



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Caracterización de propiedades físicas y mecánicas de briquetas de biomasa de aserrín de pino y cascarilla de arroz

Andrés Felipe Niño Cano

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

2019

Caracterización de propiedades físicas y mecánicas de briquetas de biomasa de aserrín de pino y cascarilla de arroz

Andrés Felipe Niño Cano

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

Codirector (a):

Ph.D. Oscar Javier Araque de los Ríos

Línea de Investigación:

Diseño de Maquinas

Grupo de Investigación:

Diseño Óptimo Multidisciplinario

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Bogotá, Colombia

2019

Dedicatoria

Dedico este trabajo a todas las personas que creyeron y no creyeron en mí, cuyo apoyo y motivación me permitieron alcanzar el objetivo final del mismo, así como no desfallecer pese a todas las dificultades presentadas a lo largo del trabajo. A todas las personas que directa o indirectamente, me dieron las fuerzas y motivos para crecer, seguir mi camino y poder culminar satisfactoriamente mi trabajo como un peldaño más para alcanzar mis sueños.

“Saber que sabemos lo que sabemos y saber que no sabemos lo que no sabemos, ese es el verdadero conocimiento”.

Nicolás Copérnico

Agradecimientos

En primer lugar deseo agradecer a mi director de tesis, el profesor Ph.D. Nelson Arzola de la Peña, quien con su dirección y asesoría permitió llevar a buen fin este trabajo. Al Codirector, el profesor Ph.D. Oscar Javier Araque de los Ríos por su apoyo en el desarrollo de las simulaciones computacionales.

A la Universidad Nacional de Colombia y en especial a todos los encargados de los distintos laboratorios quienes me ayudaron y permitieron desarrollar todas las actividades necesarias para adelantar la investigación. A Johanna Yepes encargada del Laboratorio de Diseño de Máquinas y Prototipos, quien me permitió ejecutar los ensayos respectivos, además de apoyarme con los equipos durante el mismo, pues con el apoyo de Danny Andrés Gómez, realizaron adecuaciones a equipos necesarios para el trabajo.

A Fabio Moreno encargado del Laboratorio Transmisión de Calor, por permitirme hacer uso del laboratorio y equipos para el desarrollo de pruebas experimentales. A Darío Moreno quien me colaboro y permitió realizar algunas de las pruebas para la investigación.

A los estudiantes que como proyecto de la materia “Proyecto Aplicado de Ingeniería”, ayudaron con la adecuación y puesta a punto en el equipo para la prueba del Índice de Durabilidad

A mi familia, especialmente mis padres Adalgiza Inés Cano y Jorge Enrique Niño, mi hermana Cristina Niño, a mi amigo Dillam Díaz, quienes no solo me motivaron en los momentos más difíciles y me apoyaron a la hora de realizar mi trabajo

Resumen

La presente investigación sobre el comportamiento de las briquetas de biomasa fabricadas a partir de una mezcla de cascarilla de arroz y aserrín de pino permitió evidenciar que las variables respuesta del proceso de densificación (índice de durabilidad, resistencia a la compresión, densidad aparente, módulo elástico) se ven influenciadas en distintos grados respecto a las variables independientes seleccionadas (temperatura del proceso, proporción de mezcla de biomasa, tiempo de compactación). El diseño experimental consistió en un modelo factorial mixto de tres factores: temperatura (90 °C y 110 °C), tiempo de compactación (20 s, 40 s y 60 s) y proporción de biomasa (25 %, 50 % y 75 %), obteniendo en total 18 tratamientos. Debido a que se realizaron algunos ensayos destructivos de las briquetas, el número de repeticiones es diferente de acuerdo al tipo de ensayo aplicado.

Las variables de mayor importancia fueron la temperatura del proceso y la proporción de cascarilla de arroz en la mezcla de biomasa, teniendo las mejores propiedades de resistencia mecánica con los niveles de temperatura alto (110 °C) y menor proporción de cascarilla en la mezcla (25 %) que favorecen los procesos de densificación y aglomeración de partículas. Los modelos de impacto y compresión, permitieron simular el comportamiento mecánico de las briquetas a partir de los resultados experimentales.

Palabras clave: Aserrín de Pino, Briquetas de mezcla de Biomasa, Cascarilla de Arroz, Densificación, Propiedades mecánicas de Biomasa.

Abstract

The present research based in the behavior of biomass briquettes from a mixture of rice husk and pine sawdust allowed to demonstrate that the response properties of the densification process (durability index, compressive strength, apparent density, elastic modulus), they are influenced in many degrees according with the selected independent variables (temperature, biomass mixing ratio, compaction time). The experimental design consisted of a mixed factorial model of three factors: temperature (90 °C and 110 °C), compaction time (20 s, 40 s and 60 s) and biomass ratio (25 %, 50 % and 75 %), obtaining in total 18 treatments. Due some destructive briquette tests were performed, the number of repetitions is different according to the type of test applied.

The most important variables were the process temperature and the biomass mixing ratio, having the best mechanical resistance properties with high temperature levels (110 °C) and lower proportion of rice husk in the biomass mix (25 %). The impact and compression models allowed to simulate the mechanical behavior of the briquettes from the experimental results.

Keywords: Biomass Mechanical Properties, Biomass Mix Briquettes, Densification, Pine Sawdust, Rice Husk.

Contenido

	<u>Pág.</u>
Resumen	IX
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas.....	XVI
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	XVIII
Introducción	1
1. Capítulo 1: Antecedentes.....	5
1.1 Antecedentes nacionales	5
1.1.1 Residuos orgánicos en Colombia	5
1.1.2 Distribución de principales fuentes de biomasa	9
1.1.3 Recursos forestales.....	14
1.1.4 Trabajos nacionales previos	17
1.2 Antecedentes internacionales	18
1.2.1 Normas asociadas a la caracterización y producción de biomasa.....	18
1.2.2 Trabajos previos a nivel internacional	20
1.3 Características de las Biomosas	21
2. Capítulo 2: Materiales y métodos	25
2.1 Diseño experimental	25
2.1.1 Preguntas de investigación relativas al diseño experimental	25
2.1.2 Modelo de diseño	26
2.1.3 Identificación de las fuentes de variación	27
2.1.4 Diseño de control de error	33
2.1.5 Diseño de tratamientos	33
2.2 Técnicas experimentales.....	34
2.2.1 Materia prima.....	34
2.2.2 Ensayos preliminares	36
2.2.3 Ensayos y normas aplicadas	39

2.3	Modelo para simulación Computacional.....	46
2.3.1	Modelo del material de briquetas	47
2.3.2	Modelo de impacto.....	50
2.3.3	Modelo de ensayo de compresión.....	52
3.	Capítulo 3: Resultados y análisis.....	53
3.1	Ensayos preliminares	53
3.2	Resultados experimentales	58
3.2.1	Ensayos de Densidad aparente	59
3.2.2	Ensayo de resistencia a compresión ($C_{m\acute{a}x}$)	64
3.2.3	Ensayo para Índice de Durabilidad.....	70
3.2.4	Ensayo para obtener el módulo elástico	75
3.2.5	Microscopías	80
3.2.6	Otros resultados	90
3.3	Resultados de las simulaciones computacionales	93
3.3.1	Modelado de material	93
3.3.2	Modelo de caída de briqueta	99
3.3.3	Modelo de compresión	107
4.	Capítulo 4: Conclusiones y recomendaciones	111
4.1	Conclusiones.....	111
4.2	Recomendaciones	114
A.	Anexo: Clasificación de especies para cultivos vegetales [13]	117
B.	Anexo: Producción de cultivos de gran relevancia en Colombia [14] [15]	123
C.	Anexo: Resultados de ensayos mecánicos para la densidad aparente	124
D.	Anexo: Resultados de ensayos mecánicos para la resistencia a compresión	126
E.	Anexo: Resultados de ensayos mecánicos para Índice de Durabilidad y Porcentaje de Humedad.....	127
F.	Anexo: Resultados de ensayos mecánicos para el módulo elástico	128
	Bibliografía.....	129

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1.1: Mapa de la distribución de biomasa residual total en Colombia [17] [18].	8
Figura 1.2: Mapa de distribución de biomasa de origen agrícola [17] [18].	9
Figura 1.3: Producción en ton/año de cultivos principales en Colombia para (a) Arroz, (b) Maíz, (c) Banano, (d) Café, (e) Caña de Azúcar, (f) Caña panelera, (g) Palma de aceite, (h) Plátano [18].	10
Figura 1.4: Distribución de bosques en Colombia [28].	15
Figura 2.1: Diseño de caja negra.	28
Figura 2.2: Prensa para la fabricación de briquetas.	35
Figura 2.3: Báscula de precisión con resolución 0,0001g marca Ohaus PA224 - Pioneer Analytical Balance, 220 g x 0,1 mg.	40
Figura 2.4: Montaje interno de tambor giratorio. (a) Vista lateral del equipo de volteo utilizado. (b) Vista de barril cargado con muestras del ensayo de durabilidad.	42
Figura 2.5: Báscula de precisión Ohaus EX1103, Explorer de precisión de 1100 g x 1 mg.	42
Figura 2.6: Montaje de ensayo de resistencia a compresión.	43
Figura 2.7: Analizador de humedad OAHUS MB45.	44
Figura 2.8: Planos de cortes a realizar en las briquetas.	46
Figura 3.1: Gráfica del comportamiento de la temperatura media para distintas proporciones de biomasa.	55
Figura 3.2: Diagrama de Pareto estandarizada para la densidad aparente.	61
Figura 3.3: Gráfica de efectos principales para la densidad aparente.	62
Figura 3.4: Superficie de respuesta estimada para la densidad aparente.	62
Figura 3.5: Gráfica de los residuos para la densidad aparente.	63
Figura 3.6: Diagrama de Pareto estandarizado para la resistencia máxima a la compresión (kN).	67

Figura 3.7: Residuos estándar contra ajustes para la resistencia a compresión.....	68
Figura 3.8: Gráfica de efectos principales para la resistencia a compresión.	68
Figura 3.9: Superficie de respuesta para la resistencia a compresión.....	69
Figura 3.10: Diagrama de Pareto estandarizado para el Índice de Durabilidad (%)......	72
Figura 3.11: Gráfica de efectos principales para el Índice de Durabilidad (%)......	73
Figura 3.12: Superficie de respuesta para el Índice de Durabilidad (%) para un tiempo de compactación de 40 s.	73
Figura 3.13: Gráfica de los residuos contra ajuste para el Índice de Durabilidad (%).	74
Figura 3.14: Diagrama de Pareto para el módulo elástico (MPa).	77
Figura 3.15: Efectos principales para el módulo elástico (MPa).	78
Figura 3.16: Superficie de respuesta para el módulo elástico (MPa) para una proporción de mezcla fija de 50 % de cascarilla de arroz.	79
Figura 3.17: Superficie de respuesta para el módulo elástico (MPa) para un tiempo de compactación de 40 s.	79
Figura 3.18: Gráfico de los residuos contra ajuste para módulo Elástico (MPa).....	80
Figura 3.19: Microscopías ópticas en sentido transversal para briquetas con baja resistencia. Las figuras (a) y (b) corresponde a probetas CIIO; (c) y (d) corresponden a las probetas AIO; (e) y (f) son probetas CIO.	84
Figura 3.20: Microscopías ópticas en sentido transversal para briquetas con media resistencia. Las figuras (a) y (b) corresponde a probetas AIIIO; (c) y (d) corresponden a las probetas BIIO; (e) y (f) son probetas BIIX.....	85
Figura 3.21: Microscopías ópticas en sentido transversal para briquetas con alta resistencia. Las figuras (a) y (b) corresponde a probetas AIIX; (c) y (d) corresponden a las probetas CIIX; (e) y (f) son probetas AIIX.	86
Figura 3.22: Microscopías ópticas en sentido longitudinal para briquetas con baja resistencia. Las figuras (a) y (b) corresponde a probetas CIIO; (c) y (d) corresponden a las probetas AIO; (e) y (f) son probetas CIO.	87
Figura 3.23: Microscopías ópticas en sentido longitudinal para briquetas con media resistencia. Las figuras (a) y (b) corresponde a probetas AIIIO; (c) y (d) corresponden a las probetas BIIO; (e) y (f) son probetas BIIX.....	88
Figura 3.24: Microscopías ópticas en sentido longitudinal para briquetas con alta resistencia. Las figuras (a) y (b) corresponde a probetas AIIX; (c) y (d) corresponden a las probetas CIIX; (e) y (f) son probetas AIIX.	89

Figura 3.25: Enmallado del material compuesto que representa los tres tipos de briquetas modeladas. (a) AIO, (b) BIO, (c) CIO.....	97
Figura 3.26: Resultados para el esfuerzo equivalente máximo.....	102
Figura 3.27: Distribución de los esfuerzos para briqueta AIO en ángulos de impacto (a) 0°, (b) 45° y (c) 90°.....	104
Figura 3.28: Resultados para la deformación máxima.....	105
Figura 3.29: Resultados para la energía específica de deformación máxima.....	107
Figura 3.30: Montaje de condiciones de simulación del modelo a compresión.....	108
Figura 3.31: Distribución de los esfuerzos equivalentes de Von Mises en las briquetas sometidas a compresión.....	109

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1.1: Composición en porcentaje de peso de la planta de maíz [22].	12
Tabla 1.2: Residuos obtenidos del procesamiento de 1 kg de cereza de café [24].	13
Tabla 1.3: Poder calorífico y producción de los subproductos de la cosecha de café [24].	13
Tabla 1.4: Composición de la biomasa en la caña de azúcar [26].	14
Tabla 1.5: Especificaciones normativas sobre pellets y briquetas [34], [35].	19
Tabla 1.6: Composición estructural de distintas especies de Cascarilla de arroz.	23
Tabla 2.1: Codificación para la identificación de las variables.	39
Tabla 3.1: Resultados de las mediciones exploratorias de temperatura para tiempos de referencia de 20 y 40 segundos de calentamiento para las proporciones de 15 % y de 50 % de cascarilla de arroz en la mezcla.	54
Tabla 3.2: Resultados de las mediciones exploratorias de temperatura para tiempos de referencia a 60, 80, 100 segundos de calentamiento para las proporciones de 15 %, 30 % y 50 % de cascarilla de arroz en la mezcla.	55
Tabla 3.3: Tabla ANOVA para determinar el efecto de los tratamientos (proporción de biomasa) sobre la temperatura de calentamiento a 20 s.	56
Tabla 3.4: Tabla ANOVA para determinar el efecto de los tratamientos (proporción de biomasa) sobre la temperatura de calentamiento a 40 s.	56
Tabla 3.5: Tabla ANOVA para determinar el efecto de los tratamientos (proporción de biomasa) sobre la temperatura de calentamiento a 60 s.	57
Tabla 3.6: Tabla ANOVA para determinar el efecto de los tratamientos (proporción de biomasa) sobre la temperatura de calentamiento a 80 s.	57
Tabla 3.7: Tabla ANOVA para determinar el efecto de los tratamientos (proporción de biomasa) sobre la temperatura de calentamiento a 100 s.	57
Tabla 3.8: Efectos estimados para la densidad aparente (kg/m ³).	59

Tabla 3.9: Análisis de Varianza (ANOVA) para densidad aparente (kg/m^3).....	60
Tabla 3.10: Efectos estimados para la resistencia a compresión (kN).....	65
Tabla 3.11: Análisis de varianza para las resistencia a la compresión (kN).....	66
Tabla 3.12: Efectos estimados para el Índice de Durabilidad (%).	70
Tabla 3.13. Análisis de varianza para el Índice de Durabilidad (%).	71
Tabla 3.14: Efectos estimados para el módulo elástico (MPa).....	76
Tabla 3.15: Análisis de Varianza para el módulo elástico (MPa).	76
Tabla 3.16: Clasificación de los tratamientos considerados para las tomas de microscopía óptica.	81
Tabla 3.17: Resultados de coeficiente de Poisson para distintas briquetas.	92
Tabla 3.18: Resultados de cálculo de razón de cambio en la densidad de las briquetas y las densidades teóricas.	94
Tabla 3.19: Resultados de cálculo de la razón de cambio en la densidad de las briquetas y las densidades teóricas.	94
Tabla 3.20: Resultados de porcentaje de fibra para cada tipo de briqueta en modelo computacional.	95
Tabla 3.21: Diámetro equivalente de fibras de cascarilla de arroz para briquetas modelo.	96
Tabla 3.22: Resultados de propiedades mecánicas para distintos tipos de briqueta.	98
Tabla 3.23: Resultados para modelo del tipo de briqueta A.....	99
Tabla 3.24: Resultados para modelo del tipo de briqueta B.....	100
Tabla 3.25: Resultados para modelo del tipo de briqueta C.....	101
Tabla 3.26: Resultados para los esfuerzos equivalentes máximos y deformación equivalente máxima para el ensayo de compresión.	108

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
A	Área	m^2	$\iint dx dy$
A_{BET}	Área interna del sólido	$\frac{m^2}{g}$	ver DIN ISO 9277
A_g	Área transversal de la fase gaseosa	m^2	Ec. 3.2
A_s	Área transversal de la carga a granel	m^2	Ec. 3.6
a	Coeficiente	1	Tabla 3.1
alt	Altura de caída briqueta	m	Sección 2.3.2
C_{max}	Resistencia máxima a compresión	kN	Sección 2.3.3
D	Diámetro de briqueta	m	Sección 2.2.3
DU	Índice de Durabilidad	%	Sección 2.2.3
E	Módulo elástico	MPa	Sección 2.3.3
g	Aceleración de la gravedad	$m s^{-2}$	Sección 2.3.2
H_o	Hipótesis nula	adimensional	Sección 3.1
H_a	Hipótesis alternativa	adimensional	Sección 3.1
h, h_b	Altura de briquetas	m	Sección 2.2.3
L_f	Longitud de fibra	m	Sección 2.3.1
M_{ad}	Contenido de humedad	%	Sección 2.2.3
m_a	Masa de briquetas después de volteo	g	Sección 2.2.3
m_b	Masa de briqueta	g	Sección 2.3.1
m_e	Masa de briquetas tamizadas antes del volteo	g	Sección 2.2.3
P	Proporción de mezcla	adimensional	Sección 2.1.3
T	Temperatura	$^{\circ}C$	Sección 2.1.3
TC	Tiempo de Compactación	s	Sección 2.1.3

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
V	Volumen de Briquetas	m^3	$\frac{\pi D^2 h}{4}$
V_f	Velocidad final de caída, velocidad a un metro de impacto	$m\ s^{-1}$	Sección 2.3.2
V_i	Velocidad inicial de caída	$m\ s^{-1}$	Sección 2.3.2

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
α	Factor temperatura	$^{\circ}C$	Sección 3.2; Ec. (2.2)
β	Factor Tiempo de Compactación	s	Sección 2.1.5; Ec. (2.2)
γ	Factor Proporción de Mezcla	1	Sección 2.1.5; Ec. (2.2)
ρ_a	Densidad aparente	$\frac{kg}{m^3}$	Sección 2.2.3
ρ_b	Densidad de briqueta	$\frac{kg}{m^3}$	Sección 2.3.1
ε	Error aleatorio	1	Sección 2.1.5; Ec. (2.2)
ϕ_b	Diámetro briqueta modelo computacional	m	Sección 2.3.1
ϕ_f	Diámetro de fibra equivalente	m	Sección 2.3.1

Subíndices

Subíndice	Término
bm	Materia orgánica
DR	Dubinin-Radushkevich
E	Experimental

Superíndices

Superíndice	Término
n	Exponente, potencia

Abreviaturas

Abreviatura	Término
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (<i>American Society for Testing and Materials</i>)
DIN	Instituto Alemán de Normalización (<i>Deutsches Institut für Normung</i>)
ICA	Instituto Colombiano Agropecuario
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
UNE- EN-ISO	Una Norma Española- <i>European Norm-International Standardization Organization</i> . Normas AENOR que son estándares europeos y estándares internacionales
UPME	Unidad de Planificación Minero-Energética

Introducción

Las energías renovables y sustentables han tomado importancia dada la situación económica y ambiental que presentan las fuentes energéticas tradicionales, principalmente porque las reservas de hidrocarburos se agotan con el tiempo y adicionalmente presentan el problema que su uso incrementa la generación de sustancias que son nocivas para el medio ambiente y el hombre: gases de efecto invernadero, lluvia ácida, etc. De esta forma, se busca que las nuevas fuentes solventen parcialmente estos problemas y que además permitan sostener las condiciones de consumo energético actuales y las proyecciones futuras [1].

La biomasa se presenta como una de las fuentes energéticas renovables y sustentables alternativa a las fuentes fósiles tradicionales, dado que el concepto de biomasa considera que cualquier residuo o material de origen orgánico, principalmente vegetal [2], forma parte de la biomasa, por ende la leña y materiales que se han utilizado como fuentes de combustión, hacen parte de esta categoría; lo que convierte a la biomasa en una de las primeras fuentes de energía empleadas, puesto que desde las primeras etapas de la humanidad se ha utilizado para la combustión y generación de calor e incluso en la cocción de alimentos.

El desarrollo de nuevos procesos que intentan reaprovechar el material descartado o desechado como fuente energética, ha permitido evolucionar estos productos y hacer que sean ambientalmente sustentables. Algunos de estos procesos requieren que la biomasa en partículas o fibras logre estabilidad tanto mecánica como energética, el proceso principal de fabricación es la densificación, que consiste en compactar el material mediante presión mecánica para obtener productos que faciliten su manipulación, transporte, procesamiento y propiedades. Sin embargo, aunque existe alguna normatividad que describe de forma general las condiciones que se esperan de estos productos, el proceso para su elaboración

se encuentra influenciado por variables que deben controlarse para alcanzar las propiedades esperadas del producto densificado.

El efecto que tienen estas variables sobre el proceso en varios estudios, hace claro que es necesario no solo determinar la influencia sobre las propiedades y el proceso, sino que la correcta identificación y manejo de estas variables favorece otros aspectos de la fabricación. Pero el encontrar la influencia de las variables para el tipo de biomasa en específico, permite formular modelos que describan el comportamiento y puedan predecir el comportamiento de los productos densificados en procesos de densificación a gran escala.

Además de las consideraciones energéticas y físicas, también debe considerarse que su desarrollo y producción sea viable, es decir que los procesos de manufactura, manipulación, almacenamiento y transporte sean apropiados y satisfagan unos criterios que se encuentran consignados en distintas normas internacionales para briquetas, pero que igualmente, se puedan sustentar social, económica y ambientalmente [3], [4], [5].

