por vibración	Por medio de movimiento oscilante hacer llegar la mezcla a la cámara.
	Por banda transportadora	La biomasa transporta hacia la cámara por medio de banda.
	Por pistón	La biomasa entra por medio del empuje de un pistón.
	Manual Tolva	El operario ingresa la biomasa hacia la cámara a través de un conducto.
	Manual directo en la cámara.	El operario ingresa la mezcla directamente en la cámara haciendo uso de una pala.
Transformar energía de entrada en energía mecánica	Motor eléctrico	El motor mueve los mecanismos para compactar la mezcla, por ejemplo, un tornillo sin fin
	Solenoides Electromagnético	Embobinado que al pasar una corriente por el crea un campo magnético que permite el movimiento de un pistón.
	Motor de combustión	Realiza la misma función que en el motor eléctrico, solo que ahora transforma energía química en mecánica.
	Bomba hidráulica	La bomba recibe la fuerza de un motor, permite mover un fluido el cual acciona un pistón que realiza la compactación.
	Bombeo manual	Igual que en el caso anterior solo que ahora el bombeo se hace de forma manual.
	Caída libre	Deja caer una masa, la energía potencial se transforma en energía cinética de compactación.
	Accionamiento manual (palanca)	Por medio de algún mecanismo de palanca que actúa directamente sobre la mezcla para compactarla.

	Accionamiento manual (manivela)	Por medio de una manivela se permite el movimiento de un tornillo sin o de un mecanismo corredera que funciona como pistón.
Transformar energía de entrada en energía térmica	Por fricción	Por accionamiento de frotación entre dos cuerpos.
	Resistencia eléctrica	Flujo eléctrico moviéndose a través de un material genera resistencia y genera calor.
	Flujo de aire caliente	Movimiento de aire caliente a través de un cuerpo (cámara de compactación)
	Flujo de aceite térmico	Movimiento fluido caliente a través de un serpentín
	Flujo de agua caliente	Igual que en el caso anterior, pero con agua
Comprimir Biomasa	Por impacto	Masa dejada caer desde cierta altura.
	Mecanismo manivela corredera	Un pistón compactador (corredera) accionado por el movimiento de una manivela conectada a un motor.
	Tornillo sin fin	El movimiento del tornillo va generando la compactación, este puede ser accionado manualmente o por motor.
	Gato hidráulico tipo botella	Accionamiento manual, el accionamiento del gato permite la compactación de la mezcla.
	Pistón hidráulico	Movimiento del pistón generado por bomba.
	Pistón neumático	Movimiento del pistón generado por compresor.
	Cilindro prensador	Dos cilindros que giran en sentido contrario y en movimiento sincrónico. En medio de estos existen cavidades en donde se dispone la mezcla y se compacta con el giro.
Medir y censar fuerza de presión	Dinamómetro	Colocado en el sistema de tal forma que permita medir la fuerza del mecanismo de compactación.
	Manómetro	Especial para sistema hidráulico, colocado en dispositivo de compactación.
	Galga extensiométrica	Colocado en cámara de compactación. La deformación de la celda se traduce en presión.
Medir y censar desplazamiento	Reglilla externa	Regla con la que se puede medir que tanto se mueve el dispositivo de compactación.
	Marcación en el embolo	Directamente en el embolo sobre el embolo se realizan marcas, que indique cuanto se movió.

de compactación	Sensor de desplazamiento lineal (Inductivo o resistivo)	Con base en el principio de resistencia o bobina variable, la señal de voltaje o corriente se traduce longitud.
Controlar presión	Resorte de compresión - tensión	Resorte calibrado para controlar la fuerza.
	Presostato	Para sistema hidráulico, en el caso de que la presión se desvíe del set point se interrumpe el paso de fluido al pistón.
Calentar Biomasa*	Pre calentamiento de biomasa	La biomasa se calienta antes de comprimirse.
	Camisa de calentamiento por resistencia eléctrica	La resistencia genera calor dentro del lugar de compactación.
	Quemador	Combustión generación de llama colocado cerca del lugar de compactación.
	Intercambiador de calor	Movimiento de un fluido entre una tubería que se encuentra en contacto con la cámara.
	Horno	Cámara calentada dentro de horno por medio de convección forzada
Medir y censar temperatura	Termómetro de caratula	Funcionamiento mecánico
	Termómetro digital	Funcionamiento eléctrico
	Termocupla	Cambio de propiedades térmicas de un metal.
	Pirómetro	Por infrarrojo detecta la temperatura en lugar dado.
	Cámara termográfica	
Controlar temperatura	Termostato mecánico bimetal	Dilatación térmica de metal que funciona como interruptor.
	Termostato electrónico	Mayor precisión y exactitud que el anterior.
	Electrónico PD-PID	Permite ajustar un valor deseado de temperatura y obtener una respuesta en el sistema cercana a dicho valor.
	ON-OFF	Activación manual de un interruptor, para activar el dispositivo de calentamiento.
Extraer briqueta	Compuerta inferior con bisagra	Compuerta que permite abrir la camisa en la parte inferior una vez generada la compactación.
	Compuerta inferior con tuerca de fijación	Mismo mecanismo anterior con otro dispositivo de cierre.
	Mesa móvil	Principio taladro de árbol.
	Camisa desarmable	Camisa que consta de dos partes unidas por pasador o tornillo.

	Pistón extractor	Contra pistón hidráulico que al momento de tener compactado se activa y extrae la briqueta.
	Golpeteo manualmente	Golpe sobre lugar de compactación para extraer la briqueta
	Pinzas manualmente	Manual haciendo uso de pinzas teniendo cuidado en generar daño.

J. Anexo: Plano general prensa briqueteadora



ELEMENTO	ITEM	CTDAD	PIEZA	MATERIAL	DESCRIPCIÓN
7	7	4	Tuerca hexagonal M8 x 1,25	Acero, suave	Tuerca hexagonal
6	6	4	Arandela M8	Acero, suave	Arandela
5	5	4	Tornillo cabeza hueca M8x1,25 x 90	Acero, suave	Arandela métricas planas Tornillo bricolado de cabeza hueca - Métrico
4	4	1	Arandela de montaje	Acero, suave	
3	3	1	Compensación	AISI 1045	
2	2	1	Píldre		
1	1	1	Estructura		

LISTA DE PIEZAS	
Item	Descripción
1	Arandela
2	Compensación
3	Píldre
4	Arandela de montaje
5	Tornillo cabeza hueca M8x1,25 x 90
6	Arandela M8
7	Tuerca hexagonal M8 x 1,25