Dentro de la gran variedad de fuentes de biomasa disponibles, están la cascarilla de arroz [6], [7], [8] y los residuos de la cosecha de maíz. La cascarilla de arroz destaca por su alta energía calórica, que puede aprovecharse y por su relativo buen porcentaje de lignina que actúa de aglutinante. Además de estas clases de biomasa, es importante resaltar que las principales fuentes de biomasa han sido las maderas. El desecho generado por distintos procesos de manufactura y producción industrial puede reutilizarse para usos energéticos, donde el aserrín, sobresale, especialmente, por ser una de las que mayor energía puede emplearse y que por sus características de composición (celulosa, hemicelulosa y lignina principalmente), suelen ser las que mejores características energéticas y de resistencia suelen brindar [9], [10].

Las anteriores características han hecho que basado en conceptos semejantes a los materiales compuestos (o blends), se busque obtener mejores propiedades a partir de la mezcla de dos materiales, siempre que las mezclas cumplan con determinada proporción y que no se presenten efectos de reacción de los materiales involucrados. Así, se espera que la mezcla de un material como la cascarilla de arroz y aserrín de una madera blanda, tenga aceptables condiciones de fabricación pero que a su vez la energía disponible por esta

biomasa densificada sea mayor que la que se cuenta simplemente con la cascarilla de arroz.

En Colombia, algunas investigaciones se han enfocado en la reutilización de tusa y cuesco de palma de aceite africana y de palma de coco, para crear materiales densificados [11]. En este caso, se fabricaron pellets a partir de los residuos lignocelulósicos y se caracterizó sus propiedades en especial la compactación y el poder calorífico inferior.

El uso de cascarilla de arroz con aserrín de pino en la fabricación de briquetas se muestra como alternativa a estudios desarrollados con anterioridad, ya que la mayoría de los que se han encontrado se enfocan en simplemente la cascarilla de arroz o con mezclas de residuos de maíz y en algunos casos material agroforestal. Teniendo en cuenta los aspectos que se han mencionado se han planteado como objetivo general para este proyecto de investigación: estudiar el efecto que las variables fundamentales del proceso de densificación tienen en las características mecánicas y físicas de briquetas obtenidas a partir de mezclas de aserrín de pino y cascarilla de arroz, y como objetivos específicos: estudiar los procesos de densificación para briquetas de biomasa de acuerdo a la normatividad vigente sobre producción de las mismas, formular y ejecutar un modelo estadístico experimental que permita analizar el comportamiento de las variables del proceso de densificación: proporción de mezcla de biomasa, contenido de humedad, temperatura, presión máxima y tiempo de compactación, sobre los indicadores de calidad mecánicos y físicos de las briquetas y finalmente, obtener un modelo por elementos finitos que permita describir el comportamiento mecánico de la briqueta con propiedades similares a las obtenidas por la vía experimental.

1. Capítulo 1: Antecedentes

Inicialmente, se hizo una recopilación de la información relacionada con el estudio de la biomasa, para la fabricación de briquetas que sirvan como combustible sólido. La revisión se enfocó en varios aspectos relacionados como los distintos tipos de biomasa disponible y su distribución en el país, con el fin de determinar la clase de biomasa y su disponibilidad de uso para garantizar la realización de este proyecto.

Al mismo tiempo, se revisaron algunos estudios desarrollados respecto al aprovechamiento de esta fuente de energía, y la normatividad existente asociada con las briquetas y la biomasa, a nivel nacional e internacional. Con lo anterior se buscó determinar los parámetros para la caracterización, siguiendo un procedimiento apropiado y justificado que asegure la repetitividad y estandarización de las propiedades de interés de las briquetas fabricadas. En la sección de antecedentes internacionales, se hizo énfasis en estudios con diferentes tipos de biomasa y los parámetros que permitieron comparar los resultados a nivel local.

1.1 Antecedentes nacionales

1.1.1 Residuos orgánicos en Colombia

Colombia cuenta con una de las biodiversidades más amplias y además muestra gran heterogeneidad en cuanto a ecosistemas a lo largo de su territorio. Esto favorece el hecho que se tenga gran potencial en cuanto a la producción de biomasa, tanto generada por procesos agroindustriales como de origen forestal o de otras fuentes.

Primero, vale la pena definir la biomasa para acotar los términos a los que se harán referencia a partir de este momento. Biomasa se considera toda la masa de material de

origen orgánico con potencial de ser convertido en energía. Generalmente producidos a partir de la transformación de forma natural o artificial de materia viva [12]. Se suponen recursos renovables ya que hacen parte del ciclo de los procesos naturales, así como se puede considerar sustentable en cuanto a que se cumpla la condición que sus fuentes (tasa de producción) y tasa de consumo, se encuentren como mínimo equilibradas; aunque se espera que su tasa de recuperación supere a la de consumo. Dado su origen, se considera que la composición sea principalmente rica en oxígeno, carbono e hidrógeno; sin embargo, se puede encontrar en su contenido elementos como azufre, nitrógeno, fósforo y otros elementos que modifican su composición y su comportamiento.

Las fuentes de este material pueden ser muy variadas, por lo que se suele categorizar las fuentes de biomasa de acuerdo a su origen; lo que hace que cada categoría tenga ciertas propiedades típicas, diferentes de las que se encuentran en otro tipo de fuente. Para esta clasificación se tiene en cuenta lo siguiente [13] [14]:

- Fuentes forestales: Provenientes de los bosques y principalmente incluye los elementos maderables. Es una de las biomásas más explotadas, sin embargo entre sus limitantes está: ser la encargada de fijar nitrógeno y CO₂, haciendo que su condición de ser sustentables pueda variar.
- Residuos agropecuarios: Son todos aquellos provenientes de la producción pecuaria. Puede encontrarse tanto de origen animal como vegetal. Su procesamiento difiere de acuerdo con las características ofrecidas por la biomasa.
- Residuos industriales: Producto de los residuos de un subprocesamiento de materiales, como las frutas, verduras o procesamiento de carnes y grasas.
- Residuos urbanos: de origen urbano, se refiere principalmente a biomasa tipo aguas negras y desechos sólidos de tipo doméstico.

Como se menciona, el tipo de biomasa puede subdividirse y catalogarse a conveniencia de los estudios y el enfoque que estos tienen. En este caso, la biomasa de mayor interés es la de origen vegetal, ya que es de acceso simple y que requiere un procesamiento muy sencillo para volverlo material de briquetas, siguiendo la clasificación de algunos autores, como la Unidad de Planificación Minero Energética (UPME) de Colombia [13], en cuanto a

las distintas aplicaciones de áreas de producción agrícola que se tienen en el país; lo que conlleva a que ciertos grupos como las fuentes forestales y agropecuarios se vean en algunos casos interrelacionados o reclasificados, y unidos en un mismo grupo de estudio:

- Cultivos transitorios: Son aquellos que presentan un periodo vegetativo o de cultivo menor a un año. Por ejemplo se tiene al arroz, maíz, caña, sorgo, papa, entre otros.
- Cultivos permanentes: Presentan una duración o ciclo productivo mayor a un año. En esta categoría entra la palma de aceite y los frutales.
- Plantación Forestal: Especies arbóreas para producción maderera (silvicultura). Si se asocia a producción ganadera (silvopastoril) y si está asociado a producción agrícola (silvoagrícola).
- Bosques naturales: Plantación forestal natural. Dependiendo de la región geográfica puede pertenecer a reservas forestales.

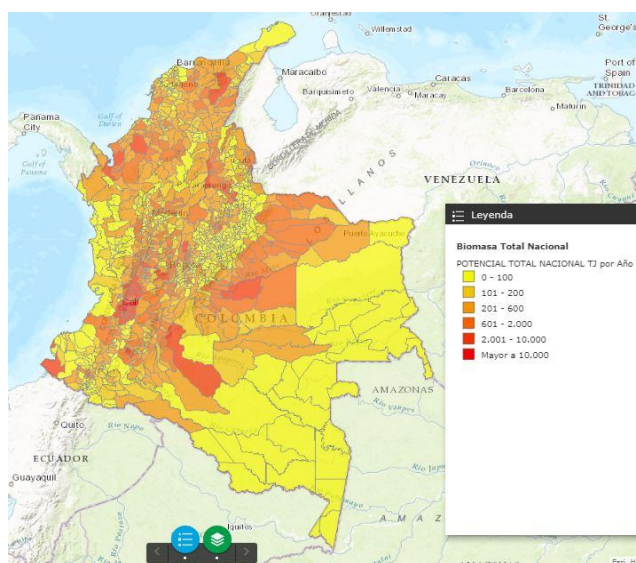
Se ha encontrado que los trabajos para identificar la situación de la biomasa en el país requieren grandes inversiones económicas y de tiempo. Esto hace que obtener una visión general de la situación agrícola en el momento sea difícil, dado que los estudios completos pueden tomar años en mostrar sus resultados. Organizaciones nacionales como Unidad de Planificación Minero-Energética (UPME), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) y varias federaciones agropecuarias del país, tratan de mantener al día la información del estado actual de las condiciones tanto de producción agrícola como de algunos subproductos. Lo anterior debe tenerse en cuenta al analizar la información, pues algunos datos pueden estar desactualizados. Sin embargo, la diferencia entre periodos de la información mostrada y la que se tiene a la fecha no difieren de forma apreciable. En informes de UPME, realizado para medir el potencial de biomasa a nivel agropecuario en 2003, se hace un estudio del tipo de biomasa vegetal más frecuente en el territorio de Colombia. Esta información se puede contrastar en otros estudios de años posteriores (2008), para ciertos cultivos de gran importancia en Colombia.

En el Anexo A se observa la gran biodiversidad presente en la producción de biomasa de origen agrícola. Debido a la diversidad disponible, es recomendable concentrarse en aquella que destaca por tener una mayor oferta en el país, esto es, considerar los cultivos

más representativos de la producción colombiana y que por ende producen la mayor cantidad de subproductos para su posible reaprovechamiento. Entre las revisiones posteriores [15], en conjunto con las encuestas nacionales agropecuarias para el año 2015 [16], se puede tener una idea de los productos agrícolas y su producción a nivel local.

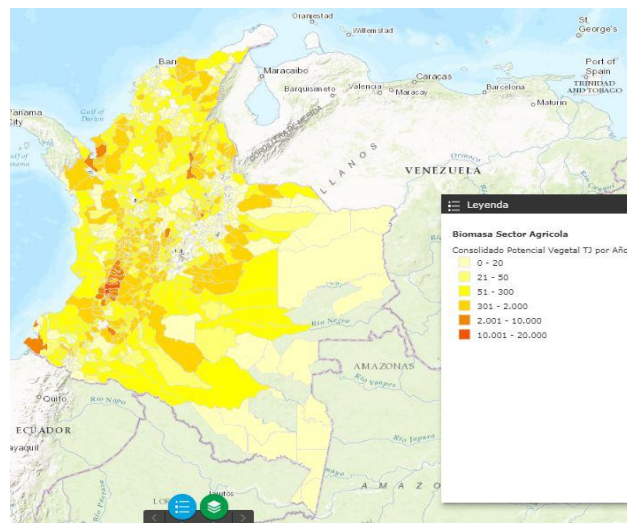
Del Anexo B, al comparar la información de los datos obtenidos en 2012 con los datos disponibles para 2015, debe resaltarse un aumento general de las áreas de producción y la producción misma, principalmente influenciado por factores como aumentos de población y apertura de mercados. De manera semejante se podría esperar que para aquellos cultivos, de los que no se encontró información más reciente, hayan tenido un comportamiento semejante. De forma análoga, un aumento en la cantidad de producción se puede asociar a una mayor generación de subproductos clasificados como biomasa. La cantidad de biomasa generada, tanto por producción agrícola, de origen animal y desechos urbanos, se puede ver reflejada en la Figura 1.1, donde la UPME muestra un mapa de densidad de la biomasa en el territorio nacional. La misma aplicación permite discriminar el mismo mapa solo enfocado en la producción de origen agrícola (ver Figura 1.2).

Figura 1.1: Mapa de la distribución de biomasa residual total en Colombia [17] [18].



Fuente: Unidad de Planificación Minero Energética (UPME), 2017
UPME, Ideam, Colciencias, UIS, 2009.

Figura 1.2: Mapa de distribución de biomasa de origen agrícola [17] [18].

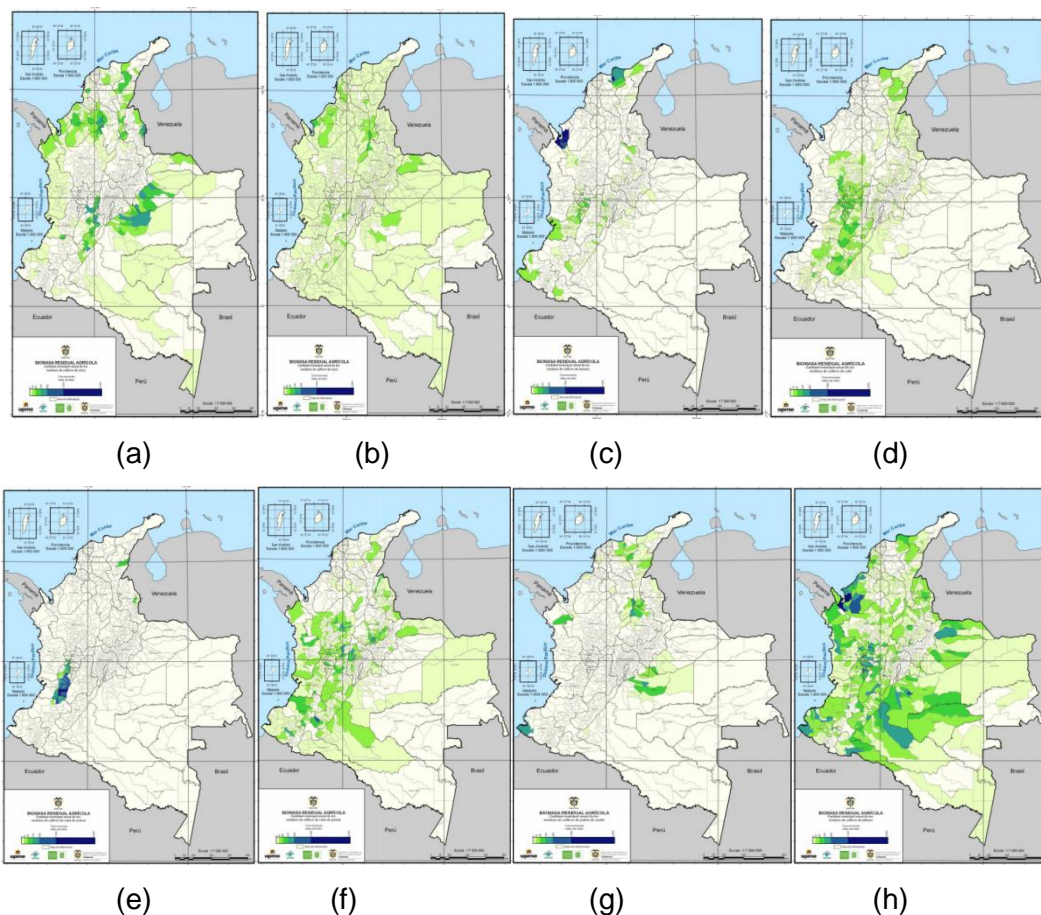


Fuente: Unidad de Planificación Minero Energética (UPME), 2017
UPME, Ideam, Colciencias, UIS, 2009.

1.1.2 Distribución de principales fuentes de biomasa

Según el reporte de [18], se distinguen regiones donde se genera mayor producción de biomasa; predominando la región andina (centro), la costa pacífica y la costa atlántica. Esto claramente está influenciado por ser las regiones de mayor producción agrícola para distintos productos de consumo local y en algunos casos para exportación. Se observa que en la zona central (región Andina), entre los productos de biomasa residual de importancia está el arroz (cascarilla de arroz), maíz, café y con relativa cercanía se puede tener acceso a lo que son biomasa de palma de aceite y plátano. Estos productos pueden considerarse para la elaboración de las briquetas, de acuerdo a su distribución geográfica y de producción (ver Figura 1.3).

Figura 1.3: Producción en ton/año de cultivos principales en Colombia para (a) Arroz, (b) Maíz, (c) Banano, (d) Café, (e) Caña de Azúcar, (f) Caña panelera, (g) Palma de aceite, (h) Plátano [18].



Fuente: UPME, Ideam, Colciencias, UIS, 2009.

Habiendo determinado algunas de las fuentes de biomasa agrícola más importantes, su caracterización permite obtener mejores criterios de selección en cuanto a las opciones que se presentan para el material con el que se proyecta la fabricación de briquetas. A continuación se hace mención de las propiedades encontradas en algunas de las fuentes más comunes de biomasa utilizadas en estudios anteriores para este fin:

- Arroz: En la producción de arroz se distinguen prácticamente dos formas de cultivo: el arroz paddy (cascarilla) verde y por procesamiento industrial con secado, descascarillado

y pulimiento. En Colombia se ha dado un fenómeno de reducción en las zonas cultivadas, pero una mejora en los rendimientos que compensa este fenómeno. En general la estructura del grano, perteneciente a las gramíneas, consta de cuatro componentes: el germen, que constituye la más nutritiva y le da el crecimiento al grano; el endospermo que es el de mayor volumen (70 %) del grano y es el conocido arroz blanco; cutícula o polvillo (6,8 %) que se aprovecha como alimento animal por su alto contenido de grasa; y la cascara o pajilla (20 % del peso del grano), que como tal es el subproducto que se busca reaprovechar. Su composición típica puede estar en los siguientes rangos: material volátil: 51,98 – 67,7 %, carbono fijo: 12,4 – 25,10 % y ceniza: 16,92 – 24,6 %. En Colombia se ha identificado que, en general, estas composiciones se mantienen dentro de los rangos encontrados a nivel global: material y volátil 65,47 %, carbono fijo 16,67 % y cenizas 17,89 % respectivamente [19].

Cuando se incinera para reducir los volúmenes se producen humos contaminantes. Se ha determinado su poder calorífico en 16720 kJ/kg, sin embargo en combustión directa apenas es de 13000 kJ/kg debido a su alto contenido de sílice. Su poder calorífico está asociado con la humedad en una relación inversamente proporcional. Su composición de cenizas muestra un alto contenido de sílice (90 %), con impurezas del tipo: calcio, potasio, magnesio y manganeso y como secundarias aluminio y hierro (10-20 ppm) y boro y fósforo (1-40 ppm) [20]. El sílice hace que su uso como alimento animal sea desestimado, mientras que el alto contenido de celulosa hace factible su combustión [19].

Se caracteriza también por ser altamente abrasivo, de 6 en la escala de Mohs, y alta porosidad que lo hace atractivo también como aislante térmico (con una conductividad de 0.036 W/(m · K)). Pese a esto es un material bastante ignífugo donde sus propiedades físico-químicas (como la composición de cenizas y la liberación de compuestos volátiles [19]) se ven afectadas por encima de 750 °C [20] [21].

Pese a su uso poco recomendado en generadores de vapor eléctricos, sus ventajas productivas (de disponibilidad), físicas, energéticas y ambientales la muestran como una alternativa económica viable para generación energética [21].

- Maíz: En general se encuentra que para los cultivos de maíz se produce gran cantidad de biomasa, aprovechándose como alimento solo cerca del 50 % en forma de

grano (ver Tabla 1-1). Los demás residuos se aprovechan para otros usos debido a su diferente contenido alimenticio (porcentaje de proteína y grado de digestibilidad, por ejemplo para alimentar ganado) [22].

Tabla 1.1: Composición en porcentaje de peso de la planta de maíz [22].

Componente	Porcentaje de peso seco del maíz (%)
Panoja	12,0
Tallos	17,6
Chala (envoltura)	8,9
Total Caña	38,5
Mazorca (tusa)	11,8
Grano	49,7
Total espiga	61,5

Fuente: Pasturas de América, 2016.

En el análisis de composición de la planta de maíz, se ha encontrado que hay concentraciones importantes de hemicelulosa en las paredes de las hojas del maíz. Algunos análisis de los residuos secos muestran una composición de holo-celulosa (78,86 %), α -celulosa (43,14 %), lignina (23,00 %) y cenizas (0,761 %).

- **Café:** Se estima que de la producción total de café, solo el 5 % es aprovechado como bebida o alimento mientras que el restante representa otro tipo de residuos orgánicos que se desechan y podrían ser empleados. Por lo tanto, diversas organizaciones, entre las que se cuenta la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, en especial el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé), han promovido diversas prácticas para encargarse de estos materiales. El enfoque que se le ha dado para su reaprovechamiento es como abono y en prácticas para minimizar el desperdicio de agua durante todo el procesamiento de las cerezas de café [23]. Sin embargo, las ideas de reutilizar este material como fuente energética no son nuevas. Al respecto, Cenicafé ha planteado posibles aplicaciones como fuente de energía renovable [24]: Desde la utilización directa como quema de los distintos subproductos del café, hasta reutilizarlo en procesos de obtención de bioetanol o biodiesel. La Tabla 1.2 muestra el análisis de todos los subproductos generados sólo en el procesamiento de las cerezas de café y donde se observa el gran potencial como fuente de biomasa para usos energéticos.

Tabla 1.2: Residuos obtenidos del procesamiento de 1 kg de cereza de café [24].

Proceso	Residuo obtenido	Pérdida (g)
Despulpado	Pulpa fresca	436
Desmucilaginado	Mucílago	149
Secado	Agua	171
Trilla	Pergamino	42
	Película plateada	
Torrefacción	Volátiles	22
Preparación bebida	Borra	104
Total		924

Fuente: Rodríguez Valencia & Zambrano Franco, 2010.

Además de observar como el café es una importante fuente de biomasa, también es relevante observar que la energía disponible es significativa en las diferentes formas de biomasa en los subproductos del proceso de cosecha del café. Se considera que los distintos subproductos poseen diferentes métodos de aprovechamiento, y por ende la capacidad calorífica varía según los procesos de transformación requeridos, igualmente se debe señalar, que la forma sólida es la que suele presentar mayor poder calorífico y que casi todos los subproductos pueden utilizarse en esta forma (Tabla 1-3).

Tabla 1.3: Poder calorífico y producción de los subproductos de la cosecha de café [24].

Subproducto	Poder calorífico (MJ/kg)	Estado	Producción (kg/ha año)
Pulpa	15,88	Combustible sólido	2258
	0,54	Combustible gaseoso, biogás	
	0,53	Combustible líquido, bioetanol	
Mucílago	2,00	Combustible gaseoso, biogás	768
	1,23	Combustible líquido, bioetanol	
Cisco	17,90	Combustible sólido	227
Borra	29,01	Combustible sólido	22 300 ton/año
	5,90	Combustible gaseoso, biogás	
	4,38	Combustible líquido, bioetanol	
	5,76	Combustible líquido, biodiesel	
Ripios	15,60	Combustible sólido	Sin datos
	3,46	Combustible líquido, biodiesel	
Tallos	19,75	Combustible sólido	3200

Fuente: Rodríguez Valencia & Zambrano Franco, 2010.

- Caña azucarera: Finalmente, otra fuente de biomasa de la que se tiene buena disponibilidad es la caña azucarera. La cosecha de esta suele darse por dos metodologías principalmente: quemando la caña para reducir la materia extra a la caña y facilitar el proceso de los cortadores, donde el residuo en campo es del 16 % o mediante corte en verde o a la caña cruda, donde se desperdicia entre un 20 – 25 % de residuos de caña en los campos [25].

El uso de estos residuos tiene uno de tres destinos posibles: a) se reincorpora a la plantación para mejorar la materia orgánica del suelo; b) se utiliza como alimento para ganado; c) se usa como base para la extracción de residuos energéticos, es decir como biomasa. En general la distribución de los residuos se puede describir como aparece en la Tabla 1-4:

Tabla 1.4: Composición de la biomasa en la caña de azúcar [26].

Componente	Porcentaje (%)
Cogollo	15,8
Paja Suelta	1,1
Paja adherida	8,8
Subtotal	25,7
Tallos móviles	74,3
Total	100

Fuente: Valdés Delgado.

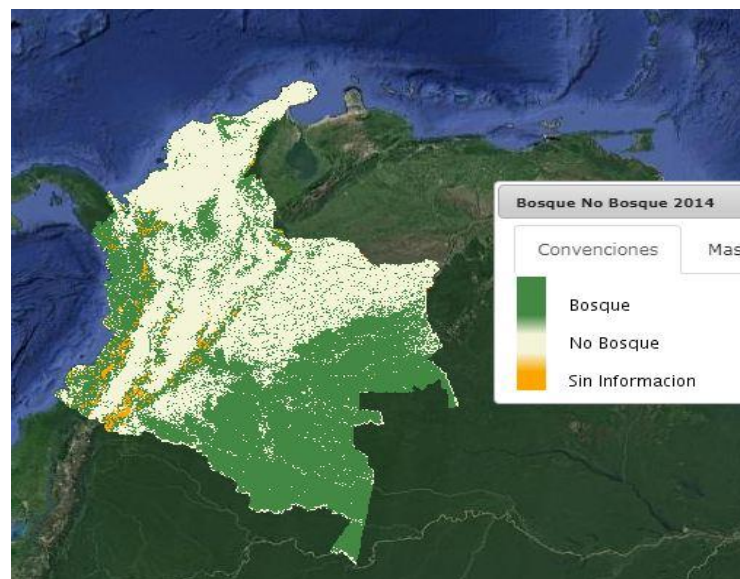
1.1.3 Recursos forestales

Debido a que el contenido de lignina (molécula que actúa como aglutinante) en especies agrícolas y herbáceas es relativamente bajo, se considera conveniente emplear mezclas con otras especies de tipo forestal en forma de aserrín o polvo de maderas duras, ya que su contenido lignocelulósico es mucho mayor y favorece las propiedades de aglutinamiento de las briquetas [20]. Pero también debe considerarse la facilidad que brinda el material para su fabricación, así que se puede considerar la posibilidad de utilizar una madera que provea las características suficientes en cuanto a poder energético y facilidad de formación de briquetas. La madera blanda puede proveer las características buscadas.

Considerando que se requiere de una fuente de biomasa leñosa, también vale la pena revisar las fuentes de biomasa importantes como son las fuentes forestales, principalmente los bosques que permiten la explotación de madera. Este grupo de biomasa es significativo, ya que usualmente, los materiales leñosos son los que presentan mayor concentración de lignina en su composición [9]. Una mayor concentración de lignina implica, en general, mejores propiedades mecánicas [27] y energéticas de las briquetas obtenidas a partir de esta.

En la Figura 1.4 se observa la distribución de bosques en el país [28]. Cabe destacar que en esta imagen se considera tanto zonas explotables como no explotables (reservas naturales). En general, la biomasa de fuente forestal se muestra como una oportunidad industrial por la producción principalmente de distintos productos de madera. Dentro de las regiones de interés como zonas forestales explotables está la delimitada por la Organización Internacional de Maderas Tropicales (OIMT), que delimita una sección de Tolima grande, Eje cafetero y el Sur occidente Colombiano. Incluye los departamentos de Caldas, Cauca, Huila, Nariño, Quindío, Risaralda, Tolima y Valle del Cauca [29].

Figura 1.4: Distribución de bosques en Colombia [28].



Fuente: IDEAM, 2016.

La diversidad forestal en el país es muy alta. Sin embargo, algunas especies son particularmente preferidas para su uso en la fabricación de artículos comerciales. Este tipo de madera de mayor consumo se vuelve interesante, pues asociado a su transformación está la biomasa de origen forestal como subproducto de la fabricación de muebles.

Algunas de las maderas que se pueden mostrar como atractivas son [29]:

- Abarco (*Cariniana pyriformis* Miers).
- Aceite de María (*Calophyllum mariae* Tr. et Pl.).
- Aliso (*Alnus acuminata* ssp. *Acuminata* H.B.K.).
- Caoba (*Swietenia macrophylla* King.).
- Caucho (*Hevea brasiliensis* Muell Arg.).
- Cedro (*Cedrela odorata* M. J. Roem).
- Cedro Negro (*Juglans neotropica* Diels).
- Ceiba (*Bombacopsis quinata* (Jacq.) Dugand).
- Chingale (*Jacarnda copaia* (Aubl.)D. Don).
- Eucalipto (*Eucalyptus grandis/saligna*).
- Guadua (*Guadua angustifolia* Kunth).
- Laurel (*Cordia alliodora* (Ruiz y Pavon) Oken.).
- Melina (*Gmelina arborea* Roxb.).
- Pino (*Podocarpus oleifolius*).
- Roble (*Tabebuia rosea* (Bertol.)).
- Tambor (*Schizolobium parahybum* (Vell.) S.F. Blake).
- Tangare (*Carapa guianensis* Aubl.).
- Teca (*Tectona grandis* Lineo).

Una de las opciones que se consideraron para el proyecto fue la madera de Roble, un árbol grande, 20 a 35 m de altura y hasta 60 cm de diámetro; fuste comercial corto e irregular, hasta de 15 m libre de ramas, sin aletones o con estos pero pobremente desarrollados, equiláteros. Corteza externa de color castaño grisáceo a café oscuro, gruesa, 5 a 10 mm de espesor, con lenticelas escasas y poco conspicuas. Corteza interna blanda, de color crema o amarillo claro que se desprende en tiras largas [29]. Se trata de una madera pesada y catalogada como semi-dura, por sus propiedades utilizado en la fabricación de muebles,

molduras, chapas y tableros. Tiene una densidad básica de $0,54 \text{ g/cm}^3$ cuando posee una humedad del 12 %.

La otra opción disponible considerada fue la madera de Pino que es el nombre común que se da a algunas especies como el Pino Hayuelo o Pino Romerón (*Retrophyllum rospigliosii*) y el Pino Colombiano (*Podocarpus oleifolius*), ambas especies se encuentran en Colombia y se utilizan en la industria de la ebanistería, para la construcción y su pulpa es utilizada en fabricación de papel. Crece de 20 a 35 m de altura, se encuentra principalmente desde los 1900 m.s.n.m hasta los 3800 m.s.n.m. [30]. Se trata de una madera entre liviana a pesada, de moderada durabilidad y colores marrón oscuro, con facilidad de trabajo. Su densidad está entre $0,4 - 0,6 \text{ g/cm}^3$ [31].

1.1.4 Trabajos nacionales previos

Se revisaron los trabajos que se han desarrollado a nivel local con materiales similares así como el alcance que estos han tenido. Uno de los principales trabajos en los que se ha sustentado esta investigación es la Tesis de Maestría de Cabrales [32]. Este trabajo se enfocó en la caracterización mecánica de briquetas fabricadas con biomasa de tusa de palma de aceite africana, donde los resultados mostraron la viabilidad de desarrollar productos de este tipo usando la materia disponible en el país; y el potencial de reaprovechamiento de otras fuentes de biomasa.

Otro de los trabajos relacionados con el tema de la biomasa fue el desarrollado para pellets con una mezcla de carbón bituminoso y madera residual [33], donde se evaluaron fuentes de biomasa que son de fácil obtención a nivel local como es el carbón y los desechos madereros en el país. El trabajo desarrollado por los Ingenieros Atuesta y Sierra, se centró en revisar una mezcla en porcentajes específicos midiendo tanto propiedades químicas, energéticas y físicas, principalmente resistencia al impacto. Los resultados mostraron mejoras en cuanto al poder calorífico, como se esperaba al utilizar carbón, pero con resultados pobres respecto a nivel ambiental con residuos muy por encima de los que indica la norma para biomasa, en parte debido a la baja calidad del carbón utilizado.

De igual manera, dentro de esta misma línea de investigación, un estudio hecho con biomasa de palma de aceite y palma de coco [11], para determinar el efecto de las variables: tamaño de partícula, la proporción de mezcla y el origen, en cuanto a la parte de

la planta de donde se extrajo la biomasa, sobre las propiedades energéticas y la densidad, mostró que la composición de igual proporción de ambos tipos de fibra brindaba las mejores propiedades tanto energéticas como mecánicas.

1.2 Antecedentes internacionales

1.2.1 Normas asociadas a la caracterización y producción de biomasa

El desarrollo de energías renovables no es nuevo, se busca que estas cubran los requerimientos de las fuentes convencionales actuales de energía, pero además que su efecto sea positivo para el medio ambiente, lo que ha promovido que surjan criterios para evaluar sus características y garantizar que su comportamiento sea justificado y acorde a las necesidades energéticas, ambientales y sociales. Estas normas, además, permiten sustentar que un trabajo sea repetible y asegure resultados mediante estándares que se ajustan a condiciones dispuestas por un ente de control, específico para cada país.

En la revisión realizada se ha encontrado una deficiencia en cuanto a normatividad general respecto a la clasificación de biomasa para la región de América. Algunas de las normas en América que se acercan al tema están enfocadas en determinar la composición o elementos presentes en la biomasa. Entre estas se tiene por ejemplo la ASTM E1755-01 que corresponde al estándar para medir ceniza en biomasa. En ASTM E1756-08, se enfoca en determinar la existencia de sólidos en biomasa, posterior a procesos de secado. La ASTM E1757-01 que abarca los estándares para preparar la biomasa para análisis de composición. Aunque también se contaba con normas para definir terminología relacionada con la biomasa (ASTM E1126-94a) y para determinar la energía calórica (ASTM E711-87), estas están retiradas por el momento, la primera desde el 2003 y la segunda desde 2011.

Al examinar varios estudios que se han desarrollado en torno al tema de la biomasa, se hace mención usualmente a normatividad Europea en distintos países. Las principales normas en las que se basan los estudios sobre biomasa se muestran en la Tabla 1-5 [34].

La DIN 51731, norma alemana, trata sobre los estándares de fabricación de pellets y briquetas. En Suiza, colaborando con la Unión Europea, se desarrolló la SN 166000, norma con énfasis en estándares de pellets, muy semejante a la antecesora, la DIN 51731. También vale la pena señalar la norma ÖNORM M7135, de origen austriaco, la cual establece los requisitos y especificaciones para la fabricación de pellets y briquetas de madera. Esta norma se apoya en otras normas como ÖNORM M 7136, enfocadas en el aseguramiento de la calidad en cuanto a logística, transporte y almacenamiento de pellets de madera; esta norma, también da los requisitos para el almacenamiento de pellets de madera por el consumidor final [32].

En la Tabla 1.5 se resumen algunas de las especificaciones principales que se describen en varias de las normas mencionadas anteriormente. En la tabla, los valores de la resistencia a la abrasión corresponden a los valores complementarios del índice de durabilidad.

Tabla 1.5: Especificaciones normativas sobre pellets y briquetas [34], [35].

Parámetro	Unidad de medida	DIN 51731	DINEN 15270	ÖNORM M7135
Diámetro	mm	4 – 10	4 – 10	4 – 10
Longitud	mm	< 5 D	< 5 D	< 5 D
Poder calorífico	MJ/kg	17,5 – 19,5	18	18
Poder calorífico	kW/kg	4,7 – 5,3	5,0	5,0
Resistencia a la abrasión	%	3,0	< 2,3	< 2,3
Peso específico	kg/dm ³	> 1,0 – 1,4	> 1,12	> 1,12
Porcentaje de ceniza	%	< 1,5	< 0,5	< 0,5
Humedad residual	%	< 12	< 10	< 10
Porcentaje de S	%	< 0,08	< 0,04	< 0,04
Porcentaje de Cl	%	< 0,03	< 0,02	< 0,02
Porcentaje de N	%	< 0,30	< 0,30	< 0,30
Control externo		No	Si	Si
Aditivos a presión	%	No	< 2	< 2

Fuente: Adaptado de Pelletshome, s.f.

Adaptado de DINEN 15270.

Finalmente, se puede mencionar las normas de la Unión Europea ISO (traducidas en español), UNE-EN ISO17831, para pellets (-1) y para briquetas (-2), las cuales se enfocan en la determinación de durabilidad mecánica de pellets y briquetas. A estas normas se le adjuntan otras normas, para sustentar la caracterización de la biomasa [36], que se enfocan

en su contenido de humedad (UNE-EN ISO18134) y determinación del poder calorífico (UNE-EN ISO14918).

1.2.2 Trabajos previos a nivel internacional

La idea de reaprovechar y de utilizar el máximo posible de cada fuente energética se hace cada vez más presente en la investigación sobre biomasa a nivel mundial. Aunque es clara la gran variedad de biomasa que se ha utilizado en diversos estudios, se puede evidenciar que en el caso de las briquetas algunos tipos de biomasa son más frecuentes que otros, dadas sus propiedades ya conocidas. Este es el caso de la cascarilla de arroz [37], los residuos de maíz [38] y algunas especies de pastos largos (*switchgrass*) [39], principalmente por ser cultivos agrícolas fundamentales en potencias mundiales como Estados Unidos, China o países de la Unión Europea. Las biomásas han sido estudiadas independientemente o en mezclas, donde se destacan especialmente los estudios sobre las propiedades de materiales con alto contenido lignocelulósico, los cuales han mostrado las mejores características físicas y de potencial energético, dando la posibilidad de obtener productos con características mejoradas por las propiedades de ambas fuentes de biomasa. Ejemplo de esto es el estudio realizado con una mezcla biomasa de origen agropecuario con forestal, como eucalipto [40] y otras especies de árboles de diferente origen y propiedades (maderas duras o blandas) [41] [42].

Por otra parte, también resaltan algunos casos donde se utilizan cultivos específicos, como el de la papa [43], cuyos resultados demostraron el gran potencial que un tipo de biomasa poco usual puede ofrecer, pese al problema que representa la alta humedad, el poder energético, la composición de cenizas y la densidad aparente del material a estudiar, permitieron concluir la viabilidad de esta fuente de biomasa para uso industrial en la fabricación de briquetas. Resultados similares se han obtenido al utilizar biomasa de especies autóctonas como las briquetas elaboradas con una mezcla de polvo de *Neem* y aserrín [44] o distintos tipos de macrófitos del lago Nansi [45].

En general se observó una tendencia en los resultados reportados en estos estudios. La mayoría, basados en los estándares de Europa, buscaban medir propiedades críticas como la resistencia al impacto y la densidad del material densificado, así como el contenido de

humedad. No obstante, en algunos casos, también se estudiaron factores como la concentración de componentes, importante para determinar las emisiones durante procesos de combustión, así como el poder calorífico, una de las variables más importantes para determinar la viabilidad técnico-económica de la biomasa densificada. Las variables de control fueron diferentes para los casos analizados, ya que consideraba lo que el investigador estuviera dispuesto a cambiar de acuerdo con sus objetivos. Entre las distintas variables experimentales que se identificaron estaban: tamaño de partícula, composición de mezcla (de existir mezcla), temperatura de compactación, presión de compactación, la humedad del material (que en la mayoría de los casos más que controlarse solo se tenía en cuenta para ver su efecto), la densidad obtenida, la fuente de la biomasa (origen geográfico o de la morfología de la especie), entre otras.

1.3 Características de las Biomosas

Como se ha mencionado anteriormente, de las distintas opciones de biomasa disponible para la mezcla con la cual se fabrican las briquetas se ha seleccionado la cascarilla de arroz y aserrín de pino. El primer criterio de selección de biomasa fue la facilidad de su obtención tanto por el costo, al tratarse de residuos que se suelen desechar, como por la disponibilidad en la región. Esta disponibilidad en la región también hace posible que ambos tipos de biomasa puedan utilizarse en regiones más distantes, donde se da la producción de estos materiales y que suelen presentar problemas para obtener conexiones con las redes eléctricas, siendo un modo de poder obtener energía en estas zonas. También se tuvo en cuenta las propiedades previamente estudiadas, las cuales si bien muchas de las características físicas se dan por el proceso de densificación y la estructura que las briquetas adquieren en el proceso, las propiedades y características obtenidas están soportadas por su composición química, la microestructura que componen cada tipo de biomasa, los procesos de fabricación, así como transformación en los procesos a los que se somete el material. Dichas propiedades y características influyen el comportamiento de las briquetas fabricadas a partir de la mezcla ya que actúan de forma semejante a un material compuesto.

Por lo anterior, se debe describir las propiedades de la cascarilla de arroz y del aserrín de pino para poder analizar su efecto sobre las propiedades obtenidas en las variables definidas en la investigación. Respecto a la cascarilla de arroz, es uno de los tipos de

biomasa más estudiado para procesos relacionados con energías renovables tanto en procesos de gasificación como combustible en maquinaria, dentro de las mismas arroceras, pese a la baja eficiencia obtenida debido a la baja densidad y a la alta generación de cenizas por la combustión incompleta [46] y su alto contenido de ceniza. Otra forma de aprovechar la cascarilla de arroz es mediante la gasificación, en esta se calienta la biomasa cerca de 800 °C, ya que sobre estos valores el sílice de la cascarilla afecta las reacciones haciendo que no se pueda recuperar todo el carbono de la biomasa al encapsularlo [21], dicho gas se debe procesar y sintetizar para obtener la calidad necesaria y poderlo utilizar en otros equipos como motores o turbinas de gas.

Dado lo anterior y su origen como un residuo vegetal, su composición elemental se basa en carbono (39,1 %), oxígeno (37,2 %) e hidrógeno (5,2 %), además como se ha comentado, uno de sus grandes problemas es la alta cantidad de ceniza con un 17,8 %, otros componentes presentes son el nitrógeno (0,6 %) y el azufre (0,1 %) [47]. De las cenizas encontradas en la cascarilla de arroz, la mayor parte corresponde a dióxido de silicio (SiO_2) con proporciones entre 94,1 % y 96,51 %, seguido de óxidos de potasio (K_2O) entre 1,10 % y 2,10 %. También se encuentran partes menores de sulfatos (SO_4) 0,06% - 1,13 %, óxido de sodio (Na_2O) 0,11 % - 0,78 % y óxido de calcio (CaO) 0,25 % - 0,55 % o de óxido de magnesio (MgO) 0,23 % - 0,95 % [19], [47].

Las estructuras y moléculas químicas que conforman la cascarilla de arroz, también brindan información sobre la composición y permite describir características de este tipo de biomasa. En general la cascarilla se conforma de celulosa, hemicelulosa y lignina, su proporción y cantidad se verán afectadas por aspectos como la variedad de origen del arroz o la localización y tipo de terreno del cultivo. Arias y Meneses [46] presentan dicha variación mostrando la comparación de los resultados entre su investigación y otros estudios como el de Valverde, Sarria y Monteagudo [19], cuyo análisis tiene en cuenta especies de Colombia, Canadá y Nicaragua. En la Tabla 1.6 se muestran los valores obtenidos de los análisis de composición química de diferentes estudios respecto a los componentes estructurales de la cascarilla de arroz.

Tabla 1.6: Composición estructural de distintas especies de Cascarilla de arroz.

Parámetro	Colombia [19]	Canadá [19]	Nicaragua [46]
Celulosa	39,05 %	25,89 % – 35,50 %	36,03 %
Hemicelulosa	27,06 %	18,10 % – 21,35 %	45,48 %
Lignina	22,80 %	18,20 % – 24,60 %	18,49 %
Otros (Proteínas, Extracto no Nitrogenado, Extracto con éter)	11,09 %	-	-

Fuente: Adaptado de Valverde, A.; Bienvenido, S y Monteagudo, 2007

Adaptado de Arias, R y Meneses, J, 2016.

De lo anterior se observa una mayor presencia de celulosa, en general en forma de fibra, se trata de largas cadenas estructuradas a partir de subunidades de D-glucosa y unidas por enlaces β -1, 4 glucosídicos, las cuales pueden presentarse de forma amorfa o alto grado de cristalinidad. Las cadenas se unen mediante puentes de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals [46]. Además se sabe que su proporción está relacionada con la combustión del material [19].

En segundo lugar está la hemicelulosa, un compuesto amorfo a base de polisacáridos e hidrato de carbono que se compone de diferentes polímeros como pentosas, hexosas y ácidos de azúcar unidos por medios de cadenas cortas [46], la cual se distribuye dentro de la celulosa. La hemicelulosa actúa como intermediario entre celulosa y lignina.

Finalmente la lignina es una molécula compleja, heterogénea, ramificada, de base aromática amorfa, cuyas unidades no se repiten definitivamente, sin embargo se ha encontrado que se forma básicamente de moléculas de fenilpropano (hidroxiben, aldehído, siringal) [46] que se enlazan por diferentes tipos de enlaces. Se encuentra principalmente en las paredes celulares; además, da soporte, resistencia e impermeabilidad a las estructuras vegetales. Una de sus propiedades más interesantes es que alcanza una temperatura de transición vítrea entre los 135 °C y 190 °C, siendo valores que dependen de la humedad presente [19], [47], esta temperatura es alrededor de la cual el comportamiento pasa de ser frágil a plástico y que da una idea sobre la propiedad aglomerante de este componente para el material.

Respecto al aserrín, una de las características físicas que lo describe es el tamaño de partícula. Algunos autores las clasifican entre aserrín y viruta de pino de acuerdo a un

tamaño medio de la partícula que se encuentra, Gayosso-Rodríguez, Villanueva-Couoh *et al.* [48], utilizan un tamaño medio de 2 mm máximo para clasificar el aserrín de pino y un tamaño de entre 5 mm y 10 mm máximo para clasificarlo como viruta de pino.