K. Anexo: Costos de prensa briqueteadora

1. Costos de diseño

Para realizar el diseño de la prensa briqueteadora se requirió de 8 horas semanales durante 4 meses de 4 estudiantes de noveno semestre del Programa de Ingeniería Mecánica. Por lo tanto, el cálculo se realiza basado en 512 horas/hombre de mano de obra calificada a un costo por hora de COP\$ 6 770; a lo anterior, se debe agregar el costo de prestaciones sociales; correspondiendo, en Colombia a multiplicar por 1,52; siendo, el valor neto de COP\$ 10 156. Adicionalmente, para el diseño se requirió de 16 horas semanales durante 6 meses de un Ingeniero Mecánico; para, la revisión de planos con una experiencia de dos años en el ejercicio de la profesión cuya hora base es COP\$ 18 229; siendo, el valor neto incluyendo prestaciones sociales de COP\$ 27 708; asimismo, de un Ingeniero Mecánico con Doctorado en Ingeniería para la aprobación de planos y dirección con una dedicación de 4 horas durante 4 meses; cuya, base para cálculo es COP\$ 52 083; siendo el valor neto COP\$ 79 166. Además, los equipos de cómputo, oficina y papelería tienen un costo total de COP\$ 9 000 000. Por lo tanto, realizando la suma se obtiene que el costo del diseño de la prensa briqueteadora:

$$\begin{aligned} \text{Mano de obra calificada} &= (10\,156 \times 512) + (27\,708 \times 384) + (79\,166 \times 128) \\ &= \text{COP\$ } 25\,973\,376 \end{aligned}$$

$$\text{Costo del diseño} = 25\,973\,376 + 9\,000\,000 = \text{COP\$ } 34\,973\,376$$

2. Costo de materiales e insumos

2.1 Materiales

A continuación, se presentan los costos por conjunto de acuerdo a plano general del Anexo J. Los precios de los materiales para fabricación se presentan según precio de referencia para el segundo semestre del 2014, fecha en la cual se adquirieron; con un precio del dólar en COP\$ 2900 para transacciones.

Estructura: COP \$ 8 355 000

Gato hidráulico: COP\$ 600 000

Molde: COP\$ 400 000

Compactación: COP\$ 200 000

Arandelas de montaje y pernos: COP\$ 55 000

Horno refractario: COP\$ 50 000

Instrumentación (celda de carga, medición y control de temperatura, resistencias):
COP\$ 2 200 000.

$$\begin{aligned} \text{Materiales} &= \text{Estructura} + \text{Gato hidraulico} + \text{Molde} + \text{Arandela y pernos} \\ &+ \text{Horno} + \text{Instrumentación} = \text{COP\$ 11 860 000} \end{aligned}$$

2.2 Insumos

La sumatoria de costos de materiales consumibles tales como: Recubrimiento tri-capa aplicado (primer, barrera y Acabado); soldadura, granalla para limpieza, kit de Líquidos penetrantes y acoplante para realización de ultrasonido fue de COP\$ 1 050 000

$$\text{Costo de materiales e Insumos: COP\$ 12.910.00}$$

3. Mecanizados

Por otra parte, se requirió el fresado a 6 placas, perforación y cilindrada a cámara, bujes y maguito; conicidad a rótula y refrentados a 8 caras. Lo anterior, tuvo un costo neto total de COP\$ 4 675 000.

4. Armado y fabricación

Para el armado de la estructura se requirió de un puente grúa de dos toneladas (15 días), dos armadores con experiencia en metrología (15 días), un soldador calificado (4 días), inspector calificado Nivel II para realización de Ensayos No Destructivos (4 días), granalladora, un pintor (3 días) y un inspector de recubrimientos (3 días) con un costo total neto (Incluye prestaciones sociales) de COP\$ 7 480 000.

5. Transporte y montaje

Para el montaje desde el punto de fabricación a instalaciones de la Universidad Nacional de Colombia se requirió de un camión con capacidad de carga de 5 ton, montacargas y puente grúa móvil; asimismo, de un día de un técnico para perforaciones y ajuste de anclajes en el laboratorio de diseño por un costo total de COP\$ 310 000.

6. Costo total de prensa briqueteadora

A continuación, se presenta la sumatoria de los subtotales presentados en los ítems anteriores:

Costo total prensa briqueteadora: Diseño + materiales e insumos
+ mecanizados + armado y fabricación + transporte y montaje
= COP\$ 60 348 376

L.Anexo: Resultados propiedades mecánicas cultivo Zona Norte

Tabla 3-1. Resultados Propiedades Mecánicas cultivo Zona Norte.

Tabulación de resultados Propiedades Mecánicas cultivo Zona Norte							
Ítem	Cultivo (1)	Longitud de fibra	Porcentaje de humedad	Tiempo de compactación	Densidad aparente	Durabilidad	Resistencia a la compresión
		[mm]	[% de b.h.]	[s]	[kg/m ³]	[%]	[kN]
1	Fundación	50	8	0	963,2	99,3	40,7
2		50	8	20	922,1	99,3	40,9
3		50	8	40	971,6	98,8	41,7
4		50	12	0	766,3	96,8	38,5
5		50	12	20	688,6	99,2	35,1
6		50	12	40	797,1	98,9	26,4
7		50	16	0	710,0	98,8	39,1
8		50	16	20	767,0	99,0	31,6
9		50	16	40	635,6	99,2	15,8
10		85	8	0	890,4	96,4	33,4
11		85	8	20	922,0	98,4	37,8
12		85	8	40	1017,6	98,9	45,7
13		85	12	0	845,1	98,6	33,7
14		85	12	20	799,0	99,2	39,5
15		85	12	40	760,4	99,1	25,5
16		85	16	0	792,1	99,0	16,1
17		85	16	20	509,6	98,8	16,4
18		85	16	40	493,9	98,6	2,6
19		120	8	0	814,5	89,5	31,2
20		120	8	20	917,9	98,0	33,8
21		120	8	40	751,3	98,6	33,0
22		120	12	0	509,8	97,7	11,3
23		120	12	20	620,5	99,3	33,3
24		120	12	40	767,5	97,5	37,0
25		120	16	0	444,7	95,2	14,8
26		120	16	20	500,3	98,8	6,3
27		120	16	40	653,3	98,4	14,2