Respecto a la composición química, también se trata de un material vegetal, por lo que las macromoléculas presentes son principalmente: celulosa, hemicelulosa y lignina. Dicha composición, depende entre muchas características, de la especie y la localización u origen del pino. Algunos de los resultados de los análisis se dan en valores de lignina y holocelulosa, mientras que otros consideran la lignina y la celulosa.

La holocelulosa es la fracción total carbonada de la madera, por lo que incluye tanto celulosa como hemicelulosa. A partir de la holocelulosa, se puede obtener α -celulosa que es la celulosa insoluble, como β -celulosa y γ -celulosa que son celulosas solubles y son las que corresponden a la hemicelulosa.

Fonseca Maldonado [49], obtuvo valores de celulosa entre 46 % y 59 % así como valores de lignina entre 22 % y 34 %. Dicho estudio analizó si se presentaban diferencias en la composición de la madera al tomar muestras de diferentes secciones del árbol. A sí mismo, Bernabé-Santiago, Ávila-Calderón y Rutiaga-Quiñones [50], analizaron los componentes químicos de distintas variedades de pino, reportando valores de holocelulosa de entre 68,1 % y 74,7 %, y de lignina entre 24 % y 28,5 %. Los valores hallados se encuentran entre los rangos teóricos, y permiten inferir que los valores tanto de holocelulosa como lignina para las diferentes variedades no difieren significativamente, y tampoco difieren significativamente de la parte del árbol de donde se tome el material.

El análisis de los dos tipos de biomasa (cascarilla de arroz y aserrín de pino) muestra una proporción de lignina muy similar, con valores entre el 22 % y 24 %. En cuanto a los niveles de celulosa, la cascarilla de arroz presenta valores menores entre 10 % y 20 %, lo cual podría llegar a tener un efecto sobre la mezcla de estos tipos de biomasa. Otro elemento que puede incidir es el tamaño de partícula y su distribución en la briqueta, pues mientras la cascarilla presenta tamaños de 3 a 6 mm, el aserrín de pino no suele tener tamaños mayores a los 2 mm.

2. Capítulo 2: Materiales y métodos

2.1 Diseño experimental

El diseño experimental permite plantear, identificar y organizar de manera lógica y sencilla las condiciones y procedimientos a desarrollar posteriormente en una investigación, de tal manera que sea posible caracterizar un proceso que recién se está estudiando u optimizar un proceso ya existente y definido. Para esto es necesario identificar desde lo esencial, como son las preguntas de investigación hasta definir las variables y el diseño experimental que se desarrollará en la investigación.

2.1.1 Preguntas de investigación relativas al diseño experimental

Para poder enfocar la investigación de manera correcta, se debe definir el problema de investigación de tal manera que pueda resumirse mediante una pregunta específica que describa el objetivo principal y plantear la o las hipótesis a evaluar en el transcurso de la investigación. Como se ha encontrado que existen muchas variables que afectan el proceso, las primeras preguntas que surgen son: ¿cuáles son las variables que influyen en el proceso de fabricación y sus efectos en el comportamiento mecánico de las briquetas de mezcla de cascarilla de arroz y aserrín de pino? y ¿Cuáles son los valores o rangos de valores óptimos para la fabricación de las briquetas de mezcla de cascarilla de arroz y aserrín de pino?

De acuerdo a la revisión bibliográfica, se definieron algunas variables independientes que se han identificado como relevantes en los estudios previos sobre biomásas y mezclas de distintos tipos de ella para fabricar tanto pellets como briquetas. Así mismo se definieron los estándares bajo los cuales se evaluarán las propiedades obtenidas como variables dependientes.

De lo anterior, la pregunta de investigación que permite enfocar el estudio y delimitar su alcance es:

¿Cuál es la influencia de las variables del proceso de densificación (proporción de mezcla de biomasa, temperatura de proceso y tiempo de compactación) sobre el comportamiento mecánico de las briquetas fabricadas de biomasa de cascarilla de arroz y aserrín de Pino?

2.1.2 Modelo de diseño

El diseño de experimentos se basó en la identificación de las características y alcances que se tenían para la investigación. Este diseño permite crear un modelo válido y que además se ajuste a las variables de interés, incluso antes de conocer los valores de respuesta, delimitando y justificando las decisiones tomadas para desarrollar los experimentos y para analizar la respuesta e interacción que presentan.

Una de las primeras actividades para definir el diseño experimental es identificar la variable y factores que los compondrán. Dado que se cuenta con distintos factores a considerar en el diseño experimental, los cuales pueden manejar distintos niveles, un diseño factorial parece conveniente para este caso. El diseño factorial, suele considerarse adecuado en casos de: trabajos de exploración, donde se desea conocer el efecto de ciertos factores dentro de un intervalo específico; para investigar las interacciones de varios factores, considerando las combinaciones de estas; para experimentos que buscan mejorar un proceso que depende de varias condiciones y donde pueden requerirse factores auxiliares para probar factores principales [51].

Se eligió un diseño factorial mixto, con tres factores experimentales, de los cuales dos tienen tres niveles y el tercero dos niveles, ya que presenta como ventajas la economía del material experimental necesario, pues todas las unidades experimentales permiten obtener información sobre los efectos de los tratamientos y la interacción entre los tratamientos [52]. Con lo cual se tuvieron 18 tratamientos planteados con mínimo dos repeticiones por tratamiento.

Para las repeticiones se tuvo en cuenta el tipo de ensayo necesario, ya que para algunos de estos, se recurrió a ensayos destructivos mientras que otros se desarrollaron sin destruir las briquetas.

2.1.3 Identificación de las fuentes de variación

Se desarrolló un modelo inicial para determinar que variables tenían mayor influencia en el comportamiento mecánico de las briquetas, y definir un diseño experimental que se enfocara en estas variables claves, tal que se pueda reducir el costo tanto en recursos como en tiempo.

A modo de observar las variables que se encontraron de mayor interés durante la revisión de investigaciones anteriores, se muestra el diagrama de caja negra (Figura 2.1), con algunas de las variables de control que más se han analizado, seleccionando las más relevantes y que más influyen sobre la calidad de las briquetas, según trabajos previos.

Debido a que el modelo puede resultar muy complejo al contemplar todas las variables posibles, se optó por tomar las 3 variables más representativas, de acuerdo al equipo con que se contaba y con los antecedentes consultados [8], [32], [41], [45] y considerando utilizar el material en las condiciones de obtención para reducir los pre-procesamientos de la biomasa. Las variables de control que se tomaron fueron: la proporción de la mezcla de biomasa, ya que en estudios previos, las distintas combinaciones han mostrado efectos sobre las variables respuesta [11], [53]. Igualmente, la interacción que tienen las partículas de los distintos tipos de biomasa entre sí para favorecer el comportamiento mecánico. La segunda variable seleccionada fue la temperatura durante el proceso de compactación, la cual está asociada a los fenómenos de activación de la lignina [53], [54], como puede fluir esta última y mejora la unión de las partículas que se aglomeran. Como tercera variable se escogió el tiempo de compactación, debido a que en investigaciones anteriores se ha encontrado el efecto positivo que tiene la carga aplicada durante el proceso de densificación, al aumentar la respuesta de las variables físicas y mecánicas con el aumento de la carga aplicada [40], [53], [54]; sin embargo, no se ha considerado el efecto que tiene la duración de aplicación de carga sobre la biomasa durante el proceso de densificación.

Figura 2.1: Diseño de caja negra



Fuente: Autor.

▪ Factores de tratamiento

Respecto a las variables de control o factores de tratamiento, se seleccionaron la temperatura de compactación, los tiempos de compactación y la proporción de las mezclas, bajo las consideraciones previamente explicadas. En este caso la mezcla de dos tipos de biomasa puede llegar a influir pues se desconoce la afinidad que estas pueden tener para poder aglutinar, sin embargo se tienen algunos indicios que puede realizarse con la lignina de las distintas biomásas involucradas [38]. El tiempo de compactación fue una variable analizada también en el trabajo de Cabrales, si bien ya se sabe por diversos estudios [8], [32], [33], [37] que la compresión favorece a los procesos de densificación y que a mayor valor de este se tiene mejores valores respuesta, el tiempo requerido para que las briquetas puedan conformarse de manera estable y con suficientes propiedades de resistencia sin que se requiera de largos periodos de tiempo muerto en su fabricación.

- Proporción de biomasa: Este trabajo está orientado para continuar con los estudios de investigación sobre biomasa como el trabajo de Cabrales [32], enfocado en un solo tipo de biomasa, pero difiere en el uso de mezclas de biomásas distintas y los efectos que dichas mezclas tienen sobre las propiedades mecánicas, así como posibles efectos en aspectos como la aglomeración o la

afinidad entre las materias primas seleccionadas para la fabricación de las briquetas. También contempla los rangos de mezcla viables [38] para la formación de las briquetas.

- Tiempo de Compactación: Se ha evaluado en distintos estudios que hay una relación entre la fuerza de compactación y la densificación del material, esto es, que a mayor fuerza compresiva se obtiene mayor densidad. Por lo tanto, es claro que se debe utilizar la carga máxima admitida por el equipo; sin embargo, definir el tiempo que la carga debe permanecer sobre la briqueta y el efecto que la variable tiene sobre el comportamiento mecánico es una de las características que puede ser la más importante a contemplar. En general, se busca identificar que duración es la mejor, considerando las propiedades mecánicas, así como el tiempo máximo estimado que permanezca la biomasa en equipos de mayor escala.
- Temperatura durante la compactación: La selección de esta variable se realiza al considerar estudios previos como el de Cabrales [32], donde se ha definido que temperaturas de evaluación pueden darse entre los 90 °C y 140 °C. En el caso del valor inferior, se tiene en cuenta que es la temperatura a la cual el agua empieza a favorecer el transporte por difusión interna dentro de la materia prima, facilitando que la lignina, junto con otras sustancias internas alcancen el exterior de la partícula más fácilmente y puedan iniciar los fenómenos de aglomeración entre las partículas. La temperatura óptima que se considera para activar la lignina es de 140 °C, sin embargo en ensayos previos se encontró que una temperatura sobre 120 °C empezaba a carbonizar y degradar el material de las briquetas, por lo cual se escogieron valores ligeramente inferiores, pero que favorezcan la activación de lignina (110 °C).

- **Factores Secundarios (Ruido)**

Además de los factores de tratamiento también se consideraron otros posibles factores que pueden afectar la respuesta, como factores de ruido o variables secundarias, que sin embargo, no se consideran tan importantes para el estudio, pero podría llegar a influir en los resultados [51].

Se tomaron en cuenta, factores como la humedad, el tamaño de partícula y la carga aplicada en la máquina para briquetas. Al utilizar un modelo de error completamente al azar, se buscó que las unidades experimentales se encuentren lo más homogéneas posibles, al desestimar o reducir el efecto de estas variables mediante el mismo proceso de aleatoriedad.

- Contenido de humedad: La humedad tiene un efecto sobre los procesos de densificación [54] facilitando o dificultando que las partículas se aglomeren entre si dependiendo del porcentaje de humedad que contenga la biomasa. En este caso, se buscó mantener la humedad a las condiciones naturales de la materia prima, la cual se esperaba sea baja pues se trata de material de desecho normalmente. Adicionalmente, se mantuvo la materia prima en condiciones controladas al almacenarla de forma que quedara aislada del aire atmosférico.
- Tamaño de partícula: La diferencia del tamaño de partículas influye en la distribución de la biomasa al interior de la briqueta, que a su vez tienen un efecto sobre los fenómenos de unión de las partículas [20]. La organización que tienen las partículas de biomasa hace más probables que ciertas partículas más afines por sus propiedades superficiales (como humectabilidad y rugosidad) o por su forma interactúen, así como tiene influencia en el área superficial de contacto que se da entre las partículas lo que altera la unión entre ellas y la porosidad que se puede encontrar al interior de la briqueta lo que tienen un efecto sobre las propiedades que obtendrá la briqueta finalmente. Para mantener el control sobre esta variable, se buscó que el origen de la materia prima fuera el mismo, tal que los tamaños utilizados en las pruebas de la investigación se conservaran constantes y lo más homogéneos posibles entre sí, también se realizó la mezcla de biomasa en un recipiente cerrado de tal forma que la mezcla de biomasa fuera lo más homogénea posible. Si bien esta variable podría investigarse, al momento de desarrollar este trabajo no se consideró tan relevante, en cuanto a que era

deseable observar el comportamiento de la materia prima bajo las condiciones típicas que presenta una vez sale como subproducto de otros procesos.

- Carga aplicada: Una variable que si bien es importante al momento de la densificación, como se ha demostrado en otras investigaciones [32], [40], [53], es la carga aplicada, cuyo comportamiento es directamente proporcional al de la densificación de las briquetas, y por lo tanto a máxima carga se obtiene los mejores valores para densidad y sus propiedades mecánicas. En consecuencia se estableció que para obtener los mejores resultados, se debía aplicar la máxima carga que ofrecía el equipo (7,5 toneladas fuerza [32]), variando el tiempo que se mantiene la aplicación de la carga.
- Tiempo de almacenamiento: Se utilizó y aplicó los ensayos sobre las probetas lo más pronto posible para evitar efectos de degradación por el ambiente. Sin embargo, el hecho que solo se pudiera fabricar de a una briqueta al tiempo hizo que para desarrollar los ensayos de manera adecuada, se fabricó un lote de muestras antes de realizar los ensayos de caracterización. Por tanto aprovechando la fabricación aleatoria de los distintos tratamientos, se almacenaron y clasificaron las probetas de forma que se mantuvieran sus características de fabricación. En este caso, se almacenaron en bolsas selladas e individuales para cada tratamiento, a su vez se conservaron en cajas resistentes que mantuvieran seguras la integridad de las probetas.

- **Variables dependientes (respuestas)**

En las variables de respuesta se consideró la resistencia de la briqueta y la densidad aparente, como aquellas que permiten describir el comportamiento mecánico de la briqueta.

- Índice de durabilidad está asociado a la durabilidad mecánica, la cual mide la resistencia del biocombustible densificado a golpes y abrasión como consecuencia de su manipulación o transporte [54]. Debido al tamaño de partícula se pueden dar varias hipótesis para predecir el resultado, ya que la diferencia de tamaño puede generar discontinuidades que afecten la resistencia de la briqueta,

como también la compresión podría favorecer que las partículas más pequeñas se acomoden y mejoren la estructura formada.

- Densidad aparente es una variable importante, especialmente asociada a la facilidad del transporte de la biomasa [55], sin embargo no puede asociarse a la capacidad calorífica de la briqueta, ya que esta dependerá principalmente de la biomasa empleada en su fabricación [8], pero si se debe tener en cuenta que el proceso de densificación implica un gasto energético para la compactación del material que aumenta la densidad en la briqueta.
- Resistencia a compresión está asociada a la carga que las briquetas pueden soportar una vez se ha hecho el proceso de densificación, sin que éstas se deformen o destruyan. La resistencia de las briquetas que facilita su manipulación y transporte, está asociada a la cantidad de carga que pueden soportar, por ejemplo al amontonar los lotes de las briquetas en una producción industrializada sin que su integridad se vea afectada.
- El contenido de humedad se toma como una variable de referencia, debido a que no se definió el contenido de humedad como una variable de control, por tanto no se realizó un proceso de secado que acondicione el material a distintos niveles de la variable y medir su respuesta sobre las variables mecánicas, pero si se observó cómo se alteraba el contenido de humedad con los distintos tratamientos del diseño experimental. Para medir la variable se midió el valor de la materia prima antes de cualquier proceso y el contenido de humedad de las briquetas obtenidas posteriormente al proceso de densificación, el cual incluye el proceso mezcla, precalentamiento, prensado y enfriamiento de las briquetas. Con esta variable se buscó garantizar la homogeneidad del contenido de humedad en las muestras de tal forma que se mantuviera como una variable secundaria de control dentro del diseño experimental.

2.1.4 Diseño de control de error

En general se buscó controlar los efectos no controlados y reducir el error experimental mediante control, bloqueos o variaciones sistemáticas, usando reglas de asignación aleatoria a los tratamientos y obteniendo grupos más homogéneos [56]. Se utilizó un diseño completamente aleatorizado (DCA), donde la aleatorización se realizó en todas las unidades experimentales, es decir, todas las briquetas tuvieron la misma probabilidad de que se le asignara un tratamiento. El efecto de elegir las probetas aleatoriamente para los distintos ensayos, así como de seguir un proceso de fabricación aleatorio (fabricando distintas probetas con distintos tratamientos consecutivamente para reducir el efecto del tiempo de almacenamiento por ejemplo), hace que el error experimental se reduzca lo más posible, sin recurrir a otros controles sistemáticos que puedan volver más compleja la experimentación desarrollada.

2.1.5 Diseño de tratamientos

Se seleccionó un arreglo factorial con tres factores, como se ha mencionado anteriormente, pero así mismo se definió que sea un diseño factorial asimétrico o mixto, ya que se buscó definir el comportamiento de los factores con tres niveles (proporción de la mezcla y tiempo de compactación), y el factor con solo dos niveles (temperatura), al mismo tiempo que se identificó los niveles mínimo, donde la lignina reacciona, y el máximo al que se empieza a degradar o carbonizar el material de las briquetas. En el modelo factorial mixto, el número de tratamientos se definió por la ecuación (2.1) donde t es el número de tratamientos, s corresponde a los niveles y k los factores del modelo [56].

$$t = s_1^{k1} s_2^{k2} \dots s_m^{km} = \prod_{j=1}^m s_j^{kj} \quad (2.1)$$

De tal forma se tiene que para el diseño de tratamientos de la presente investigación se tienen $t=2^1 \cdot 3^2=2 \cdot 9=18$ tratamientos. Para el manejo de cifras se debió seleccionar la norma según el área de conocimiento de la tesis o trabajo de investigación.

En principio se definió una ecuación general para la variable respuesta considerando los factores de los tratamientos, este es el modelo estadístico para el diseño experimental

propuesto (Ecuación (2.2)). La forma de la ecuación es inicialmente válida para todas las variables respuesta, busca identificar los valores de los coeficientes, así como sus efectos estadísticos y si estos son representativos para cada respuesta.

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad (2.2)$$

En la Ecuación (2.2) Y representa la variable respuesta estudiada; μ es la respuesta media encontrada en la variable, es decir alrededor del valor del cual se dan las respuestas; α , β , γ son las variables de control donde i son los niveles de la variable α , j los niveles de la variable β y k los niveles de la variable γ ; Los siguientes son los efectos de la interacción de dos variables y el efecto de la interacción triple de las variables; finalmente ε es el error aleatorio de la combinación $ijkl$, siendo l el número de repeticiones efectuadas.

2.2 Técnicas experimentales

Se describen los materiales, equipos y métodos seguidos para caracterizar las briquetas de biomasa de forma que sustentan los resultados mediante estándares de distintas normas, con el fin de garantizar la repetitividad de los resultados y la reproducción de las distintas pruebas.

2.2.1 Materia prima

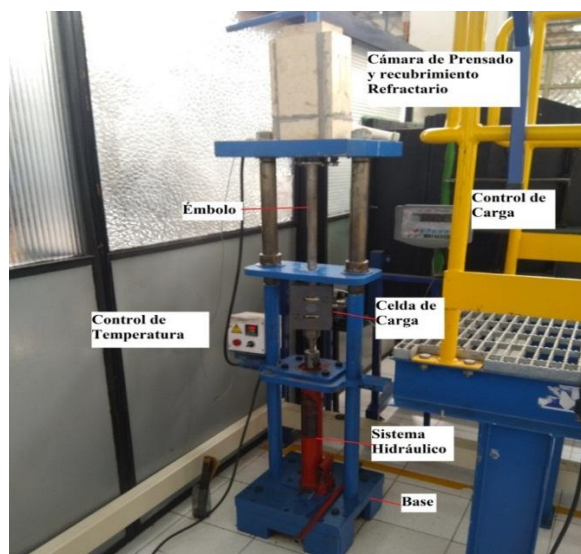
Se seleccionaron dos tipos de biomasa para realizar la mezcla, buscando utilizar la menor cantidad de productos extra en la fabricación de las briquetas, lo que implica un menor costo en la producción. Para este estudio se escogió la cascarilla de arroz y el aserrín de pino. La cascarilla de arroz se obtuvo en un vivero a un costo de \$5000 pesos colombianos/bulto (un bulto equivale a un volumen medio de 45630 cm³), el cual tuvo que ser limpiado y tamizado para eliminar partículas y elementos distintos al material seleccionado para las pruebas. Respecto al aserrín se buscó asegurar que su origen fuera de pino blanco únicamente y que se encontrará en la forma más fina posible. El material se obtuvo en empresas que reutilizan la madera de embalaje y estibas, las cuales se fabrican con pino blanco, donde el costo promedio de un bulto fue de \$2000

pesos colombianos, ya que normalmente se trata de material de desecho del procesamiento de estas maderas.

Igualmente, se emplearon algunas herramientas adicionales para facilitar el trabajo y manipulación de la materia prima como son: guantes, un recipiente resistente al calentamiento en el microondas, un embudo para facilitar la introducción del material en el equipo de compactación, termocupla tipo J y lector UNI-T modelo UT33C para medir la temperatura de ingreso de la materia prima, básculas para medir la masa y proporciones de las briquetas.

El equipo con el que se fabricaron las briquetas a nivel del laboratorio: cuenta con una prensa hidráulica de acción manual, una celda de carga Lexus de capacidad máxima de 10 toneladas, donde la carga utilizada para los ensayos era de 7,5 toneladas fuerza. La biomasa se vierte en una cámara de prensado de diámetro nominal de 30 mm, esta cámara está rodeada por un sistema de calentamiento mediante una chaqueta y aislante que calienta la cámara de prensado hasta 200 °C, para mantener la temperatura de la biomasa introducida dentro de los niveles seleccionados en cada tratamiento. El equipo puede verse en la Figura 2.2, con sus componentes principales. También se aprecia la escalera auxiliar para realizar el ingreso de la biomasa en la cámara de prensado.

Figura 2.2: Prensa para la fabricación de briquetas.



Fuente: Autor.

2.2.2 Ensayos preliminares

Los ensayos preliminares se hicieron para definir las variables a considerar en el estudio, así como los límites en los que se podría trabajar para garantizar que las briquetas fabricadas tuvieran la suficiente consistencia y posibles resultados de interés y al mismo tiempo, conocer mejor las características de la materia prima y su comportamiento en el equipo.