M. Anexo: Resultados cultivo Zona central.

Tabla 3-2. Resultados Propiedades Mecánicas Zona Central

Tabulación de resultados Propiedades Mecánicas cultivo Zona Central							
Ítem	Cultivo (2)	Longitud de fibra	Porcentaje de humedad	Tiempo de Compactación	Densidad Aparente	Durabilidad	Resistencia a la compresión
		[% de b.h.]	[mm]	[s]	[kg/m ³]	[%]	[kN]
28	Sábana de Torres	50	8	0	831,5	99,0	8,16
29		50	8	20	719,9	99,3	7,06
30		50	8	40	769,5	99,1	7,55
31		50	12	0	696,8	100,0	6,84
32		50	12	20	669,4	99,3	6,57
33		50	12	40	601,4	98,8	5,90
34		50	16	0	523,2	97,6	5,13
35		50	16	20	412,5	98,7	4,05
36		50	16	40	435,9	99,4	4,28
37		85	8	0	797,2	95,1	7,82
38		85	8	20	723,5	87,4	7,10
39		85	8	40	796,2	98,2	7,81
40		85	12	0	737,2	95,1	7,23
41		85	12	20	764,3	98,3	7,50
42		85	12	40	765,5	98,5	7,51
43		85	16	0	355,5	99,8	3,49
44		85	16	20	475,5	98,5	4,66
45		85	16	40	412,2	98,7	4,04
46		120	8	0	711,5	84,3	6,98
47		120	8	20	672,0	97,1	6,59
48		120	8	40	900,8	98,2	8,84
49		120	12	0	516,9	96,4	5,07
50		120	12	20	550,2	97,0	5,40
51		120	12	40	573,9	98,5	5,63
52		120	16	0	502,0	95,5	4,92
53		120	16	20	648,4	99,9	6,36
54		120	16	40	584,4	97,7	5,73

N. Anexo: Resultados cultivo Zona Oriental.

Tabla 3-3. Resultados cultivo Zona Oriental.

Tabulación de resultados Propiedades Mecánicas cultivo Zona Oriental							
Ítem	Cultivo (3)	Longitud de fibra	Porcentaje de humedad	Tiempo de compactación	Densidad aparente	Durabilidad	Resistencia a la compresión
		[mm]	[% de b.h.]	[s]	[kg/m ³]	[%]	[kN]
1	Puerto Gaitán	50	0,08	0	785,145	0,989	42,174
2		50	0,08	20	831,997	0,996	35,632
3		50	0,08	40	842,620	0,998	45,141
4		50	0,12	0	556,967	0,989	18,500
5		50	0,12	20	597,950	0,992	35,271
6		50	0,12	40	625,768	0,986	11,203
7		50	0,16	0	476,576	0,985	17,331
8		50	0,16	20	498,546	0,985	25,498
9		50	0,16	40	503,795	0,987	25,867
10		85	0,08	0	723,946	0,999	22,249
11		85	0,08	20	739,305	0,997	28,229
12		85	0,08	40	710,920	0,996	20,976
13		85	0,12	0	517,661	0,995	30,990
14		85	0,12	20	668,543	0,996	23,264
15		85	0,12	40	656,918	0,992	22,453
16		85	0,16	0	473,002	0,993	22,163
17		85	0,16	20	470,261	0,990	16,987
18		85	0,16	40	458,383	0,991	30,696
19		120	0,08	0	621,167	0,998	20,847
20		120	0,08	20	676,034	0,998	35,713
21		120	0,08	40	728,296	0,997	31,735
22		120	0,12	0	576,905	0,996	23,657
23		120	0,12	20	549,732	0,997	36,427
24		120	0,12	40	627,589	0,995	27,937
25		120	0,16	0	437,879	0,993	8,888
26		120	0,16	20	460,986	0,990	15,659
27		120	0,16	40	495,984	0,993	13,892

O.Cultivos de Palma de Aceite en Colombia



Figura O-1. Cultivos de Palma de Aceite en Colombia [5].

P. Resultados estadísticos para densidad aparente de briquetas

Tabla P-1. Efectos estimados para Densidad Aparente (gr/cm^3)

Efecto	Estimado	Error Estándar	V.I.F.
Promedio	0,657519	0,0170529	
A:TC	0,0204815	0,0157879	1,0
B: W	-0,283259	0,0157879	1,0
C: LF	-0,0547778	0,0157879	1,0
AA	0,003	0,0273455	1,0
AB	-0,0095	0,0193362	1,0
AC	0,0275	0,0193362	1,0
BB	0,002	0,0273455	1,0
BC	0,0218889	0,0193362	1,0
CC	0,00122222	0,0273455	1,0
bloque	-0,0748889	0,0182303	1,33333
bloque	-0,110667	0,0182303	1,33333

Tabla P-2. Análisis de Varianza para Densidad Aparente.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:TC	0,00566313	1	0,00566313	1,68	0,1989
B: W	1,08318	1	1,08318	321,90	0,0000
C: LF	0,0405082	1	0,0405082	12,04	0,0009
AA	0,0000405	1	0,0000405	0,01	0,9130
AB	0,00081225	1	0,00081225	0,24	0,6248
AC	0,00680625	1	0,00680625	2,02	0,1595
BB	0,000018	1	0,000018	0,01	0,9419
BC	0,00431211	1	0,00431211	1,28	0,2615
CC	0,00000672222	1	0,00000672222	0,00	0,9645
bloques	0,352933	2	0,176466	52,44	0,0000
Error total	0,232184	69	0,00336499		
Total (corr.)	1,72647	80			

Tabla P-3. Coeficiente de regresión para densidad aparente.

Coeficiente	Estimado
constante	1,25167
A:TC	-0,000595106
B: W	-0,0423647
C: LF	-0,021983
AA	0,00000375
AB	-0,000059375
AC	0,000196429
BB	0,0000625
BC	0,000781746
CC	0,0000498866

Ecuación ajustada del modelo de densidad aparente:

$$Da = 1,25167 - 0,000595106*TC - 0,0423647*W - 0,021983*LF + 0,00000375*TC^2 - 0,000059375*TC*W + 0,000196429*TC*LF + 0,0000625*W^2 + 0,000781746*W*LF + 0,0000498866*LF^2$$

$$\text{Valor óptimo} = 0,874 \text{ g/cm}^3$$

Q. Resultados estadísticos para Índice de Durabilidad de briquetas

Tabla Q-1. Efectos estimados para Índice de durabilidad (%).

Efecto	Estimado	Error Estándar	V.I.F.
Promedio	98,8586	0,58765	
A:TC	1,31478	0,544058	1,0
B: W	-1,82259	0,544058	1,0
C: LF	1,67837	0,544058	1,0
AA	-1,10619	0,942336	1,0
AB	1,18772	0,666332	1,0
AC	-1,23311	0,666332	1,0
BB	0,118593	0,942336	1,0
BC	1,60022	0,666332	1,0
CC	-0,893852	0,942336	1,0
bloque	-2,00417	0,628224	1,33333
bloque	2,22123	0,628224	1,33333

Tabla Q-2. Análisis de Varianza para Índice de Durabilidad.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:TC	3,84534	1	3,84534	3,37	0,0708
B:W	33,1193	1	33,1193	29,01	0,0000
C:LF	32,9629	1	32,9629	28,87	0,0000
AA	0,721334	1	0,721334	0,63	0,4294
AB	4,2436	1	4,2436	3,72	0,0580
AC	3,40402	1	3,40402	2,98	0,0887
BB	0,0229932	1	0,0229932	0,02	0,8876
BC	13,189	1	13,189	11,55	0,0011
CC	10,4628	1	10,4628	9,16	0,0035
bloques	28,7874	2	14,3937	12,61	0,0000
Error total	78,7777	69	1,14171		
Total (corr.)	209,536	80			

Tabla Q-3. Coeficiente de regresión para Índice de Durabilidad.

Coeficiente	Estimado
constante	98,9144
A:TC	0,0192004
B:W	-0,595499
C:LF	0,85031
AA	-0,000500463
AB	0,00429167
AC	-0,00439286
BB	-0,0022338
BC	0,0432341
CC	-0,0622373

Ecuación ajustada del modelo para Índice de Durabilidad:

$$ID = 98,9144 + 0,0192004*TC - 0,595499*W + 0,85031*LF - 0,000500463*TC^2 + 0,00429167*TC*W - 0,00439286*TC*LF - 0,0022338*W^2 + 0,0432341*W*LF - 0,0622373*LF^2$$

Valor óptimo = 99,83 (%)

R. Resultados estadísticos para resistencia a la compresión de briquetas

Tabla R-1. Efectos estimados para resistencia a la compresión (kN).

Efecto	Estimado	Error Estándar	V.I.F.
promedio	24,0891	2,12919	
A:TC	1,85148	1,97124	1,0
B: W	-14,7411	1,97124	1,0
C: LF	-6,25667	1,97124	1,0
AA	-4,1537	3,4143	1,0
AB	-0,800556	2,41427	1,0
AC	6,11167	2,41427	1,0
BB	-1,2337	3,4143	1,0
BC	-1,94944	2,41427	1,0
CC	4,7063	3,4143	1,0
bloque	-12,0901	2,2762	1,33333
bloque	2,37062	2,2762	1,33333

Tabla R-2. Análisis de varianza para resistencia a la compresión.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:TC	20,7328	1	20,7328	0,42	0,5226
B:W	2405,9	1	2405,9	48,22	0,0000
C:LF	454,187	1	454,187	9,10	0,0043
AA	18,6003	1	18,6003	0,37	0,5447
AB	23,463	1	23,463	0,47	0,4966
AC	370,913	1	370,913	7,43	0,0092
BB	10,416	1	10,416	0,21	0,6501
BC	64,7145	1	64,7145	1,30	0,2611
CC	79,002	1	79,002	1,58	0,2151
bloques	1605,35	1	1605,35	32,17	0,0000
Error total	2145,62	43	49,8982		
Total (corr.)	7198,91	53			

Tabla R-3. Coeficiente de regresión para resistencia a la compresión.

Coeficiente	Estimado
constante	55,5228
A:TC	-0,166609
B:W	0,597917
C:LF	-4,2913
AA	-0,0031125
AB	-0,0123594
AC	0,0561607
BB	-0,0582292
BC	-0,117292
CC	0,209456

Ecuación ajustada del modelo para Resistencia a la Compresión

$$C_{max} = 55,5228 - 0,166609*TC + 0,597917*W - 4,2913*LF - 0,0031125*TC^2 - 0,0123594*TC*W + 0,0561607*TC*LF - 0,0582292*W^2 - 0,117292*W*LF + 0,209456*LF^2$$

Valor óptimo = 35,7 kN

S. Cálculo de beneficio económico de implementar planta de densificación de tusa

Para establecer el beneficio económico de instalar planta para prensado de briquetas; con el objeto, de comercialización para ser usado en la producción de energía eléctrica o calorífica; se requiere, estimar los costos de instalación, equipos y mantenimiento; asimismo, el cálculo de las utilidades obtenidas por la venta de briquetas. Para la instalación de planta se requiere dividir en dos frentes de obra del proyecto: Obra civil e instalación de equipos. A continuación, se realiza descripción de cada frente, donde se presentan los costos unitarios y totales; aclarando, que los cálculos se realizan para una producción de 5 t/h. De igual manera, se requieren insumos como materia prima (Tusa) y energía; adicionalmente, el personal, herramientas e insumos para mantenimiento preventivo.

Descripción:

- Obra civil: Dentro de este frente de trabajo se incluyen las fundaciones necesarias para los montajes; asimismo, embebidos donde se apoye la estructura. Por otra parte, como ya se mencionó la estructura en acero para el montaje de la banda transportadora, equipos y casetas para protección de los mismos; se encuentran, en este grupo.
- Equipos: Se describe los equipos principales requeridos para el montaje de la planta piloto; siendo estos, en orden operativo banda transportadora, trituradora, secadora y prensa briqueteadora.

1. Costos:

A continuación, se describen los costos del proyecto; iniciando desde la inversión inicial hasta los costos operativos y mantenimiento.

Inversión Inicial:

En el cálculo de costos iniciales se presupuesta que las plantas extractoras poseen terrenos de 500 m² disponibles para construir instalaciones; por lo tanto, de no disponerse se requiere al precio actual adicionar el precio del terreno.

- Fundaciones y estructura:

$$\text{Costo de estructura} = \text{kilogramos} \times \text{valor nominal unitario}$$

El valor nominal unitario, hacer referencia al costo en el mercado de un kilogramo de estructura fabricada; el cual incluye, diseño, materiales, corte, perforaciones, soldadura, limpieza, esquema de recubrimiento y montaje. Para la fecha en que se realizó este proyecto el valor de la estructura es COP \$ 6500. Por otra parte, para el cálculo se toman en cuenta el número de casetas necesarias para la protección, dimensiones de los equipos y longitud de la banda transportadora. Por lo tanto,

$$\text{Costo de estructura} = 90\,000 \times 6500 = \text{COP } \$585\,000\,000 \quad \text{Ec. O-1}$$

- Equipos:

Banda transportadora: COP\$ 48 100 000

Trituradora: COP \$ 90 000 000

Secadora: COP \$ 150 000 000

Prensa briqueteadora ARNOLD HSB-10, la cual actúa por principio de extrusión, mediante, tornillo sinfín: COP \$ 378 000 000 [76].

Montaje: COP \$ 24 000 000 [76].

Nota: La tasa de conversión de dólares a pesos colombianos se calcula con la tasa de cambio vigente del día 16/09/2016; la cual es 3000 pesos por dólar.

$$\text{Costo de equipos} = \$ 642\,000\,000 \quad \text{Ec. O-2}$$

En la Tabla O-1 se calcula la inversión inicial requerida:

Tabla R-4. Cálculo de inversión inicial.

Descripción	Costo
Fundaciones y estructura	COP \$ 585 000 000
Equipos	COP\$ 642 000 000
Inversión inicial	COP \$ 1 227 000 000

2. Costos de operación

▪ Insumos:

Tusa: El proceso de extracción de la ciruela produce tusas vacías en las plantas extractoras; por lo tanto, su costo es calculado basado en su valor agregado como abono a las plantaciones: para realizar el costo del valor de la tusa se debe tener en cuenta artículo escrito en revista palma al día de Fedepalma; en el cual, se comenta que en estudio realizado por Aceites Manuelita el uso de tusa como abono se reduce el costo de nutrientes en COP \$ 800 000; asimismo, el costo de aplicación de la tusa es de COP \$ 245 000 por hectárea aplicando 300 kg anuales por palma [77]. Realizando cálculos:

Beneficio por hectárea: COP \$800 000 [77].