Para elegir las variables, se utilizaron de referencia aquellas que fueron más frecuentemente analizadas en otros estudios relacionados con la fabricación y evaluación de briquetas y pellets de biomasa, tales como las presentadas por Lela, B et al. [53], en un estudio físico- mecánico y químico de briquetas a base de aserrín y cartón. Gendek et al. [57], los cuales enfocaron el trabajo en las propiedades físicas y mecánicas de briquetas de aserrín de procedencia conífera. M. Gómez et al. [20], quienes trabajaron en el proceso de peletización de distintos materiales de origen maderero o no. S.A. Ndindeng et al. [37], quienes buscaron optimizar el proceso en briquetas a base de cascarilla de arroz. También se puede mencionar el trabajo precedente de Cabrales [32] enfocado en el estudio de briquetas fabricadas de tusa de palma de aceite africana. De los anteriores artículos, tomando como referencia, las variables que más inciden son: la densidad aparente, la resistencia a compresión, el índice de durabilidad y la humedad. Adicionalmente, se investigaron otras variables, que no son tan típicas en los estudios, pero que permiten caracterizar mejor las briquetas como es el módulo elástico y el arreglo de las fibras en el material densificado.

▪ Pre calentamiento

Debido a que el proceso de fabricación de briquetas en el equipo del laboratorio es relativamente rápido y se buscaba que la mezcla de biomasa alcanzara la temperatura y se mantuviera durante el proceso de densificación, se recurrió a un pre calentamiento del material a ingresar en el equipo de fabricación de briquetas, en este caso se recurrió a un horno microondas marca Toshiba. Para definir los rangos en las variables, se estudió si existía alguna correlación entre la temperatura de calentamiento, la masa introducida o proporción y el tiempo de calentamiento en el microondas. En esta primera aproximación

se compararon proporciones de 15 %, 30 % y 50 % de cascarilla de arroz respecto a aserrín para una masa de 20 g, medida mediante una báscula (BBG, modelo KD-TAC, 30 kg x 1 g). El tiempo de calentamiento se inició en 20 s (medidos en el mismo microondas) y fue aumentándose la duración gradualmente a 40 s, 60 s, 80 s, 100 s y 120 s en algunos casos donde era posible, sin que se presentara daño a la materia prima, en forma de quemones producida por la alta temperatura que alcanzaba. Se definieron diez repeticiones por cada temperatura de referencia con el fin de encontrar la temperatura media obtenida después de determinado tiempo de calentamiento y si existía alguna correlación significativa entre la temperatura de salida y la proporción analizada.

- **Ensayos de compactación**

El siguiente ensayo consistió en confirmar que cantidad de masa era necesaria para elaborar las briquetas de un tamaño adecuado de forma que tuvieran la suficiente resistencia para su manipulación y almacenamiento. Finalmente, otra variable a considerar fue los tiempos de compactación que se utilizarían para los ensayos finales y al mismo tiempo, familiarizarse con el funcionamiento de la prensa para briquetas.

De esta forma se realizaron varias pruebas de compactación ensayando briquetas con masa de 30 g, 40 g y hasta de 60 g (medida mediante báscula BBG, modelo KD-TAC), variando la proporción de cascarilla de arroz respecto al aserrín entre valores de 15 %, 30 %, 50 % y 75 %. En este caso, se realizó el precalentamiento de la mezcla en el microondas para llevar el material a 90 °C o 110 °C (temperaturas definidas de acuerdo a los resultados del estudio previo). Con una termocupla tipo J y un lector UNI-T, modelo UT33C se midió la temperatura del material al salir del proceso de precalentamiento, confirmando los tiempos estimados para que se alcanzara esta temperatura basada en el ensayo previo. Otro aspecto estudiado, fue la influencia del tiempo de compactación para observar visualmente defectos en las briquetas como grietas o faltas de material y se determinó el tiempo máximo de compactación que fuera viable en equipos de fabricación continua.

Se midieron las longitudes características de las briquetas, longitud y diámetro (mediante un vernier KANON con 0,05 mm de precisión), y se realizó una revisión visual de macro

defectos que pudieran afectar el comportamiento final de las briquetas para clasificarlas y definir los mejores valores a estudiar.

- **Ensayo de impacto**

El último ensayo previo consistió en evaluar si era posible realizar la prueba de durabilidad en las probetas obtenidas, esto especialmente para evaluar las briquetas de alta proporción de cascarilla de arroz, observando si había fragmentación en pedazos relativamente grandes ante cargas de impacto o si estas se pulverizaban. Para esta prueba se midió la masa inicial de las briquetas en una báscula de precisión (Ohaus PA224 - Pioneer Analytical Balance, 220 g x 0,1 mg). Posteriormente se dejaban caer las probetas desde una altura de 2,38 m para que el impacto fracturara las probetas y se considerara solo las partes que no pasan por un tamiz con 2/3 del diámetro normal (2 cm), estos pedazos se volvieron a pesar en la misma báscula y se compararon los pesos finales e iniciales, siendo incluso más importante en esta prueba el cómo se comportaban tras el impacto, y si era posible obtener resultados válidos para un ensayo de durabilidad.

- **Niveles de variables escogidos**

Posterior a los ensayos previos fue posible determinar las variables de interés y los valores de referencia que se tendrían en cuenta para lograr briquetas que tuvieran comportamientos de interés, para poder evaluar los resultados dentro de los rangos más amplios posibles de las variables independientes. En este caso, se terminó definiendo proporciones de mezcla de cascarilla de arroz respecto a aserrín de 25 %, 50 % y 75 % para una masa total de mezcla de 40 g, temperaturas durante la fabricación de 90 °C y 110 °C y tiempos de compactación de 20 s, 40 s y 60 s. La carga de compresión se mantuvo en 7,5 toneladas fuerza (73 kN) equivalente a un esfuerzo de compresión de 103 MPa.

El diseño de tratamientos con esta configuración dio lugar a un total de 18 tratamientos. Dichos tratamientos se codificaron para una identificación mucho más fácil y práctica que

redujera la posibilidad de confusiones entre probetas fabricadas. Para este estudio, se codificó las variables como se ve en la Tabla 2.1

Tabla 2.1: Codificación para la identificación de las variables.

Variable	Símbolo	significado
Proporción	A	25 % de proporción de cascarilla de arroz
	B	50% de proporción de cascarilla de arroz
	C	75% de proporción de cascarilla de arroz
Tiempo de Compactación (s)	I	20
	II	40
	III	60
Temperatura (°C)	O	90
	X	110

2.2.3 Ensayos y normas aplicadas

Para definir correctamente los comportamientos de las propiedades de un material, como son las características mecánicas de briquetas de mezcla de biomasa, se requiere realizar distintas mediciones considerando las variables más relevantes en el proceso, esto apoyado en estándares que permitan no solo la reproducción de los ensayos, si no también comparar los resultados con otros ensayos similares en relación a los mismos estándares y poder evaluar las diferencias y semejanzas entre resultados reportados en distintas investigaciones.

- **Ensayo de densidad aparente**

El ensayo para medir la densidad aparente en las briquetas es uno de los más sencillos de desarrollar, además de ser un ensayo no destructivo, lo cual es una ventaja pues permite obtener muchas más mediciones en las distintas probetas.

Para el presente trabajo, el ensayo se basó en la norma de la American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) s269.4, la cual indica varios métodos para determinar la densidad de briquetas o pellets. En este caso, se utilizó el método directo que consiste en medir el volumen de cada briqueta y pesarla, para obtener la densidad

aparente como el cociente entre la masa y el volumen (ver Ecuación (2.3)). La norma indica, que por lo menos se hagan unas 3 repeticiones por tratamiento [58]. Sin embargo, en este caso se realizó a todas las muestras de briquetas producidas, un total de 16 repeticiones por tratamiento.

$$\text{Densidad Aparente} = \frac{\text{Masa de briqueta}}{\text{Volumen de la briqueta}} \quad (2.3)$$

Para la medición del volumen se empleó un calibrador pie de rey o vernier (Vernier KANON de 0,05 mm de precisión), el cual permite medir la longitud y diámetro de las briquetas en mm. Para la masa, se utilizó una báscula de precisión con resolución 0,0001g (Ohaus PA224 - Pioneer Analytical Balance, 220 g x 0,1 mg) y se hicieron las conversiones necesarias para dar el resultado en kg/m³. Los datos se registraron en una hoja de cálculo, se evaluó que los resultados estuvieran dentro de los rangos típicos encontrados para las briquetas, entre 900 y 1300 kg/m³ [32], [34] y la no existencia de datos atípicos.

Figura 2.3: Báscula de precisión con resolución 0,0001g marca Ohaus PA224 - Pioneer Analytical Balance, 220 g x 0,1 mg.



Fuente: Autor.

- **Ensayo de Durabilidad**

Para medir la durabilidad de las briquetas se recurrió a lo señalado en la norma europea UNE-EN ISO17831-2, la cual está enfocada en el ensayo de durabilidad para briquetas específicamente. En esta además, se especifica las condiciones que debe cumplir el ensayo, el equipo del ensayo (dimensiones, velocidad de giro y estructura en general) y la metodología.

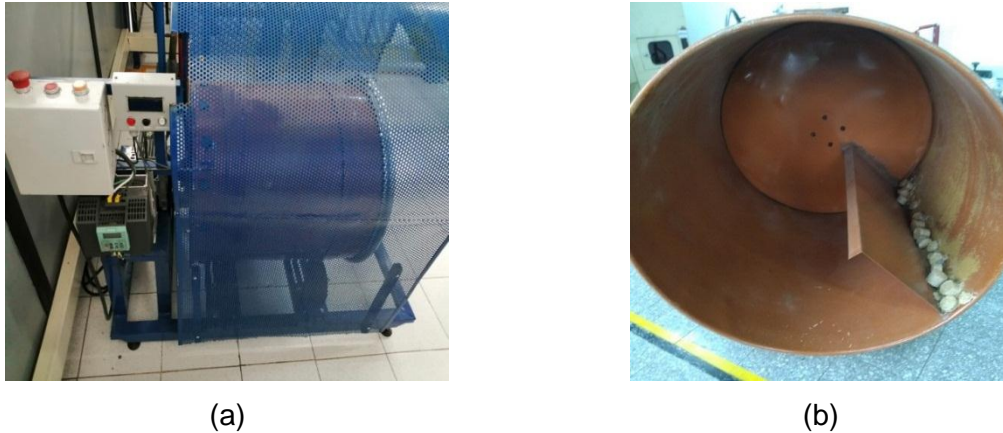
El valor de esta variable está definido por la Ecuación(2.4), donde DU es la Durabilidad mecánica en porcentaje, m_a es la masa de las briquetas tamizadas después del volteo y m_e es la masa de las briquetas antes del volteo.

$$DU = \frac{m_a}{m_e} \cdot 100 \quad (2.4)$$

El ensayo, consistió en colocar una muestra de las briquetas dentro de un tambor giratorio cerrado de diámetro interno de 598 mm e igual longitud, con una pestaña en su interior que facilita que las briquetas sean elevadas dentro del barril (ver Figura 2.4). El ensayo se realizó a una velocidad de 21 rpm durante 5 min, para garantizar que el barril realice 105 rotaciones [54]. Las muestras se sacaron del barril y se tamizaron mediante una malla con apertura de 2/3 el diámetro o diagonal de las briquetas, equivalente a ranuras cuadradas de 20 mm en este caso [54].

Para este ensayo se hizo una adaptación a la cantidad de masa ingresada por prueba usando 200 g de biomasa, debido a la producción limitada que se tenía tanto por la prensa de fabricación de briquetas y el tiempo que se requería para fabricar cada briqueta, como por la cantidad de unidades experimentales necesarias para desarrollar todos los demás ensayos destructivos.

Figura 2.4: Montaje interno de tambor giratorio. (a) Vista lateral del equipo de volteo utilizado. (b) Vista de barril cargado con muestras del ensayo de durabilidad.



Fuente: Autor.

Para este ensayo se utilizó una báscula de precisión Ohaus (EX1103, Explorer de precisión de 1100 g x 1 mg (Figura 2.5) debido a la capacidad requerida para determinar la masa inicial de la muestra, y posterior al proceso de volteo y tamizado, para comprobar la masa final obteniendo el índice de durabilidad de cada tratamiento.

Figura 2.5: Báscula de precisión Ohaus EX1103, Explorer de precisión de 1100 g x 1 mg.



Fuente: Autor.

- **Ensayo de resistencia a compresión**

Para el ensayo de resistencia a compresión, si bien no existe un ensayo completamente enfocado para medir la compresión en briquetas de biomasa, se aplicó normas basadas

en ensayos de compresión y que también han sido utilizadas como referencia en otros estudios tal como es la ASTM E9-89 [59], que da el método estándar para ensayos a compresión en metales a temperatura ambiente, así como se tomó referencia de la UNE-EN12504-1, que también aplica los estándares para el ensayo de compresión en hormigón [60].

El ensayo se realizó en una máquina Shimadzu AGX PLUS de 300 kN, aplicando una carga progresiva a una velocidad de 5 mm/min, que garantiza una velocidad de aplicación de carga constante según lo indicado en las normas. El equipo iba registrando la carga y el desplazamiento del cabezal durante el ensayo, los cuales posteriormente podían dar información del esfuerzo y deformación, además del valor máximo de carga antes de que la briqueta fallara. Se realizaron 5 repeticiones por cada tratamiento. La Figura 2.6 muestra un ejemplo del montaje para el ensayo a compresión.

Figura 2.6: Montaje de ensayo de resistencia a compresión.



Fuente: Autor.

De estos ensayos, igualmente, se consiguió el valor de la carga máxima, la pendiente de la curva de esfuerzo-deformación a partir de los datos obtenidos durante cada ensayo, y el valor del módulo de elasticidad de las briquetas.

Otra variable que se obtuvo mediante la aplicación de ensayos de compresión fue el coeficiente de Poisson. Mediante la medición del cambio en la sección transversal y en la dirección longitudinal de las briquetas al ser comprimidas, se determinó un valor para el coeficiente de Poisson. Al tratarse de una geometría con simetría radial se puede observar que la deformación transversal es aproximadamente homogénea, y puede analizarse como válido para cualquier dirección transversal en las briquetas.

▪ **Ensayo de contenido de humedad**

La humedad se midió mediante un analizador de humedad (OAHUS MB45) que se encuentra calibrado bajo la normativa ASAE s 358.2, la cual indica las condiciones y parámetros necesarios para evaluar la humedad en una muestra (ver Figura 2.7). De acuerdo a esta, se requiere de un ambiente controlado llevando la muestra a 103°C por un tiempo específico, de acuerdo a la norma son 24 horas, y se mide la diferencia de masas donde la masa eliminada corresponde en mayor medida a masa de agua dentro de las partículas del material. Vale la pena resaltar que la norma ASAE s 358.2 sirve de base para otras normas de referencia como las ISO 18134:2015, que a su vez es la base para la UNE-EN ISO 18134-3 [61].

Figura 2.7: Analizador de humedad OAHUS MB45.



Fuente: Autor.

En este caso, como el material fue comprimido, tuvo que extraerse pedazos de muestra para alcanzar mínimo una masa de 0,500 g (que es la masa mínima que recibe el equipo) y cuyo tamaño de partícula fuera menor a los 15 mm.

Para determinar el contenido de humedad (M_{ad}), la masa inicial (m_2) y final (m_3) son comparadas considerando la masa del recipiente metálico que las contiene (m_1) (ver Ecuación (2.5)). El proceso de tarado para sustraer la masa correspondiente al contenedor, es realizado por el mismo equipo, antes de cada ensayo de muestra, lo que facilita el cálculo de humedad [61], [7].

$$M_{ad} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100 \quad (2.5)$$

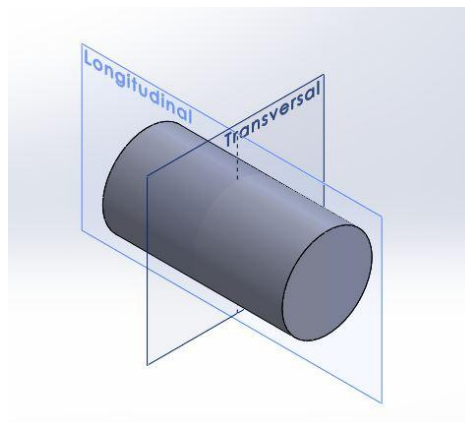
Es importante anotar, que aunque se recomienda una masa mínima para el ensayo, entre más masa de ensayo se introduzca, mayor tiempo se necesitará para tener resultados definitivos, es decir que el proceso de deshidratación toma más tiempo en completarse.

- **Microscopias Ópticas.**

Se complementaron los estudios realizados para evaluar la resistencia de las briquetas mediante un análisis óptico de la estructura interna de las briquetas utilizando un estereoscopio (American Optical, Advanced optical) disponible en el laboratorio de metalografía de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá.

Se seleccionaron algunas de las muestras clasificándolas a partir de los resultados de resistencia obtenidas para comparar, si existe, la diferencia en la estructura interna observable en las briquetas que tuvieran la respuesta de resistencia más alta, media y más baja. Las muestras seleccionadas se cortaron con un bisturí en secciones longitudinales y transversales en distintas partes de cada biqueta para tener una visión de la estructura generada por la densificación. En la Figura 2.8 se muestran una representación de los planos de cortes a efectuar en las briquetas para las microscopias.

Figura 2.8: Planos de cortes a realizar en las briquetas.



Fuente: Autor.

Se utiliza un lente de aumento tipo WF 10X para observar las muestras. Al tratarse de un equipo de fondo claro permite observar el contraste de las estructuras o partículas observadas. Por su parte la función estereoscópica permite obtener una visión tridimensional de la superficie de fractura o de corte al permitir obtener una visión de profundidad de la muestra.

2.3 Modelo para simulación Computacional

Para complementar el análisis de las briquetas fabricadas a partir de mezcla de biomasa, se propone el desarrollo de modelos computacionales que permitan simular condiciones donde se pueda predecir la resistencia de las briquetas. Para desarrollar los modelos se utilizó la herramienta *ANSYS Workbench*.

El desarrollo de los modelos consistió en varias etapas necesarias para plantearlos y para ajustar las variables que influyen en el mismo. Para definir los parámetros que influirían dentro de las simulaciones se tomaron como base los resultados experimentales y las propiedades que mostraron las briquetas. De no contar con valores que permitan definir dichos parámetros, se utilizaron los encontrados en investigaciones similares que emplearon la misma materia prima o de características muy similares.

2.3.1 Modelo del material de briquetas

En primer lugar se definió el tipo de material para fabricar las briquetas y sus propiedades, para lo cual se utilizó un programa que cuenta con un complemento llamado de *Material Designer*, que considera las propiedades de la materia prima para modelar el material de las briquetas como un material compuesto. En el caso del aserrín, como subproducto del procesamiento de la madera, está asociado a un comportamiento ortotrópico y por consiguiente sus propiedades mecánicas dependerán de la dirección en que estas se miden. En este caso el aserrín actúa a modo de matriz de un material compuesto, por lo cual la orientación de las partículas se da de manera aleatoria, al asumir dicha condición se puede decir que la matriz actuará de forma isotrópica, es decir sus propiedades no dependerán de la dirección en que se midan. Por tanto, tomando la anterior asunción como válida, el valor que se seleccionaría para el modelo sería el más crítico, en este caso el módulo elástico menor para el aserrín de pino correspondiente a 320 MPa y el coeficiente de Poisson correspondiente de 0,016 [62].

De manera semejante se deben definir los valores para las propiedades de la cascarilla de arroz. Para esto, se tomaron en cuenta los estudios de Chen, *et al.* [63] y de Jearanaisilawong *et al.* [64], los cuales estudiaron las propiedades mecánicas de la cascarilla de arroz especialmente a tensión. En estos estudios se encontró que los valores para el módulo elástico pueden llegar a variar por la especie y el origen de la muestra entre $2,0 \pm 0,4$ GPa y $2,6 \pm 0,5$ GPa [63], para el segundo estudio se encontró valores de 2,5 GPa [64]. Para el modelo se toman los valores de módulo elástico de 2600 MPa y el coeficiente de Poisson de 0,04.

Otras propiedades que sean necesarias para la simulación del material de las briquetas serán tomadas de los valores encontrados en los ensayos experimentales para aproximar el modelo a las condiciones experimentales, entre estas están las densidades, tanto de la materia prima como de las briquetas, las dimensiones para calcular el volumen y las proporciones de cascarilla en los tipos de briquetas. Otra consideración importante en el modelo para la materia prima es que esta no puede simular los efectos de aglomeración o térmicos en la materia prima, por ende se asumirá solamente tres tipos de briquetas correspondientes a cada una de las proporciones de mezcla, de forma semejante a un material compuesto donde la proporción de cascarilla de arroz actúa a

modo de fibra en el material modelado mientras el aserrín actúa a manera de matriz del material.