Costo de aplicación por hectárea: COP \$ 245 000 [77].

Cantidad de tusa por palma: 300 kg [77].

$$\text{Cantidad de palmas/ hectarea} = 22 \times 6,5 = 143 \quad \text{Ec. O-3}$$

$$\text{Cantidad de } \frac{\text{kilos}}{\text{hectarea}} \text{ depositados} = \text{Cantidad de } \frac{\text{palmas}}{\text{hectarea}} \times 300 = 42\,900 \quad \text{Ec. O-4}$$

$$\text{Valor de kilogramo de tusa} = \left(\frac{\text{Beneficio por hectárea} - \text{costo de aplicación}}{\text{cantidad de kilos por hectárea depositados}} \right) =$$

$$\text{COP\$ } 12\,937 \quad \text{Ec. O-5}$$

Valor tonelada de tusa = COP\$ 12 937

Cálculo del valor de materia prima (Tusa) para el 1° año

$$= \text{COP } \$12937 \times 5 \frac{\text{ton}}{\text{hora}} \times 8 \text{ horas} \times 347 \text{ días laborales}$$

$$= \text{COP } \$ 179\,566\,433$$

Energía de entrada: El cálculo de los kilovatios se realiza según ficha técnica de los equipos; siendo, su valor calculado en base del precio del mercado del kilovatio hora-mes para el 16/09/2016 es de COP\$ 589 con incremento mensual del 1,5% [70].

- **Mantenimiento:** El costo por mantenimiento de equipos para procesamiento en plantas extractoras es aproximadamente del 1° al 5° año respectivamente de 16, 17, 18, 19 y 20% anual del costo de los equipos [5] [76]. Para lo cual se requiere de 20 horas semanales entre técnico electrónico, mecánico y servicios generales.

$$\text{Mantenimiento 1° año} = 468\,000\,000 \times 0,2 = \$ 74\,000\,000$$

En la tabla O-2 se establecen los costos de producción diaria para un turno de 8 horas y anual de 347 días.

Tabla R-5. Costo anual de operación.

Año	Materia Prima (tusa) (COP \$)	Energía (COP \$)	Mantenimiento (COP \$)	Costo de operación (COP \$)
1°	179 566 433	1 635 064	74 880 000	256 081 497
2°	184 953 426	1 929 375	79 560 000	266 442 801
3°	190 502 029	1 987 256	84 240 000	276 729 285
4°	196 217 090	2 046 874	88 920 000	287 183 964
5°	202 103 602	2 108 280	93 600 000	297 811 882

3. Utilidades

La producción y comercialización de briquetas de 5 kg se realizará en plantas, aclarando, que este peso es entregado por la prensa seleccionada para producción; asimismo, se toma una producción de 5 t/h debido a que 14 de las 43 plantas extractoras instaladas en Colombia se encuentran en este rango [76]. Por otra parte, el valor de tonelada de biomasa densificada en el mercado es \$ 62 [77], generando, utilidad por kilogramo de briqueta densificada de COP \$186 a una tasa de cambio de 3000 pesos por dólar; la cual es la tasa vigente promedio al día del cálculo. A continuación, se realiza el cálculo del valor de briqueta densificada.

Cantidad de briquetas por hora: 300 [76].

Valor unitario de briqueta:

$$\text{Valor unitario de briqueta, } COP \$ = 186 \times 5 = 930$$

Utilidad de producción por día (VP):

$$VP = \text{Valor unitario por briqueta} \times \text{cantidad de briquetas} \quad \text{Ec. O-6}$$

$$VP = 930 \times 300 \times 8 = \$ 2\,232\,000$$

Flujo neto de efectivo por año (FNE): se realiza el cálculo de ingresos diarios por concepto de venta de briquetas; teniendo en cuenta, que en Colombia el promedio de feriados por año es 18.

$$FNE = VP \times 347 \quad \text{Ec. O-7}$$

$$FNE = 2.232.000 \times 347 = 774\,504\,000$$

Por otra parte, el incremento en el valor de las briquetas por año está dado por el aumento de la tasa de inflación y el índice de precios del consumidor IPC; los cuales, están directamente relacionados; siendo este valor promedio histórico para los últimos 5 años 5,31% anual [78].

4. Cálculo de tasa interna de retorno (TIR):

Para el cálculo de la tasa interna de retorno se realiza cálculo basado en flujo de caja anual; realizando, resta entre flujo neto efectivo y costos de operación generando el flujo de caja; lo anterior permite introducir el cálculo de costo de mantenimiento preventivo y correctivo de las instalaciones y equipos. Adicionalmente, se debe incluir el costo operacional de la planta; la cual, debe ser operada por una persona durante 48 horas semanales; según lo establecido por el código sustantivo de trabajo en el artículo 161 de la ley colombiana. Por lo tanto, se debe realizar calculo basado en 48 horas hombre semanales. A continuación, se plantea la ecuación el cálculo de TIR:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_c}{(1+TIR)^t} - I=0 \quad \text{Ec. O-8}$$

Donde,

VAN: Valor actual neto

n: Número de periodos (5 años), y

I: Inversión inicial

Fc: Flujo de caja

$$\text{Flujo de caja} = \text{Flujo Neto Efectivo} - \text{Costos de operación}$$

Reemplazando, valores en la Ecuación O-8 para los primeros cinco años de producción; la tasa interna de retorno es del 21%. Asimismo, el equilibrio del proyecto se alcanza a los 37 meses de haber iniciado la producción de briquetas.

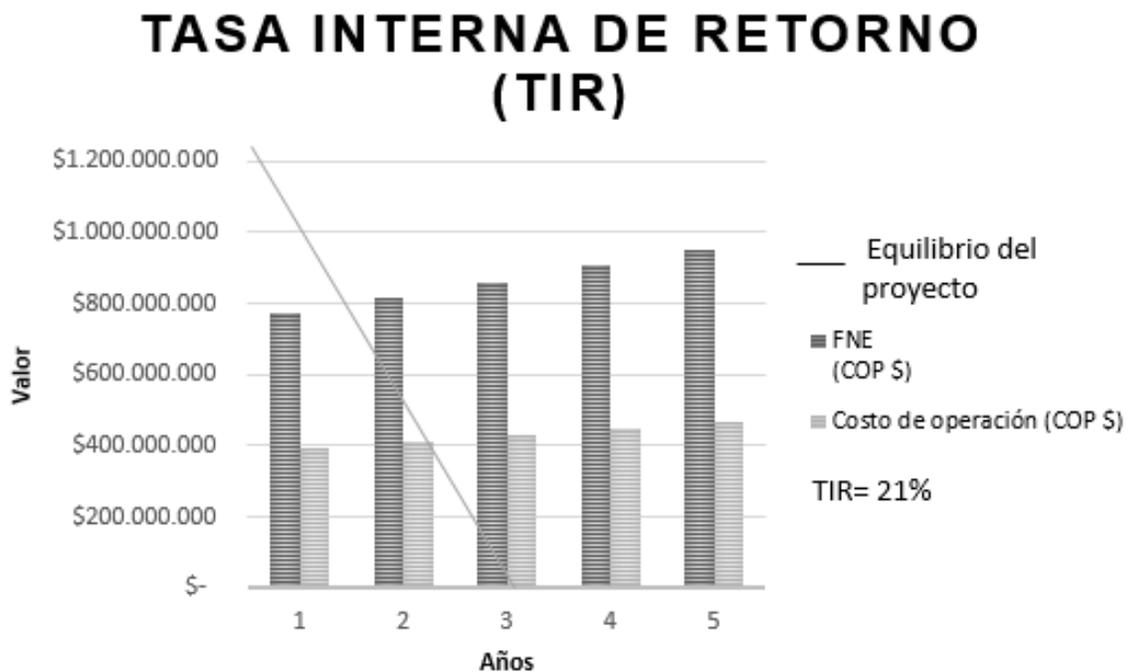


Figura S-1. Gráfico de tasa interna de retorno con línea de equilibrio del proyecto.
Fuente: Autor.

6. Bibliografía

- [1] H. P. Garcia, «Modelación de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo. Tesis de Maestría,» Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2011.
- [2] L. Gustavsson, J. Holmberg, V. Dornburg, R. Sathre, T. Eggers, K. Mahapatra y G. Marland, «Using biomass for climate change mitigation and oil use reduction,» *Energy Policy*, vol. 35, nº 11, pp. 5671-5691, 2007.
- [3] Kjällstrand y M. Osslon, «Emissions from burning of softwood pellets.,» *Biomass and Bioenergy*, vol. 27, nº 6, pp. 607-611, 2004..
- [4] Universidad Nacional de Colombia, «Seminario Internacional de uso energético de biomasa,» Agencia UN, [En línea]. Available: <http://www.investigacion.unal.edu.co>. [Último acceso: 14 Febrero 2016].
- [5] FEDEPALMA, «Fedepalma,» Fedepalma, [En línea]. Available: www.sispaweb.fedepalma.org/SitePages/Censo.aspx. [Último acceso: 17 Abril 2016.].
- [6] N. E. Ramírez Contreras, A. Arevalo y J. A. García Núñez, «Inventario de la biomasa disponible en plantas de beneficio para su aprovechamiento y caracterización fisicoquímica de la tusa en Colombia,» *Revista Palmas*, vol. 36, nº 4, pp. 41-54, 2015.
- [7] E. Granada, G. Lareo, J. Míguez, J. Moran, J. Porteiro y L. Ortiz, «Feasibility study of forest residue use as fuel through co-firing with pellet,» *Biomass and Bioenergy. Elsevier*, vol. 30, nº 3, pp. 238-246, 2006.
- [8] T. Jiang Ping*, L. Hon Loong, M. K. Abdul Aziz y N. Azian Morad, «Biomass Characteristics Index with Calorific Value: A Numerical Approach in Palm Bio-energy Estimation,» *Applied Thermal Engineering*, vol. ate 8305, pp. 1-18, 2016.
- [9] P. A. P. A. Carone Maria teresa, «Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea europaea* L.,» *Biomass and bioenergy. Elsevier*, vol. 35, nº 1, pp. 402-410, 2011.
- [10] N. Kaliyan y V. Morey, «Natural binders and solid bridge type biding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass,» *Bioresource technology*, vol. 101, pp. 1 - 9, 2010.

- [11] T. K., «Physical properties of pellets made from sorghum stalk, corn stover, wheat straw, and big bluestem.,» *Industrial crops and products*, vol. 33, pp. 1-8, 2011.
- [12] M. Gil, P. Oulego, M. Casal, C. Pevida, J. Pis y F. Rubiera, «Mechanical durability and combustion characteristics of pellets from biomass blends,» *Bioresource technology*, vol. 101, nº 22, pp. 8859-8867, 2010.
- [13] W. Stelte, J. K. Holm, A. Sanadi, S. Barsberg, B. Sørensen, J. Ahrenfeldt y U. B. Henriksen, «A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources,» *Biomass and bioenergy*, vol. 35, nº 2, pp. 910-918, 2011..
- [14] C. Antwi-Boasiako y B. Acheampong, «Strength properties and calorific values of sawdust-briquettes as wood-residue energy generation source from tropical hardwoods of different densities,» *Biomass and Bioenergy*, vol. 85, pp. 144-152, 2016.
- [15] A. Sosa, M. Acuna, K. McDonnell y G. Devlin, «Managing the moisture content of wood biomass for the optimisation of Ireland's transport supply strategy to bioenergy markets and competing industries,» *Energy*, vol. 86, pp. 354-368, 2016.
- [16] H. Shahrukh, A. O. Oyedun, A. Kumar, B. Ghiasi, L. Kumar y S. Sokhansanj, «Net energy ratio for the production of steam pretreated biomass-based pellets,» *Biomass and Bioenergy*, vol. 80, pp. 286-297, 2015.
- [17] L. Chai y C. Saffron, «Comparing pelletization and torrefaction depots: Optimization of depot capacity and biomass moisture to determine the minimum production cost,» *Applied Energy*, vol. 163, pp. 387 - 395, 2016.
- [18] T. W. Chatcharin Sakkampang, «Study of ratio energy consumption and gained energy during briquetting process for glycerin-biomass briquette fuel.,» *Fuel*, vol. 115, pp. 186-189, 2014.
- [19] M. V. Kaliyan Nalladurai, «Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass,» *Biomass and Bioenergy*, 2010.
- [20] C. Serrano, E. Monedero, M. Lapuerta y H. Portero, «Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets,» *Fuel processing technology*, vol. 92, nº 3, pp. 699-706, 2011.