El siguiente paso al modelar el material de las briquetas es utilizar la función *Engineering Data* del *Material Designer*, donde se definen los dos materiales correspondientes al aserrín de pino y la cascarilla de arroz con los cuales se modela el material de las briquetas como un material compuesto conformado por los materiales definidos como aserrín de pino y cascarilla de arroz. Para definir las propiedades del material de cada tipo de biqueta se parte de la definición de densidad (ver ecuación (2.6)).

$$\rho_b = \frac{m_b}{V_b} \quad (2.6)$$

De la cual se despeja la masa de la biqueta y se reemplaza por la ecuación del volumen de la biqueta (volumen del cilindro, ecuación (2.7)):

$$m_b = \rho_b \cdot \left(h_b \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \phi_b^2 \right) \quad (2.7)$$

De manera similar, la masa de la biqueta es igual a la suma de las masas de cascarilla más la proporción de masa de aserrín de pino (1-% cascarilla):

$$m_b = m_{b_{aserrin}} + m_{b_{cascarilla}} \quad (2.8)$$

$$m_b = m_b \cdot (1 - \%cascarilla) + m_b \cdot \%cascarilla \quad (2.9)$$

A partir de la definición de la masa de ambas materias constituyentes de la biqueta y de la densidad de cada material se puede despejar los valores de volumen mediante la definición de densidad por:

$$V_{aserrin} = \frac{m_{aserrin}}{\rho_{aserrin}} \quad (2.10)$$

$$V_{cascarilla} = \frac{m_{cascarilla}}{\rho_{cascarilla}}$$

Por conservación de materia se tiene que el volumen de la mezcla sin comprimir es aproximadamente igual a la suma de volumen de ambas materias involucradas sin

compactar. En esta parte se toma otra consideración respecto al modelo, donde el material no puede considerar la porosidad por lo que esta es despreciable en el modelo planteado.

$$V_{mezcla} = V_{aserrin} + V_{cascarilla} \quad (2.11)$$

Para calcular el cambio de densidad posterior al proceso de densificación se calcula la razón del cambio de densidad ocurrido en el proceso donde se estima la densidad aparente de cada biomasa después del proceso de compresión. Este valor teórico se debe al cambio de volumen que cada material tuvo dentro de la mezcla durante el proceso de compactación, puesto que no es posible medir dicho valor directamente y para compensar el efecto de la porosidad que no es conocido.

$$\Delta\rho = \frac{\rho_b}{\rho_{mezcla}} = \frac{\frac{m_b}{V_b}}{\frac{m_b}{V_{mezcla}}} = \frac{V_{mezcla}}{V_b} \quad (2.12)$$

$$\Delta\rho = \frac{V_{mezcla}}{(h_b \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \phi_b^2)} \quad (2.13)$$

Con la razón de cambio de la densidad en el proceso de densificación se puede estimar los valores aproximados de la parte correspondiente de la densidad del aserrín y la cascarilla posterior al proceso de densificación.

$$\begin{aligned} \rho'_{aserrin} &= \rho_{aserrin} \cdot \Delta\rho \\ \rho'_{cascarilla} &= \rho_{cascarilla} \cdot \Delta\rho \end{aligned} \quad (2.14)$$

Con los valores de densidad posterior al proceso de densificación se procede a introducir los valores al modelo del programa, idealizando el material de la briqueta como un material compuesto de una matriz de aserrín de pino con fibras de cascarilla de arroz que se modelan como cilindros. Se aproxima el *Representative Volume Element* del tipo material compuesto de fibra corta (o picada), donde el material que actúa como fibras tiene una configuración cilíndrica cortas imbuídas en una matriz de un segundo material. Para el modelo se requiere definir la proporción de fibra y la geometría equivalente de la fibra para coincidir con la proporción de mezcla. La fracción de fibra se calcula mediante

la relación entre el volumen de cascarilla respecto al volumen de la mezcla de biomasa (ecuación (2.15)).

$$\%fibra = \frac{V_{cascarilla}}{V_{mezcla}} \quad (2.15)$$

En cuanto a la forma de la fibra, dado que está restringida por una geometría cilíndrica, se busca conservar algunas de las propiedades y características geométricas encontradas en la cascarilla a partir de estudios previos y se verificaron algunos con la materia prima utilizada a nivel experimental, para estas se definió la densidad de la cascarilla como $279,75 \text{ kg/m}^3$, la masa promedio de una unidad de cascarilla es de $3,5 \text{ mg}$ y la longitud promedio $7,14 \text{ mm}$, de acuerdo con la literatura consultada [64]. El volumen de una fibra se define por la ecuación (2.16)

$$V_{fu} = \frac{m_{cu}}{\rho_{cu} \cdot \Delta\rho} \quad (2.16)$$

El volumen de la fibra, como un cilindro, es equivalente a la ecuación (2.17)

$$V_{fu} = L_f \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \phi_f^2 \quad (2.17)$$

Finalmente, se igualan las expresiones del volumen y se despeja el diámetro de fibra equivalente para el modelo (ecuación (2.18))

$$\phi_f^2 = \frac{V_{fu}}{L_f \cdot \frac{\pi}{4}} \quad (2.18)$$

2.3.2 Modelo de impacto

Una vez obtenido un modelo para los materiales de las briquetas seleccionadas se plantea la primera simulación donde se considera la caída de una briketa, tal que se produce un impacto en la briketa. En este caso, el modelo no solo considera la briketa sino que también en él se define la superficie donde la briketa impacta.

Para este modelo se consideran como variables de interés el tipo de briketa (proporción de cascarilla), la altura de caída y el ángulo de impacto de la briketa. Adicionalmente, se

da una variable extra que es el material definido para la superficie de impacto. Por su parte para evaluar el modelo se especifican las variables de respuesta como el esfuerzo equivalente máximo, la deformación equivalente máxima y la energía específica de deformación máxima asociada al impacto.

Se definieron los niveles para cada una de las variables seleccionadas. La primera variable es el tipo de briqueta, en este caso son del tipo A con 25 % de cascarilla de arroz en la mezcla, B para un 50 % de cascarilla en la mezcla y C con un 75 % de cascarilla en la mezcla; sus propiedades fueron modeladas previamente para desarrollar este modelo. Respecto a la altura de lanzamiento se tomaron dos y cinco metros como niveles de la variable. Para la variable ángulo de impacto se definieron tres niveles respecto al eje principal de la briqueta, en el sentido longitudinal de la briqueta, donde el ángulo 0 ° equivalente al impacto en una cara plana, 45 ° que corresponde al impacto en el borde de la briqueta y 90 ° impacto de canto o sobre el lado cilíndrico de la briqueta. La superficie de impacto se consideró como una placa de 30 cm x 30 cm x 2 cm, con dos tipos de materiales, cuyas propiedades se definieron a partir de la biblioteca del programa, la primera es de acero estructural, material dúctil, y la segunda de concreto, un material frágil.

Para simplificar la simulación respecto a la variable de la altura de caída, se consideró el principio de conservación de energía considerando una caída equivalente desde una altura de un metro con una velocidad inicial de caída correspondiente a la velocidad que tendría la briqueta a esta altura del recorrido total. Para que dicha consideración sea válida el modelo no tiene en cuenta los efectos de fricción o resistencia del aire como pérdidas de energía. La ecuación (2.19) muestra la relación cinemática de caída libre que se utiliza para estimar la velocidad equivalente inicial para compensar la diferencia de altura en los modelos, V_i es la velocidad inicial desde la altura real de lanzamiento, en este caso de 0 m/s; g es la aceleración de la gravedad $9,81\text{m/s}^2$; alt es la altura del ensayo menos un metro, que es desde donde se da la simulación, es decir para la altura de dos metros $alt=1$ m y para la altura de cinco metros $alt =4$ m.

$$V_f^2 = V_i^2 + 2 \cdot g \cdot alt \quad (2.19)$$

Los valores de V_f obtenidos corresponden a la velocidad que alcanza la briketa en la simulación a un metro sobre la superficie de impacto para cada nivel de la variable altura definido. Por ende se hace una conversión de variable de altura a velocidad inicial de simulación, donde la altura de dos metros es $V_{f(h=2\text{ m})} = 4,43 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ y para cinco metros es de $V_{f(h=5\text{ m})} = 8,85 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

2.3.3 Modelo de ensayo de compresión

El último modelo está enfocado en simular el proceso de un ensayo de compresión no confinado de la briketa. Semejante al caso anterior se modelan tres briquetas con cada uno de los tipos de briquetas correspondientes a una proporción de biomasa diferente, donde las propiedades vienen dadas de la simulación del material. En este caso el modelo consiste en aplicar las cargas y restricciones apropiadas para simular las condiciones experimentales, por tanto se aplica una carga sobre una de las caras planas del modelo de briketa y la cara plana opuesta se define como un apoyo de contacto de bola. No se definen restricciones en las demás caras ya que no se considera un ensayo confinado.

La carga aplicada se define como una carga variable lineal con una velocidad de aplicación de 10 kN/s durante cinco segundos hasta alcanzar una carga máxima de 50 kN.

El modelo toma en consideración la región lineal del ensayo de compresión dado que el modelado del material no considera las regiones plásticas de la curva esfuerzo contra deformación. Por tanto en este modelo las variables respuesta son el esfuerzo equivalente y la deformación. Para tener un punto de comparación se analizan los valores máximos de estas variables.

3. Capítulo 3: Resultados y análisis

A continuación se presentan todos los resultados obtenidos para los distintos ensayos considerados con base en la metodología y procedimientos dados en las normas y estándares descritos.

3.1 Ensayos preliminares

Los ensayos preliminares se realizaron con la intención de conocer de manera exploratoria el comportamiento de la materia prima y determinar los rangos de variables a usar sin afectar la integridad de la materia prima. Por tratarse de estudios previos, se trabajó con rangos amplios de las variables para obtener los valores que permitieron definir los niveles de los factores y establecer el diseño de experimentos con sus niveles definitivos.

El principal ensayo previo, consistió en determinar las temperaturas de precalentamiento y observar si existía correlación entre el tiempo de calentamiento en el horno microondas y la temperatura obtenida. Igualmente sí había alguna correlación con la cantidad de masa o proporción de mezcla introducida al precalentamiento. Se encontró que la temperatura máxima que se puede alcanzar en la cascarilla de arroz y aserrín debería estar un poco por debajo de 125 – 130 °C, pues al alcanzar estas temperaturas se empezaba a encontrar material quemado. También se observó que por sus características de ser un material aislante térmico, era necesario crear una capa uniforme en el tazón donde se realizaba el calentamiento, ya que las zonas donde la capa era de mayor grosor favorecían que el calentamiento se concentrara en unos puntos, obteniendo mayores temperaturas y zonas de material quemado.

En general, las diferentes mezclas se basaron en antecedentes revisados, donde se utilizaron proporciones relativamente bajas hasta un máximo de una proporción 1:1 [44], sin embargo el enfoque fue observar la independencia de variables especialmente para la preparación de las probetas.

Los resultados obtenidos en las diferentes pruebas pueden observarse en las Tabla 3.1 y Tabla 3.2, su comportamiento se observa mucho más claramente en la Figura 3.1, donde se compara el tiempo de calentamiento contra la temperatura obtenida para las 3 proporciones propuestas. Las proporciones de mezcla de cascarilla de arroz con aserrín de pino a considerar en el estudio previo fueron 15 %, 30 % y 50 % de cascarilla de arroz respecto al aserrín de pino. Los tiempos de referencia para el calentamiento fueron: 20 s, 40 s, 60 s, 80 s y 100 s. Se realizaron 10 mediciones por cada tiempo de referencia y por cada proporción a utilizar, teniendo un total de 96 ensayos preliminares.

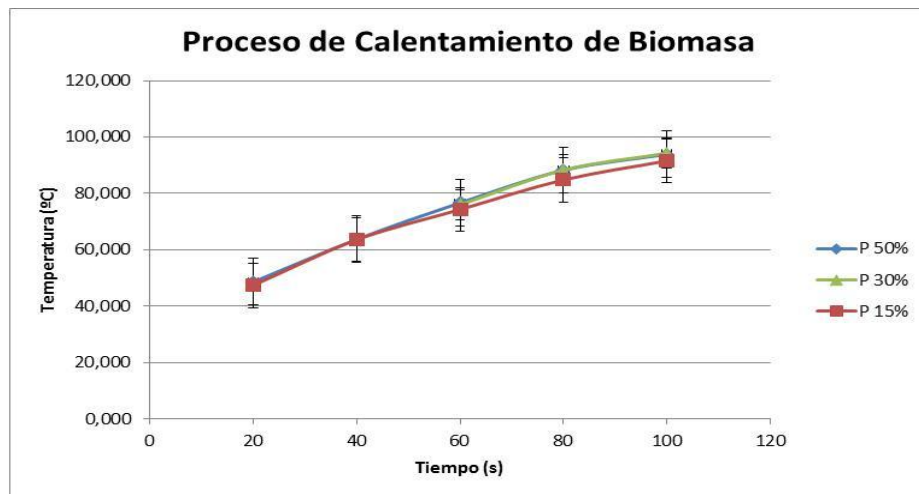
Tabla 3.1: Resultados de las mediciones exploratorias de temperatura para tiempos de referencia de 20 y 40 segundos de calentamiento para las proporciones de 15 % y de 50 % de cascarilla de arroz en la mezcla.

Tiempo de calentamiento	t=20 s		t=40 s	
	P 15 %	P 50 %	P 15 %	P 50 %
	41 °C	47 °C	61 °C	60 °C
	48 °C	52 °C	63 °C	67 °C
	45 °C	49 °C	65 °C	68 °C
	39 °C	48 °C	60 °C	62 °C
	43 °C	54 °C	57 °C	65 °C
	50 °C	48 °C	62 °C	66 °C
	51 °C	47 °C	66 °C	60 °C
	53 °C	43 °C	66 °C	66 °C
	51 °C	48 °C	68 °C	62 °C
	53 °C	50 °C	68 °C	61 °C
Media	47,4 °C	48,6 °C	63,6 °C	63,7 °C

Tabla 3.2: Resultados de las mediciones exploratorias de temperatura para tiempos de referencia a 60, 80, 100 segundos de calentamiento para las proporciones de 15 %, 30 % y 50 % de cascarilla de arroz en la mezcla.

t=60 s			t=80 s			t=100 s		
P 15 %	P 30 %	P 50 %	P 15 %	P 30 %	P 50 %	P 15 %	P 30 %	P 50 %
73 °C	75 °C	73 °C	84 °C	89 °C	93 °C	95 °C	93 °C	104 °C
70 °C	72 °C	74 °C	71 °C	85 °C	92 °C	93 °C	97 °C	92 °C
73 °C	74 °C	79 °C	87 °C	92 °C	88 °C	83 °C	95 °C	95 °C
71 °C	69 °C	80 °C	78 °C	89 °C	90 °C	95 °C	91 °C	86 °C
71 °C	80 °C	78 °C	94 °C	88 °C	83 °C	85 °C	95 °C	93 °C
78 °C	77 °C	72 °C	90 °C	90 °C	87 °C	92 °C	91 °C	90 °C
75 °C	74 °C	74 °C	82 °C	84 °C	89 °C	92 °C	98 °C	96 °C
79 °C	81 °C	76 °C	84 °C	88 °C	91 °C	91 °C	96 °C	93 °C
74 °C	79 °C	82 °C	85 °C	85 °C	84 °C	95 °C	95 °C	93 °C
79 °C	79 °C	79 °C	92 °C	87 °C	88 °C	95 °C	92 °C	97 °C
			85 °C	91 °C	86 °C			
			86 °C	92 °C	88 °C			
74,4 °C	76 °C	76,7 °C	84,83 °C	88,33 °C	88,25 °C	91,6 °C	94,3 °C	93,9 °C

Figura 3.1: Gráfica del comportamiento de la temperatura media para distintas proporciones de biomasa.



Fuente: Autor.

En el gráfico del comportamiento durante el calentamiento, se observa que un mayor tiempo de calentamiento produce mayores temperaturas en la biomasa. Sin embargo, se podría esperar que no hubiera diferencia significativa entre la proporción de la mezcla y la temperatura obtenida en el calentamiento, ya que las curvas son muy similares, cuya

variación cae dentro de las barras de variación o error en la gráfica. Para cuantificar los efectos en la variabilidad de la respuesta, se recurrió a un análisis de varianza (ANOVA), tomando de referencia cada tiempo de calentamiento (20, 40, 60, 80, 100 segundos). En todos los casos el nivel de significancia aplicado fue del 95 % ($\alpha=0,05$) y se compararon dos hipótesis. La hipótesis nula (H_0): las medias entre los tratamientos son iguales y la hipótesis alternativa (H_a): las medias de los tratamientos son diferentes. Lo anterior puede escribirse como:

$$H_0: \mu_{15\%} = \mu_{30\%} = \mu_{50\%}$$

$$H_a: \mu_{15\%} \neq \mu_{30\%} \neq \mu_{50\%}$$

Tabla 3.3: Tabla ANOVA para determinar el efecto de los tratamientos (proporción de biomasa) sobre la temperatura de calentamiento a 20 s.

ANOVA para 20 s						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	7,2	1	7,200	0,414	0,528	4,414
Dentro de los grupos	312,8	18	17,378			
Total	320	19				

Tabla 3.4: Tabla ANOVA para determinar el efecto de los tratamientos (proporción de biomasa) sobre la temperatura de calentamiento a 40 s.

ANOVA para 40 s						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,05	1	0,050	0,004	0,947	4,414
Dentro de los grupos	200,5	18	11,139			
Total	200,55	19				

Tabla 3.5: Tabla ANOVA para determinar el efecto de los tratamientos (proporción de biomasa) sobre la temperatura de calentamiento a 60 s.

ANOVA para 60 s						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	30,467	2	15,233	1,216	0,312	3,354
Dentro de los grupos	338,200	27	12,526			
Total	368,667	29				

Tabla 3.6: Tabla ANOVA para determinar el efecto de los tratamientos (proporción de biomasa) sobre la temperatura de calentamiento a 80 s.

ANOVA para 80 s						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	95.722	2	47.861	2.647	0.086	3.285
Dentro de los grupos	596.583	33	18.078			
Total	692.306	35				

Tabla 3.7: Tabla ANOVA para determinar el efecto de los tratamientos (proporción de biomasa) sobre la temperatura de calentamiento a 100 s.

ANOVA para 100 s						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	42,467	2	21,233	1,360	0,274	3,354
Dentro de los grupos	421,4	27	15,607			
Total	463,867	29				

El análisis de los ANOVA muestra los valores para F, donde el $F_{teórico} > F_{Calculado}$, lo que indica que a un nivel de confianza del 95 % ($\alpha=0,05$) se puede asegurar que los valores medios en todas las temperaturas para las diferentes proporciones de mezcla,

son los mismo para cada tiempo de referencia, ya que no hay diferencias estadísticamente significativas.

En el caso de los tiempos de 20 s y 40 s, solo se tomaron para la evaluación las proporciones extremas de 15 % y de 50 % pues se asumió que si en estos dos casos no hay efecto sobre la temperatura de calentamiento, las proporciones de mezcla entre este rango, tampoco se verán afectadas, lo que se verificó con los tiempos de calentamiento mayores, donde no hay variación significativa debido a la proporción de mezcla empleada.

Con base en esta información, y definidos los rangos a estudiar para las variables independientes, se procedió a fabricar las briquetas para los ensayos contemplados bajo norma y describir su comportamiento mecánico, de esta forma se definieron 18 tratamientos dadas las combinaciones entre los niveles de cada variable.

3.2 Resultados experimentales

Una vez obtenidas las briquetas se procedió a la realización de distintos ensayos mecánicos y su análisis. En los Anexos del C al F se pueden apreciar los datos obtenidos en las distintas pruebas. Mediante el análisis estadístico de los datos se estimaron los efectos de las variables consideradas en los factores de tratamiento sobre cada una de las variables de respuesta. Para cada variable de respuesta se siguió un procedimiento similar, donde se evaluaron los efectos y se les aplicó un análisis de varianza para identificar variables que resultaban estadísticamente significativas en cada caso.

A continuación se presentan y analizan los resultados obtenidos para cada variable estudiada, siguiendo un procesamiento similar en todos los casos: Primero verificando los efectos de las variables, seguido del análisis de varianza y definiendo la ecuación modelo que mejor se ajuste, finalmente, se presenta la superficie de respuesta estimada por la ecuación modelo.

3.2.1 Ensayos de Densidad aparente

Esta variable fue medida en todas las briquetas fabricadas dado que no requiere de un ensayo destructivo para las probetas, debido a esto es posible obtener 16 repeticiones para cada tratamiento. El proceso de medición se hizo midiendo las longitudes características de cada probeta (diámetro y longitud) después de que esta alcanzara la temperatura ambiente dejándola enfriar por 18 horas aproximadamente.

Se empleó un control aproximado de la masa ingresada y las proporciones de cada tratamiento mediante una báscula (BBG, modelo KD-TAC, 30 kg x 1 g) con una resolución ± 1 g. Sin embargo, se tuvo en cuenta la masa real medida mediante otra báscula de precisión (Ohaus PA224 - Pioneer Analytical Balance, 220 g x 0,1 mg). Los valores obtenidos para esta prueba se muestran en el Anexo C.

En el análisis de efectos estimados se usó un nivel de confianza del 95 % y un error basado en 264 grados de libertad. En la Tabla 3.8 se observa los valores estimados para los coeficientes de la Ecuación (2.2) con los intervalos de confianza de cada variable. Para evaluar el grado de significancia de las variables y su combinación, fue necesario comprobar la varianza, para definir de manera adecuada la ecuación modelo. En este análisis se definió como A (α) la temperatura de calentamiento, B (β) el tiempo de compactación y C (γ) la proporción de la mezcla.

Tabla 3.8: Efectos estimados para la densidad aparente (kg/m^3).

Efecto	Estimado	Intervalo de confianza	V.I.F.
promedio	1142,46	+/- 5,227	
A: T	31,93	+/- 4,676	1,0
B: TC	16,77	+/- 5,726	1,0
C: p	-28,19	+/- 5,726	1,0
AB	1,86	+/- 5,726	1,0
AC	0,13	+/- 5,726	1,0
BB	-4,36	+/- 9,918	1,0
BC	6,96	+/- 7,013	1,0
CC	2,74	+/- 9,918	1,0

En la Tabla 3.9 se presenta el análisis de varianza para la variable respuesta densidad aparente, donde se evalúa la significancia de cada variable independiente con un nivel de confianza del 95 %, utilizando el criterio del valor p. Si el valor p calculado para la variable es mayor a 0,05 (un nivel de significación de 5%) se considera que la variable no es estadísticamente significativa, si por el contrario el valor es menor a 0,05 es una variable estadísticamente significativa por tanto se puede desestimar que el efecto de esta sea por el azar y realmente afecta la variable de la densidad aparente.

Para el análisis anterior se tuvo un coeficiente de determinación (R^2) del 65,76 %, con un error medio absoluto de 14,36 kg/m³. El valor de Durbin-Watson es de $d=2,1099$ con un p de 0,8242, con estos valores se puede definir que con una significancia de 80 % no hay autocorrelación en los valores obtenidos para la variable respuesta, pues $4-d > Du$ ($1,8901 > 1,5386$, para 16 repeticiones y 3 variables independientes), incluso por el alto valor p se puede inferir un patrón aleatorio en los residuos. Además de definir la ecuación modelo como la Ecuación (3.1), donde solo se ha tomado las variables significativas: T, TC y P (Temperatura, Tiempo de Compactación y Proporción de mezcla, respectivamente).

Tabla 3.9: Análisis de Varianza (ANOVA) para densidad aparente (kg/m³).