-
- [21] J. Dai y J. R. Grace, «Biomass granular screw feeding: An experimental investigation,» *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, nº 2, pp. 942-955, 2011..
- [22] W. Stelte, J. K. Holm, A. R. Sanadi , S. Barsberg y J. Ahrenfeldt, «Fuel pellets from biomass: the importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions.,» *Fuel*, pp. 1 - 6, 2011..
- [23] T. L. S. S. Sudhagar Mani, «Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses,» *Biomass and Bioenergy.*, vol. 30, nº 7, pp. 648-654, 2011..
- [24] R. Gómez, «Values for participle-scale properties of biomass briquettes made from agroforestry residues,» *Biomass and Bioenergy.*, vol. 37, pp. 1 - 9, 2011.
- [25] A. Domingos Maia y L. Cardoso de Morais, «Kinetic parameters of red pepper waste as biomass to solid biofuel,» *Bioresource Technology*, vol. 204, pp. 157-163, 2016.
- [26] K. A. Motghare, A. Rathod , K. Wasewar y . N. Labhsetwar , «Comparative study of different waste biomass for energy application,» *Waste Management*, vol. 47, pp. 40-45, 2016.
- [27] C. Rhen, M. Öhman, R. Gref y I. Wästerlund, «Effect of raw material composition in woody biomass on combustion characteristics,» *Biomass and Bioenergy*, vol. 31, nº 1, pp. 66-72, 2007..
- [28] N. Hodic, A. Kazagic y I. Smajevic, «Influence of multiple air staging and reburning on NOx emissions during co-firing of low rank brown coal with woody biomass and natural gas,» *ELSEVIER*, vol. 168, pp. 38-47, 2016.
- [29] K. M. Holmgren, T. S. Berntsson, E. Andersson y T. Rydberg, «The influence of biomass supply chains and by-products on the greenhouse gas emissions from gasification-based bio-SNG production systems,» *ELSEVIER*, vol. 90, pp. 148-162, 2015.
- [30] M. Olsson y J. Kjällstrand, «Emissions from burring of softwood pellets,» *Biomass and Bioenergy*, vol. 27, nº 6, pp. 607-611, 2004.
- [31] Bepex, «Bepex,» Bepex, [En línea]. Available: [www. Bepex.com/equipment](http://www.Bepex.com/equipment). [Último acceso: 26 Marzo 2014.].
- [32] S. F. D. Peñaloza Chacín Francisco, Obtención de DRI (Hierro de reducción directa) a partir de briquetas auto reductoras de concentrado de mineral de

- laterita ferruginosa. Trabajo de grado, caracas: Universidad Central de Venezuela, 2004.
- [33] L. Ortiz, «Producción de biocombustibles sólidos de alta densidad en España. Universidad de Vigo,» Pontevedra, Universidad de Vigo., 2008, pp. 1 - 7.
- [34] S. Mani y L. Tabil, « Evaluation of compaction equations applied to four biomass species,» *Canadian Biosystems Engineering*, vol. 46, pp. 55-61, 2004.
- [35] Komarket, «Komarket,» Komarket, [En línea]. Available: www.Komarek.com/articles. [Último acceso: 26 Marzo 2014].
- [36] Z. Husain , Z. Zainac y Z. Abdullah, «Briquetting of palm and Shell from the processing of palm nuts to palm oil.,» *Biomass and bioenergy*, vol. 22, nº 6, pp. 505-509, 2002.
- [37] DINEN 15270, «Pellet burners for small heating boilers. Definitions, requirements, testing, marking.,» Deutsches Institut für Normung., Berlin, Germany., 2007..
- [38] ÖNORM M 7135., «Compressed wood or compressed bark in natural state, pellets and briquettes. Requirements and test specifications.,» nº 30, pp. 1 - 9, 2003.
- [39] A. García-Maraver, V. Popov y M. Zamorano, «A review of European standards for pellet quality.,» *Renewable Energy*, vol. 36, nº 12, pp. 3537-3540, 2011.
- [40] Sjaak Van Loo y K. Jaap, «The handbook of biomass combustion and co-firing,» Earthscan, Londres, 2008.
- [41] «SS 187120. Biofuels and peat, fuel pellets.,» Swedish Standards Institution. , Stockholm, Sweden. ., 1998..
- [42] DIN 51731, «Testing of solid fuels, compressed untreated wood. Requirements and testing.,» Deutsches Institut für Normung., Berlin, Germany., 1996..
- [43] CTI- R 04/05, «Recommendation: solid biofuels. Pellet characterization for energetic purposes.,» 2004.
- [44] CEN/TS 14588, CEN/TC 335, «Published standard,» Solid biofuels. Terminology., 2004.
- [45] SS 187120., «Biofuels and peat, fuel pellets,» *Classification.*, pp. 1-10, 1998..
- [46] ASTM E 775, «Standard Test Methods for Total Sulfur in the Analysis Sample of Refuse-Derived Fuel,» ASTM, Pensilvania, 1987 (REAPROBADA EN 2004).

-
- [47] X. Yang, C. Geng, X. Sun, W. Yang, X. Wang y J. Chen, «Characteristics of particulate-bound polycyclic aromatic hydrocarbons emitted from industrial grade biomass boilers,» *Elsevier*, vol. 40, pp. 28-34, 2016.
- [48] ASTM E 2779., «Standard Test Method for Determining Particulate Matter Emissions from Pellet Heaters,» ASTM, Philadelphia, 2010.
- [49] ASTM E 1757, «Standard Practice for Preparation of Biomass for Compositional Analysis,» *American Society for Testing and Materials*, pp. 1- 4, 2001 (REAPROBADA 2015).
- [50] ASTM E 1288, «Standard Test Method for The Durability of Biomass Pellets,» *American Society for Testing and Materials*, pp. 1-2, 1989 (REAPROBADA 1994).
- [51] Universidad Nacional de Colombia, «UNVIRTUAL,» 1 Septiembre 2015. [En línea]. Available: <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ingenieria/2023293/index.html>.
- [52] ASTM E 870, «Standard Test Methods for Analysis of Wood Fuels,» *American Society for Testing and Materials*, pp. 1-2, 1982 (REAPROBADA 2006).
- [53] ASTM E 871, «Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels,» *American Society for Testing and Materials*, pp. 1-2, 2013.
- [54] ASTM E 1755, «Standard Test Method for Ash in Biomass,» pp. 1- 3, 2001 (REAPROBADA EN 2015).
- [55] American National Standard, «ASTM D 240,» American National Standard, Filadelfia, 2014.
- [56] ASTM E 711, «Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter,» Philadelphia, 1992.
- [57] M. Huang, J. Luo, Z. Fang y H. Li, «Biodiesel production catalyzed by highly acidic carbonaceous catalysts synthesized via carbonizing lignin in sub- and super-critical ethanol,» *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 190, pp. 103-114, 2016.
- [58] Z. Yan, J. Li, S. Chang, T. Cui, Y. Jiang, M. Yu, L. Zhang, G. Zhao, P. Qi y S. Li, «Lignin relocation contributed to the alkaline pretreatment efficiency of sweet sorghum bagasse,» *Fuel*, vol. 158, pp. 152-158, 2015.
- [59] Z. Yang, X. Zhang, X. Yao, Y. Fang y H. Chen, «beta-cyclodextrin grafted on lignin as inverse phase transfer catalyst for the oxidation of benzyl alcohol in H₂O,» *Tetrahedron*, vol. 72, pp. 1773-1781, 2016.