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: T	73399,0	1	73399,0	180,79	0,0000
B: TC	13491,3	1	13491,3	33,23	0,0000
C: p	38140,6	1	38140,6	93,95	0,0000
AB	165,084	1	165,084	0,41	0,5242
AC	0,7596	1	0,7596	0,00	0,9655
BB	304,502	1	304,502	0,75	0,3872
BC	1551,55	1	1551,55	3,82	0,0516
CC	120,243	1	120,243	0,30	0,5867
Error total	107179,0	264	405,98		
Total (corr.)	273119,0	287			

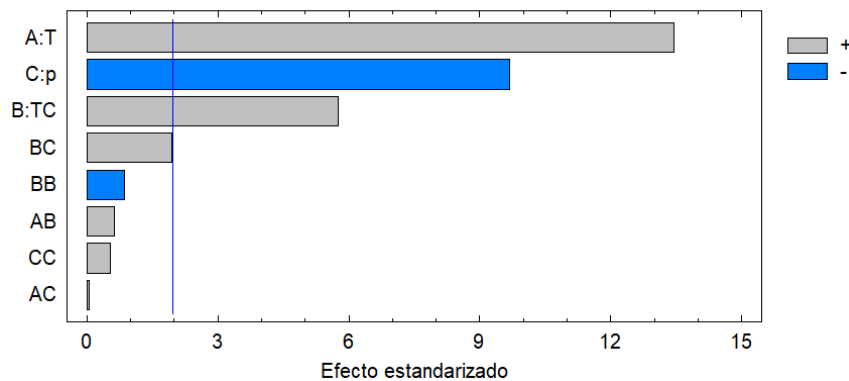
$$\rho_a = 1024,73 + 1,398 T + 0,0436 TC - 108,677 P \tag{3.1}$$

La ecuación (3.1) y la selección de las variables con efecto sobre la respuesta puede observarse gráficamente en el diagrama de Pareto (Figura 3.2) donde las variables que

superan la línea son aquellas con un efecto estadísticamente significativo, siendo el de mayor peso estadístico la temperatura, seguido de la proporción de la mezcla y finalmente los tiempos de compactación. También se observa que la combinación de los efectos de proporción de mezcla y tiempo de compactación está bastante cerca del valor de significancia; sin embargo, por el modelo con un valor de R^2 muy bajo, es mejor desestimar estos efectos y solo tomar los que son claramente significativos. Tampoco parece haber una posible correlación de variables respuesta, debido a la no correlación encontrada por el estadístico Durbin-Watson.

Al definir la ecuación que describe el comportamiento de la variable respuesta, también se pueden definir los valores óptimos de las variables independientes. Los valores óptimos son: temperatura de 110 °C, tiempo de compactación de 60 s y una proporción de 0,25 de cascarilla de arroz sobre el total de la masa, correspondiente al tratamiento AllX. Con lo anterior se logra una densidad aparente óptima de 1177,47 kg/m³.

Figura 3.2: Diagrama de Pareto estandarizada para la densidad aparente.

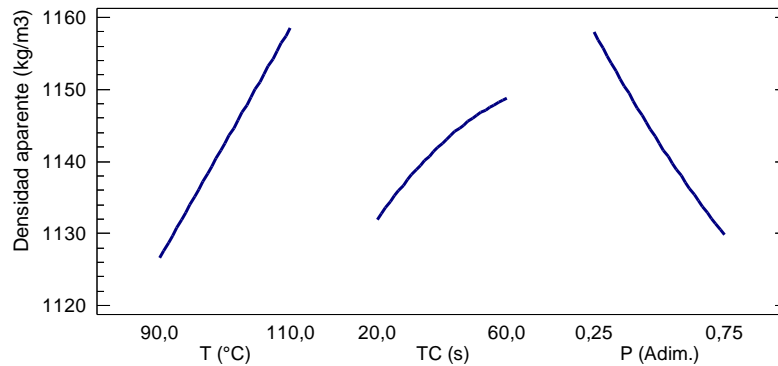


Fuente: Autor.

En la Figura 3.3, se presentan los efectos principales para la densidad aparente, donde se puede observar el efecto individual de cada una de las variables independientes consideradas. La gráfica muestra que hay un efecto creciente tanto para la temperatura como para el tiempo de compactación, mientras que el aumento de la proporción de cascarilla de arroz parece tener un efecto inverso sobre la densidad aparente; también que los efectos de Temperatura y proporción de mezcla son más marcados, ya que tienen los valores de respuesta más altos, además de ser prácticamente lineales. Por

otro lado, el efecto del tiempo de compactación parece más leve con cierta curvatura, por lo que no sería un comportamiento totalmente lineal.

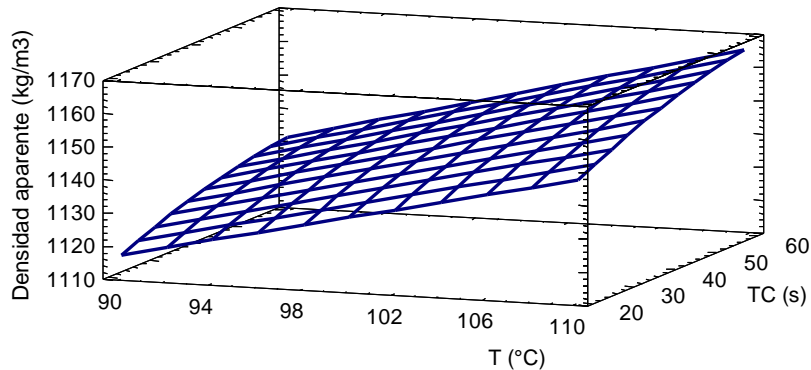
Figura 3.3: Gráfica de efectos principales para la densidad aparente.



Fuente: Autor.

Para la superficie de respuesta (Figura 3.4) es claro el efecto descrito anteriormente donde la temperatura es la variable con mayor influencia sobre la respuesta, con una pendiente media de $1,39 \text{ (kg/m}^3\text{) / }^\circ\text{C}$.

Figura 3.4: Superficie de respuesta estimada para la densidad aparente.

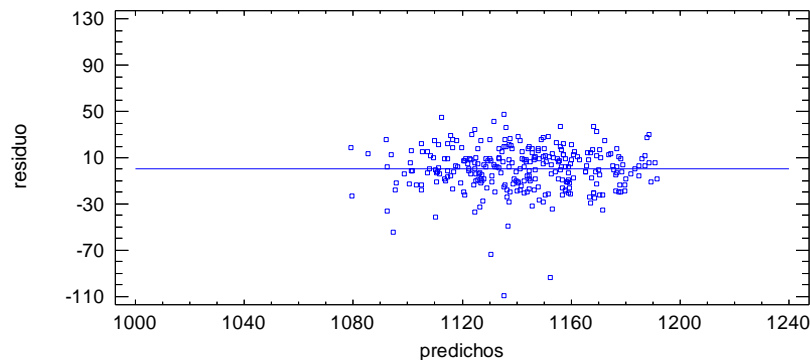


Fuente: Autor.

En cuanto a los residuos, la gráfica (Figura 3.5) permite observar la existencia de aleatoriedad en los resultados, así como que la varianza es constante. En este caso, lo más sobresaliente son tres puntos, algo dispersos, hacia el residuo negativo, medidas

posiblemente asociadas a los datos atípicos donde en ciertos casos se encontró valores de densidad superiores a la estimada por el modelo, pero que no afecta la varianza y el ajuste del modelo, pues no se observan patrones y la distribución es aparentemente homogénea alrededor de los valores de cero.

Figura 3.5: Gráfica de los residuos para la densidad aparente.



Fuente: Autor.

En general el comportamiento de las variables de proporción de biomasa y de tiempo de compactación parece ser similar al observado en pruebas previas, donde el mayor tiempo de aplicación facilita la aglomeración entre las partículas. Este efecto puede ocurrir, posiblemente por el tamaño de partícula, donde el aserrín puede cubrir mucho mejor los espacios entre las láminas de cascarilla [48] permitiendo reducir las discontinuidades y aumentando el área de contacto entre las partículas, por lo cual el proceso de aglomeración se ve favorecido ya que la lignina puede interactuar mejor con las partículas que componen la briqueta. Además, la ligera cantidad superior de lignina presente en el aserrín de pino [49], [50] favorece que este se compacte y aglomere mucho mejor que la cascarilla de arroz [6], [20].

La temperatura alta es otro factor que favorece el proceso ya que se eligió de tal forma que la activación de lignina tenga lugar sin efectos sobre la integridad de la materia prima, pese a no llegar a los valores óptimos para la activación. Una baja proporción de cascarilla favorece que la estructura sea más compacta, posiblemente por el tamaño de partícula y porque el aserrín contiene mayor cantidad de lignina que la cascarilla [6], [20].

Otro de los resultados importantes a considerar es que los valores mínimos obtenidos están por encima de lo que muchas normas europeas consideran (como la ITEBE o la SS187120), donde se establecen valores mayores a 600 kg/m^3 [34]. Lo cual muestra que el proceso en general cumple con estándares de clasificación para la densidad de las briquetas. Por su parte al comparar esta respuesta con análisis desarrollados a briquetas de biomasa semejante, se encuentra valores que pueden considerarse altos, Ramirez-Gomez *et al.* [42] encontraron mediante un análisis de densidad real, es decir despreciando el efecto del volumen de la porosidad, a briquetas de cascarilla de arroz con valores de $914,2 \text{ kg/m}^3$ y para una briketa con mezcla de aserrín y tallo de cereales $965,4 \text{ kg/m}^3$, valores inferiores a los determinados en esta investigación. Muazu y Stegemann [38] por su parte evaluaron cascarilla de arroz y tuza de maíz donde los resultados fueron incluso menores, en general se encontró que la combinación de biomasa aumentaba la densidad en 1,9 veces el de la densidad de las fuentes en estado natural y su densidad oscilaba entre 366 y 570 kg/m^3 , que podrían darse por aceptado bajo el código de buenas prácticas de la *European Committee for Standardization* (CEN/TS 14961).

En otro caso de estudio [8] el enfoque estaba en briquetas de baja presión de compactación, donde se utilizó un equipo manual de $4,2 \text{ MPa}$ y una fuerza de $8,7 \text{ kN}$ muy inferior a la aplicada en esta investigación con $7,5$ toneladas fuerza (73 kN), esta diferencia es bastante obvia en cuanto a que los resultados para baja presión alcanza una densidad máxima de $471,3 \text{ kg/m}^3$, valor que es aproximadamente la tercera parte de los valores medios obtenidos y que está dentro de lo esperado ya que la fuerza de compresión durante el proceso es importante para esta variable respuesta [65].

3.2.2 Ensayo de resistencia a compresión ($C_{\text{máx.}}$)

Los ensayos para comprobar la resistencia a compresión, ya que es el tipo de carga al cual se ven más típicamente enfrentadas las briquetas, se hicieron controlando la velocidad de aplicación de carga. Como respuesta se obtuvo las curvas de carga contra desplazamiento de cabezal, a partir de la cual se puede definir la curva de esfuerzo contra deformación lineal. Los valores de interés obtenidos para esta variable fueron el valor máximo de carga encontrado en cada prueba para los diferentes tratamientos, que

permitió a su vez, calcular el esfuerzo a compresión conociendo el área transversal de cada briqueta.

Por ser un ensayo destructivo, se seleccionaron cinco probetas correspondientes a cada uno de los tratamientos a experimentarse de manera aleatoria en el equipo universal de ensayos, donde se iban montando de a una por turno, realizando de esta forma 90 pruebas en total para encontrar el comportamiento de los diferentes tratamientos.

En este ensayo se reportaron los valores de esfuerzo máximo que se pueden observar en el anexo D. Dichos resultados se analizaron realizando un proceso similar al utilizado para la densidad aparente. Identificado el modelo estadístico básico (Ecuación (2.2)) se hizo un análisis de efectos estimados que se puede ver en la Tabla 3.10, donde A (α) es la Temperatura, B (β) el Tiempo de Compactación y C (γ) la proporción de cascarilla de arroz. Es importante tener en cuenta, que proporciona unos valores iniciales para los coeficientes del modelo estadístico (2.2); sin embargo, estos deben evaluar su varianza y su significancia para el modelo del comportamiento. Para el análisis inicial se consideraron 77 grados de libertad.

Tabla 3.10: Efectos estimados para la resistencia a compresión (kN).

Efecto	Estimado	Error Estándar	V.I.F.
promedio	64,817	0,920	
A: T	2,630	0,823	1,0
B: TC	1,796	1,008	1,0
C: p	-1,654	1,008	1,0
AB	0,277	1,008	1,0
AC	0,616	1,008	1,0
BB	-0,455	1,746	1,0
BC	-1,385	1,235	1,0
CC	-2,065	1,746	1,0

En el ANOVA (Tabla 3.11), se observa que al evaluar la varianza de la resistencia a compresión (significancia al 5 %), solamente la temperatura parece influir de manera significativa sobre la resistencia a compresión. Este efecto, es de esperarse, ya que esta variable puede estar muy asociada al proceso de activación de la lignina y por ende al proceso de aglutinamiento. Este último, favorece la resistencia ante cargas externas en la briqueta. Respecto a las otras variables independientes, sus efectos no se ven

claramente sobre la respuesta, puede ser debido a que las varianzas de estas variables no son significativas estadísticamente o sus respuestas están en un rango muy amplio, e incluso podría haber un efecto de una variable no contemplada como la microestructura o la configuración de las partículas en el conglomerado que intervengan en el efecto que tienen las variables controladas.

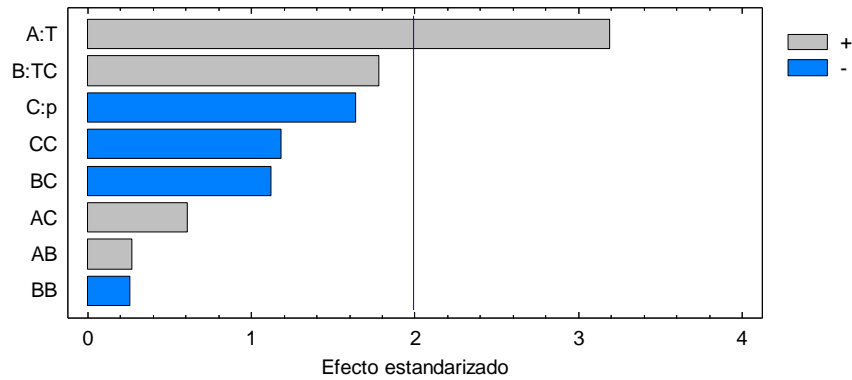
El modelo considerado con los efectos estimados en la Tabla 3.10 muestra un valor de coeficiente de determinación (R^2) de 62.44 %, un valor que conduce a unos resultados que deben ser asumidos con cuidado, ya que el ajuste de la regresión no es alto. El error absoluto medio es de 2,79 kN. Respecto a la correlación de variables utilizando el estadístico de Durbin-Watson de 1,93896, al restarle 4 al anterior valor se tiene ($2,06104 > 1,40$), que demuestra una no correlación entre los valores obtenidos para la variable repuesta, el valor-p para esta prueba es de 0,2029 que indica que no hay una correlación significativa con una significancia de 20 %.

Tabla 3.11: Análisis de varianza para las resistencia a la compresión (kN)

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: T	155,621	1	155,621	10,21	0,0020
B: TC	48,381	1	48,381	3,17	0,0788
C: p	41,035	1	41,035	2,69	0,1050
AB	1,1505	1	1,151	0,08	0,7843
AC	5,700	1	5,700	0,37	0,5427
BB	1,034	1	1,034	0,07	0,7952
BC	19,177	1	19,177	1,26	0,2656
CC	21,327	1	21,327	1,40	0,2406
Error total	1174,02	77	15,247		
Total (corr.)	2967,6	89			

El diagrama de Pareto (Figura 3.6) permite observar que las conclusiones encontradas en el ANOVA son válidas, ya que solamente la barra de la temperatura sobrepasa claramente la línea que indica las variables estadísticamente significativas.

Figura 3.6: Diagrama de Pareto estandarizado para la resistencia máxima a la compresión (kN).



Fuente: Autor.

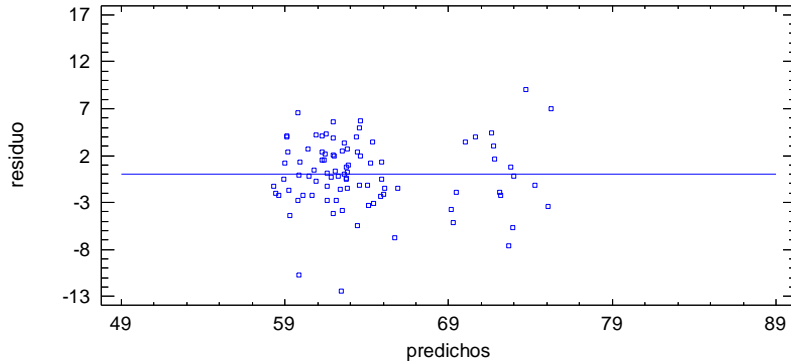
El modelo estadístico ajustado es:

$$C_{max} = 52,6499 + 0,0421553 T \tag{3.2}$$

A partir del cual se puede deducir que los valores óptimos para el modelo son: temperatura de 110 °C, Tiempo de compactación de 60 s y una proporción de cascarilla de arroz de 0,354 (35,4 %). Con esto el modelo logra obtener una resistencia de 67,3 kN. Es importante subrayar, que este valor óptimo coincide con los valores promedio observados. Este fenómeno se ve en la Figura 3.7, la cual presenta un cúmulo principal con los valores que mejor cumplen con el modelo y donde se observa que hay varianza constante, con residuos distribuidos de forma aleatoria, salvo un par de datos que podrían caer en los valores atípicos. Se observan otros datos desplazados en el eje horizontal a la derecha, que igualmente parecen demostrar la aleatoriedad de los residuos, pero posiblemente muestra un efecto que se puede estar asociado principalmente a los resultados de la quinta repetición, pues al analizar los valores obtenidos en esta repetición, se ven valores ligeramente mayores a los observados en las hallados en las otras cuatro repeticiones. Estas últimas repeticiones coinciden en ser algunas de las briquetas que se fabricaron más recientemente al momento de realizar los ensayos de compresión, lo cual pudo afectar el comportamiento pues el tiempo de almacenamiento podría variar las propiedades de resistencia mecánica. Este comportamiento atípico tampoco se puede asociar a alguna de las variables independientes analizadas, pues no se encuentra correlación con las variables

analizadas, por lo que la única diferencia entre unas briquetas y otras es el tiempo de almacenamiento antes del ensayo, siendo más resistentes aquellas que menor tiempo de almacenamiento tuvieron.

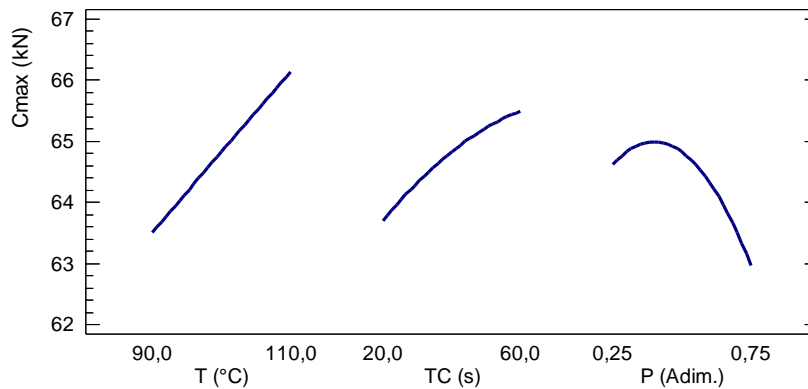
Figura 3.7: Residuos estándar contra ajustes para la resistencia a compresión.



Fuente: Autor.

El análisis de la superficie de respuesta estimada muestra los efectos principales que las variables de control tienen sobre la respuesta (Figura 3.8). En cuanto a la Temperatura y Tiempo de compactación son respuestas crecientes; la temperatura muestra un comportamiento semejante a uno lineal mientras que el del tiempo de compactación es mucho más cóncavo. Para la proporción de mezcla, se observó un comportamiento distinto, de forma casi cuadrática, y los valores de mejor comportamiento se dieron en una proporción intermedia (35,4 % de cascarilla de arroz).

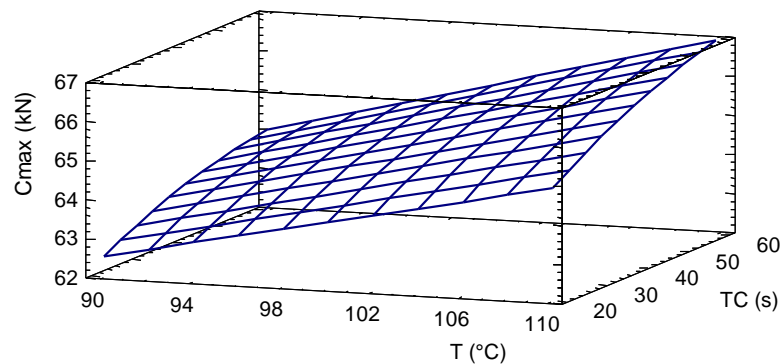
Figura 3.8: Gráfica de efectos principales para la resistencia a compresión.



Fuente: Autor.

La Figura 3.9 muestra la superficie estimada, donde es claro el efecto creciente de la temperatura, siendo el efecto principal que afecta la resistencia a la compresión, principalmente, por favorecer los efectos de aglutinamiento. El efecto de los tiempos de compactación fue mucho menos evidente, pero aun así se aprecia que tiene cierta influencia en el mejoramiento de la resistencia ya que facilita el contacto de las interfases de las partículas.

Figura 3.9: Superficie de respuesta para la resistencia a compresión.



Fuente: Autor.

De las respuestas obtenidas para cada variable en la Figura 3.8, se observó que la temperatura favorece la resistencia, lo que puede justificarse ya que la mayor temperatura facilitó los efectos de aglutinamiento entre partículas como también una mayor activación de la lignina, molécula encargada de los tejidos de sostén y de las paredes celulares [19], [46], por lo tanto puede mejorar la respuesta a la compresión. El tiempo de compactación mostró un efecto favorable, al hacer que el contacto de partículas fuera mayor por más tiempo, haciendo que el fenómeno de aglomeración fuera más efectivo. Si bien la lignina tiene un papel importante en la aglomeración, otros efectos como la compresión y fuerzas de van der Waals o de puentes de hidrógeno que mantienen cierta cohesión entre las partículas, al parecer también están influyendo en la respuesta.

El comportamiento que más difiere fue el de la proporción de mezcla, encontrando su punto óptimo en valores intermedios de 35,4 % de cascarilla de arroz. Dicho

comportamiento podría deberse a que al existir cierta porosidad al interior de la briqueta, esta permite absorber parte de la carga aplicada al facilitar la deformación, sin que se pierda la capacidad de resistencia debido a la aglomeración de partículas. Una proporción mayor de cascarilla redujo la capacidad de aglutinamiento entre las partículas reduciendo la capacidad de carga a compresión así como aumentando demasiado de la porosidad y facilitando el desarrollo y crecimiento de grietas internas.

3.2.3 Ensayo para Índice de Durabilidad

Para este ensayo se realizaron dos repeticiones dado que cada ensayo utilizaba varias probetas al mismo tiempo, por lo que la cantidad de material requerido fue mucho mayor que para los otros ensayos, lo cual limitó el número de repeticiones posibles. En general, se obtuvieron valores altos del índice de durabilidad, cumpliéndose con los requerimientos de las distintas normas como la DIN 51731 [34], [35], donde se especifican valores por encima del 97 %. En el caso de las probetas con una proporción de 75 % de cascarilla de arroz, el Índice de Durabilidad no cumplió con los criterios de aceptación. Si bien estas probetas no cumplieron los valores sobre 97 %, tampoco se encontraron resultados por debajo del 93 %. Es de anotar que los valores más bajos coinciden con la proporción mayor de cascarilla de arroz, señalando una capacidad reducida para la aglomeración y una resistencia mecánica menor en general.