- [60] S.-D. Gong, Y. Huang, H.-J. Cao, Y.-H. Lin, Y. Li, S.-H. Tang, M.-S. Wang y X. Li, «A green and environment-friendly gel polymer electrolyte with higher performances based on the natural matrix of lignin,» *Journal of Power Sources*, vol. 307, pp. 624-633, 2016.
- [61] G. La Rotta Amaya, Efectos sociales del Cultivo de Palma de Aceite: Condiciones laborales, seguridad social y educación en los trabajadores palmeros de Cumaral. Tesis de Maestría, Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2010.
- [62] E. Restrepo, «Un océano verde para extraer aceite: hacia una etnografía del cultivo de la Palma de Aceite en Tumaco,» *Universitas Humanistica*, vol. 58, pp. 72-87, 2004.
- [63] A. Rudquist y S. Van, «Informe final de evaluación de medio término laboratorio de paz del magdalena Medio,» 2005.
- [64] Comisión intersticial de justicia y paz, «Agronegocios de palma y banano en el Bajo Atrato,» Bogotá, 2015.
- [65] A. C. Morel, S. S. Saatchi, Y. Malhi, N. J. Berry, L. Banin y D. Burslem, «Estimating aboveground biomass in forest and oil palm plantation in Sabah Malaysian Borneo using ALOS PALSAR data,» *Forest Ecology and Management*, vol. 262, pp. 1786-1798, 2011.
- [66] J. A. Garcia-Nunez , N. E. Ramirez-Contreras, D. T. Rodriguez , E. Silva-Lora , C. Stuart Frear y C. Stockle , «Evolution of palm oil mills into bio-refineries: Literature review on current and potential uses of residual biomass and effluents,» *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 110, pp. 99-114, 2016.
- [67] J. A. Garcia, M. Cárdenas y E. E. Yañez, «Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia,» *Revista Palmas*, vol. 31, nº 2, p. 43, 2010.
- [68] Acepalma, «Productos y servicios,» Acepalma, [En línea]. Available: <http://www.acepalma.com/Productos.php>. [Último acceso: 6 Abril 2016].
- [69] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, «Zonas no interconectadas,» Superservicios, 2014. [En línea]. Available: <http://www.superservicios.gov.co/Energia-y-gas/Energia/Zonas-no-interconectadas>. [Último acceso: 10 Abril 2016].
- [70] Empresas Publicas de Medellin, «EPM,» EPM, 4 Abril 2016. [En línea]. Available: http://www.epm.com.co/site/clientes_usuarios. [Último acceso: 13 Mayo 2016].

- [71] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), «Caracterización energética de los sectores residencial, comercial y terciario,» Grupo de demanda energética, Subdirección de planeación energética, 2007. [En línea]. Available: http://www.upme.gov.co/Upme12/2007/Upme13/Caracterizacion_energetica_sectores.pdf. [Último acceso: 7 Abril 2016].
- [72] Departamento Nacional Administrativo de Estadística (DANE), «Boletín censo general 2005,» DANE, 2005. [En línea]. Available: http://www.dane.gov.co/files/censo2005/PERFIL_PDF_CG2005/00000T7T000.PDF. [Último acceso: 7 Abril 2016].
- [73] Unidad de Planeación Mineroenergética, «UPME,» 2016. [En línea]. Available: http://sig.simec.gov.co/GeoPortal/images/pdf/UPME_EN_TRANSMISION%20PLAN_ACTUAL.pdf. [Último acceso: 10 Abril 2016].
- [74] J. A. García , M. M. Cárdenas y E. E. Yáñez, «Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia,» *Power Generation and Use of Biomass at Palm Oil Mills in Colombia*, vol. 31, nº 2, pp. 41-48, 2010.
- [75] N. Arzola De La Peña y J. A. García Nuñez, «The Development and Validation Test of a New Agricultural Machine for Process of Cutting of African Oil Palm Fruits in Plantation,» Bogotá, 2016.
- [76] LOURITEX, «Louritex,» [En línea]. Available: www.louritex.com. [Último acceso: 28 Julio 2016].
- [77] FEDEPALMA, «Palma al día,» FEDEPALMA, 2014. [En línea]. Available: www.palmaldia.org/xii-reunion-tecnica/uso-de-tusa-fresca. [Último acceso: 26 Septiembre 2016].
- [78] DANE, «DANE,» [En línea]. Available: <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/precios-y-costos/indice-de-precios-al-consumidor-ipc>. [Último acceso: 3 septiembre 2016].
- [79] ITEBE, «France does not have an official standard but a set of quality controls has been developed.,» Paris, 2009.
- [80] Fedepalma, «SISPA,» 17 aBRIL 2014. [En línea]. Available: www.sispaweb.fedepalma.org/SitePages/Censo.aspx.
- [81] Published standard., «CEN/TS 14588, CEN/TC 335.,» *Solid biofuels.*, 2004..

- [82] A. Boasiak y B. Acheampong, «Strength properties and calorific values of sawdust-briquettes as wood-residue energy generation source from tropical hardwoods of different densities,» *Biomass and Bioenergy*, vol. 85, pp. 144-152, 2016.
- [83] A. Björkman, «Projects on coal characterization,» *Fuel*, vol. 80, pp. 155-166, 2001.
- [84] B. B. Nyakuma, A. Johari, A. Ahmad y T. A. Tuan, «Comparative analysis of the calorific fuel properties of Empty Fruit Bunch Fiber and Briquette,» *Energy Procedia*, vol. 52, pp. 466-473, 2014.
- [85] M. Erol, H. Acma y S. Küçükbayrak, «Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data,» *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 170-173, 2010.
- [86] tiendabiomasa, «Tienda de biomasa,» tiendabiomasa, [En línea]. Available: <http://tiendabiomasa.com/>. [Último acceso: 11 Mayo 2016].
- [87] «Runsun,» WEIFANG RONSUN POWER MACHINERY, 2015. [En línea]. Available: <http://en.ronsunpower.com/index.php>. [Último acceso: 12 Mayo 2016].
- [88] V. T. V. d. P. Thomas M, «Physical quality of pelleted animal feed contribution of feeds components,» *Amin Feed Sci technol.*, vol. 70, nº 1, pp. 59-78, 1998.
- [89] A. Korus y A. Szlek, «The effect of biomass moisture content on the IGCC efficiency,» *Biomass and Bioenergy*, vol. 80, pp. 222-228, 2015.
- [90] Universidad nacional de Colombia, «Agencia UN,» Agencia UN, [En línea]. Available: <http://www.investigacion.unal.edu.co/index.php/boletininvestigaun/nota/3224-20141002-biomasa>. [Último acceso: 25 Septiembre 2015].
- [91] J. Parikh, S. Channiwala y G. Ghosal, «A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels,» *Fuel*, vol. 84, nº 5, pp. 487-494, 2005.
- [92] ASTM, «Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature,» American National Standard, 2000.