Los resultados de los ensayos del Índice de durabilidad se observan en el Anexo E, donde los efectos estimados para la variable se realizaron con 26 grados de libertad. En la Tabla 3.12 se resumen los efectos estimados calculados para el modelo general que se ha planteado en la ecuación (2.2).

Tabla 3.12: Efectos estimados para el Índice de Durabilidad (%).

Efecto	Estimado	Error Estándar	V.I.F.
promedio	97,687	0,258	
A: T	0,803	0,231	1,0
B: TC	0,424	0,283	1,0
C: p	-2,720	0,283	1,0
AB	0,126	0,283	1,0
AC	0,488	0,283	1,0

Efecto	Estimado	Error Estándar	V.I.F.
BB	-0,122	0,490	1,0
BC	0,317	0,347	1,0
CC	-0,246	0,490	1,0

En la Tabla 3.13 se observa la ANOVA que analiza el Índice de Durabilidad, donde las variables de temperatura y proporción de la mezcla son estadísticamente significativas (significancia del 5%). En este caso, para el modelo estadístico se encontró un coeficiente de correlación R^2 de 81,12, % y un error absoluto medio de 0,406. Respecto a la evaluación de autocorrelación utilizando el estadístico de Durbin-Watson fue de 1,87352, y su estimación dio un valor de no autocorrelación ($2,12648 > 1,40015$), el valor p de 0,2210 mostró que hay aleatoriedad de los residuos, por lo que también se puede asegurar con una significancia de al menos 20 % que no hay correlación significativa.

Tabla 3.13. Análisis de varianza para el Índice de Durabilidad (%).

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: T	5,804	1	5,804	12,07	0,0018
B: TC	1,076	1	1,078	2,24	0,1465
C: p	44,381	1	44,381	92,29	0,0000
AB	0,096	1	0,096	0,20	0,6589
AC	1,430	1	1,430	2,97	0,0965
BB	0,030	1	0,030	0,06	0,8054
BC	0,4007	1	0,401	0,83	0,3697
CC	0,121	1	0,121	0,25	0,6201
Error total	12,503	26	0,481		
Total (corr.)	66,2135	35			

El modelo estadístico ajustado está descrito por la ecuación (3.3):

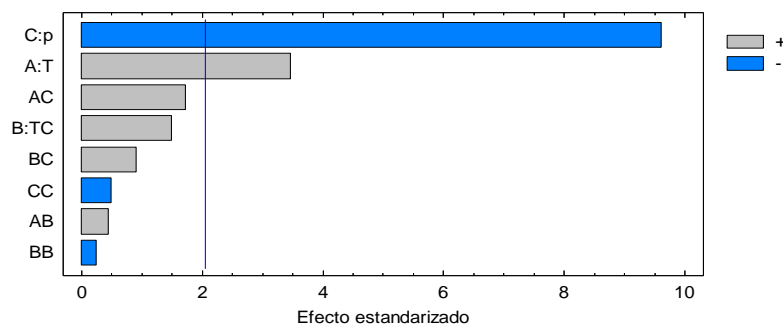
$$DU = 102,011 - 0,0213082 T - 14,501 P \quad (3.3)$$

Al optimizar la variable, en busca de maximizarla, se encontró que el valor óptimo de 99,14 %, de acuerdo al modelo, se alcanza con las variables independientes ajustadas a una temperatura de 110 °C y una proporción de cascarilla de arroz de 25 %.

Se procedió a verificar los efectos evaluados en el ANOVA por medio de la gráfica de Pareto Estandarizada (Figura 3.10), donde es claro el efecto de la proporción de mezcla sobre las demás variables. La otra variable que se observa sobre la línea de referencia

es la temperatura del proceso, siendo menor su efecto sobre la respuesta pero aun así estadísticamente significativo a un nivel de significancia del 5 %.

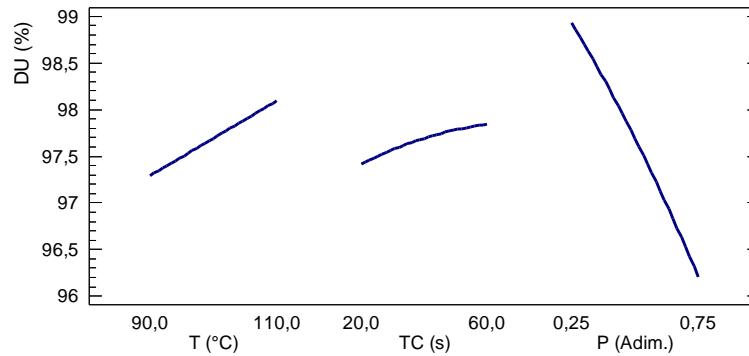
Figura 3.10: Diagrama de Pareto estandarizado para el Índice de Durabilidad (%).



Fuente: Autor.

Los efectos sobre el índice de durabilidad se pueden observar en la Figura 3.11, donde se presentan los efectos principales para cada una de las variables independientes y se puede ver su efecto (positivo o negativo) respecto a la variable de respuesta analizada. La temperatura y el tiempo de compactación muestran una tendencia positiva, siguiendo la temperatura un comportamiento lineal mientras que el tiempo de compactación muestra cierta curvatura y una pendiente mucho más baja, dado que su efecto no es significativo. Por otra parte, la proporción de mezcla, que posee el mayor efecto sobre la respuesta, muestra este comportamiento con una pendiente mucho mayor pero con un comportamiento negativo lineal. Estos comportamientos concuerdan con lo esperado para valores óptimos, donde las mejores condiciones se obtuvieron para una temperatura de 110 °C y la proporción de mezcla mínima considerada de 25 % de cascarilla de arroz.

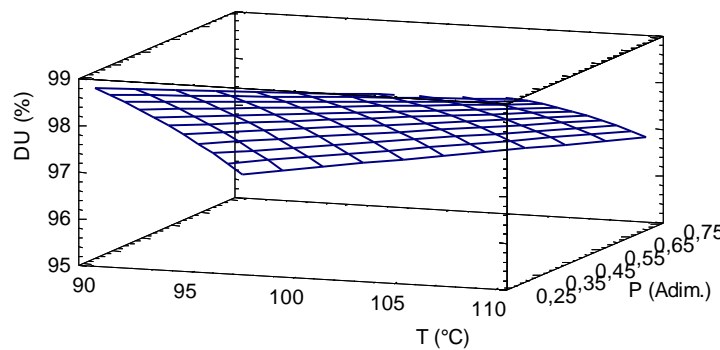
Figura 3.11: Gráfica de efectos principales para el Índice de Durabilidad (%).



Fuente: Autor.

Siguiendo con el análisis del Índice de Durabilidad, al considerar un tiempo de compactación de 40 s, (ver Figura 3.12), se puede apreciar que, si bien los efectos principales mostraron pendientes altas, especialmente para la proporción de mezcla, la variación en la respuesta no es tan amplia. Esta respuesta no se encuentra fuera de lo esperado, pues los valores encontrados mediante los ensayos, se encuentran en un rango entre 93 % al 99 %, siendo los puntos más bajos o críticos aquellos con valores de temperatura de 90 °C y proporción de mezcla de un 75 % de cascarilla de arroz.

Figura 3.12: Superficie de respuesta para el Índice de Durabilidad (%) para un tiempo de compactación de 40 s.

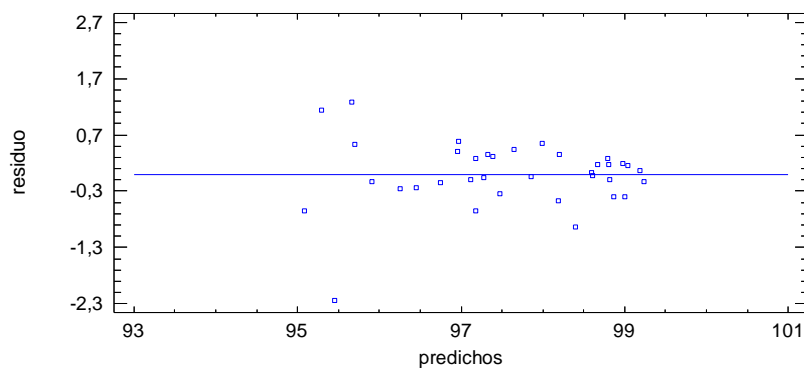


Fuente: Autor.

Al evaluar los residuos (ver Figura 3.13) contra el ajuste se observa que no se presentan patrones distinguibles, y hay aleatoriedad en los residuos; sin embargo, también resalta el hecho que se encuentran algunos residuos mayores cuando se obtiene un Índice de

Durabilidad relativamente bajo, indicando un mejor ajuste para respuestas más altas. Se observó especialmente un dato atípico cuando la respuesta es baja, posiblemente debido al ajuste del modelo o uno de los resultados por debajo de la media (en la probeta C110, se obtiene un valor bajo comparado a los demás resultados con 93,2 %).

Figura 3.13: Gráfica de los residuos contra ajuste para el Índice de Durabilidad (%).



Fuente: Autor.

El análisis del índice de durabilidad mostró el gran efecto que la proporción de material tiene sobre la respuesta. El hecho que los tratamientos con baja proporción de cascarilla presente una mejor durabilidad puede obedecer a que en esta proporción es mucho más fácil realizar la compactación de las partículas llenando los espacios y facilitando el efecto que la fuerza de compactación tenga sobre la mezcla de biomasa. El material particulado pequeño también facilita que la lignina del aserrín y la cascarilla de arroz puedan reaccionar y unir mucho mejor las partículas. Por otro lado, el alto contenido de Silicio en la cascarilla de arroz puede llegar a actuar como un elemento que dificulta la unión de partículas, especialmente por su alto punto de fusión y propiedad de aislante térmico.

La temperatura alta también hizo que la lignina reaccione, por lo que se obtuvo un mejor efecto al permitir que las partículas se unieran de mejor manera. Igualmente, a mayor tiempo de compactación, hay un mayor contacto entre partículas, así como que la carga a compresión actúe entre las partículas de cascarilla y aserrín.

Dentro de los resultados comparables, se encuentra el caso de baja compresión de densificación [8], donde se encontró que en general los valores de durabilidad aumentaban con la cantidad de aglutinante en la mezcla de biomásas, siendo significativo hasta valores de 10 % al 15 %; un comportamiento similar se observa al agregar agua en la mezcla donde al aumentar su proporción de 50 % hasta 70 % también se tiende a observar un aumento del índice de durabilidad. Así, el valor de durabilidad máximo se obtiene con 91,9 %. Valores que apenas alcanza los rangos mínimos obtenidos en la presente investigación esperable desde la diferencia en las fuerzas de compresión.

3.2.4 Ensayo para obtener el módulo elástico

Adicional a conocer la resistencia máxima durante los ensayos a compresión de las briquetas, se obtuvo los resultados de la carga contra desplazamiento y en consecuencia el comportamiento de esfuerzo contra deformación, lo cual permitió calcular el módulo elástico de las briquetas y obtener los valores a partir de la región lineal de su comportamiento durante los ensayos.

La determinación del módulo de elasticidad se realizó mediante el cálculo de la recta secante que pasa por la región lineal de la curva que presenta el mejor ajuste, en general utilizando los puntos de un 10 % de esfuerzo y deformación y un 50 % del esfuerzo máximo y deformación correspondiente. Al utilizar la misma prueba de resistencia a compresión, se realizaron 5 repeticiones para cada tratamiento.

Se realizó la evaluación de los efectos estimados (Tabla 3.14) para la variable respuesta y se planteó el modelo estadístico basado en la ecuación (2.2), En este caso, para el cálculo del error estándar se consideró 77 grados de libertad, al igual que en el análisis de resistencia máxima. Con las variables del modelo se procedió a realizar el análisis de varianza y a evaluar qué efectos de las variables eran significativos y realmente influían en la respuesta y en cuales se observaba efectos aleatorios.

Tabla 3.14: Efectos estimados para el módulo elástico (MPa).

Efecto	Estimado	Error Estándar	V.I.F.
promedio	769,158	11,7027	
A: T	51,7078	10,4672	1,0
B: TC	37,238	12,8197	1,0
C: p	28,9517	12,8197	1,0
AB	2,57133	12,8197	1,0
AC	-4,975	12,8197	1,0
BB	-14,6167	22,2043	1,0
BC	3,5245	15,7008	1,0
CC	-31,5277	22,2043	1,0

El análisis ANOVA se observa en la Tabla 3.15, al igual que para el índice de durabilidad, la temperatura y la proporción de la mezcla fueron estadísticamente significativas. Para esta respuesta, también el tiempo de compactación presentó diferencias entre los tratamientos aplicados siendo estadísticamente significativo (significancia de 0.05).

Tabla 3.15: Análisis de Varianza para el módulo elástico (MPa).

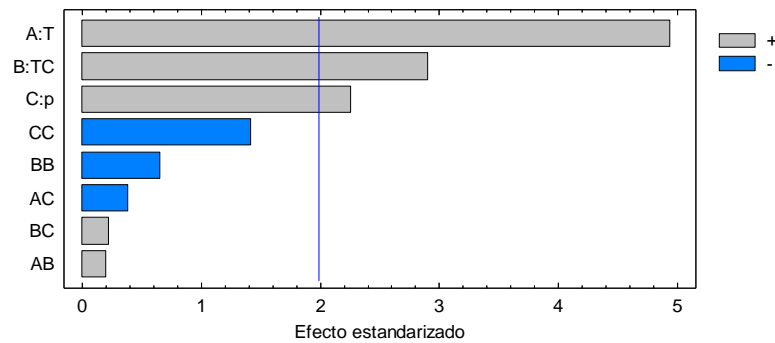
Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:T	60158,1	1	60158,1	24,40	0,0000
B:TC	20800,0	1	20800,0	8,44	0,0048
C:p	12573,0	1	12573,0	5,10	0,0268
AB	99,176	1	99,1763	0,04	0,8416
AC	371,259	1	371,259	0,15	0,6990
BB	1068,23	1	1068,23	0,43	0,5123
BC	124,221	1	124,221	0,05	0,8230
CC	4969,97	1	4969,97	2,02	0,1597
Error total	189817,0	77	2465,16		
Total (corr.)	430677,0	89			

Para el modelo ajustado (ecuación (4.5)) se encontró un coeficiente de determinación R^2 de 55,9 %, que indica un ajuste de modelo con relativa incertidumbre. El error absoluto medio hallado fue de 35,18 MPa, con un error estándar de 49,65 MPa respecto a la desviación de los residuos.

Las variables estadísticamente significativas que se hallaron en el análisis ANOVA pueden observarse en el diagrama de Pareto estandarizado (Figura 3.14), donde la línea

marca el valor de significancia de un 5%. Como se ha señalado, las variables significativas fueron la temperatura, el tiempo de compactación y la proporción de mezcla, sin embargo, el diagrama permite observar la relevancia de cada variable en el modelo. Se observa que la temperatura fue la variable que más tiene peso sobre los efectos en la respuesta, seguida del tiempo de compactación y en tercer lugar, la proporción de mezcla como la que parece mostrar menor efecto dentro de las variables significativas.

Figura 3.14: Diagrama de Pareto para el módulo elástico (MPa).



Fuente: Autor.

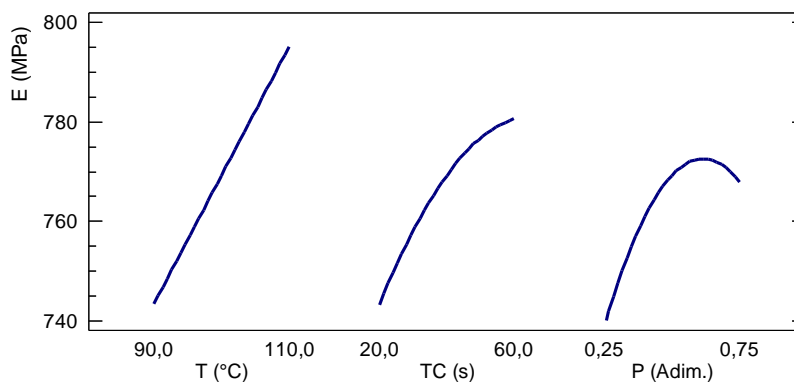
Para evaluar la posible autocorrelación de los residuales de la regresión se empleó el estadístico de Durbin-Watson con un $d=2,069$. Al calcular el estadístico se tuvo que $1,931 > 1,4015$, siendo mayor al límite mayor, se puede decir que no hubo autocorrelación entre los valores obtenidos con un nivel de significancia de al menos 40%, ya que se obtuvo un valor p de 0,4110.

$$E = 335,153 + 2,82576 T + 1,57356 TC + 395,527 P \tag{3.4}$$

Definido el modelo estadístico por la ecuación (3.4), se calcularon los valores óptimos para conseguir la mejor respuesta; en este caso, se buscó maximizar la variable del módulo elástico. Para esto, se estimó que las variables de control maximizan la función para una temperatura de 110 °C, tiempo de compactación de 60 s y la proporción de mezcla de 0,61 (61 % de cascarilla de arroz en la mezcla).

Para verificar la tendencia y el comportamiento de los efectos significativos, se utilizó la gráfica de los efectos principales (ver Figura 3.15). En esta se observa que las tres variables en general tienen un comportamiento creciente positivo, siendo la temperatura la que muestra el comportamiento lineal y de mayor pendiente, por su parte las otras dos variables parecen mostrar un efecto más cóncavo y con una pendiente ligeramente menor.

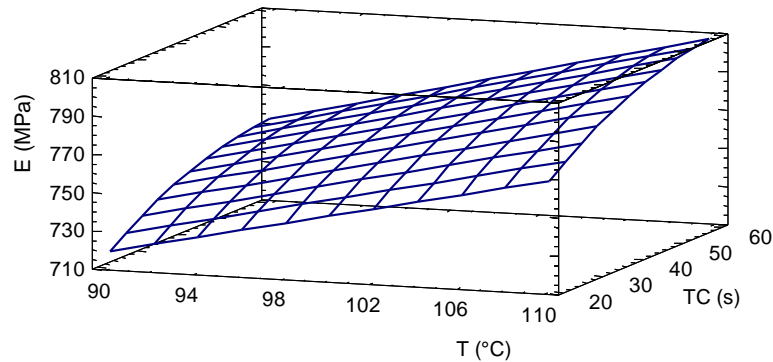
Figura 3.15: Efectos principales para el módulo elástico (MPa).



Fuente: Autor.

Las superficies de respuesta permiten observar mejor el comportamiento combinado de las variables analizadas sobre la respuesta, para tal fin, se consideraron dos superficies de respuesta, la de la Figura 3.16 que muestra la superficie para los factores experimentales temperatura y tiempo de compactación, bajo la condición de proporción de mezcla de 50 % ($p = 0,5$), donde se nota el efecto creciente de ambas variables, siendo como es de esperar, el punto óptimo a la mayor temperatura y tiempo de compactación. El gradiente, o cambio en la pendiente de la variable, tiempo de compactación, parece ir disminuyendo a medida que aumenta su valor, mientras que la pendiente de la variable temperatura se mantiene igual.

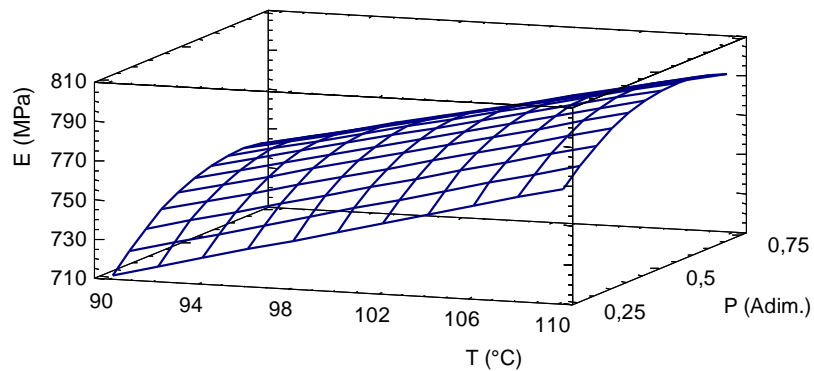
Figura 3.16: Superficie de respuesta para el módulo elástico (MPa) para una proporción de mezcla fija de 50 % de cascarilla de arroz.



Fuente: Autor.

La segunda superficie de respuesta se muestra en la Figura 3.17, donde se compararon los efectos de los factores experimentales temperatura y proporción de la mezcla, dejando como valor fijo el tiempo de compactación en 40 s, correspondiente al nivel intermedio evaluado para esta variable. Nuevamente se observa que la pendiente de la temperatura es constante, mientras que la de la proporción de mezcla parece variar de una forma incluso más rápida que para el tiempo de compactación; además, posiblemente cae para valores más altos de proporción de mezcla, siendo los puntos más críticos y de interés alrededor de 0,5 de la fracción de la mezcla.

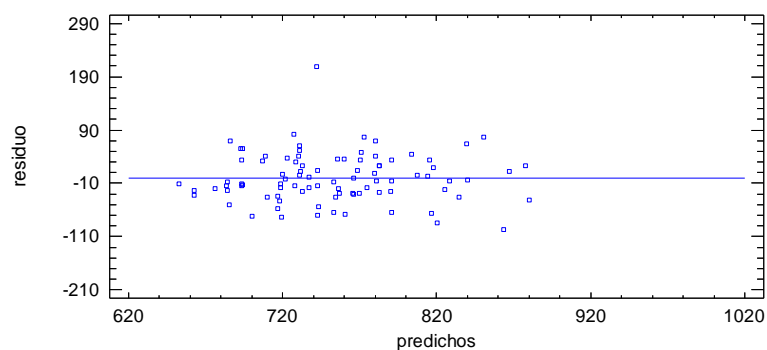
Figura 3.17: Superficie de respuesta para el módulo elástico (MPa) para un tiempo de compactación de 40 s.



Fuente: Autor.

Se verificó los efectos de los residuos contra el ajuste de la variable, en busca de posibles patrones, problemas con la varianza e incluso valores atípicos, la gráfica se observa en la Figura 3.18. En general, los residuos se distribuyeron de forma aleatoria sobre el valor cero, lo que indica una distribución aleatoria y una varianza constante. Hay la presencia de un solo punto que puede tratarse como un dato atípico que sobresale de los residuos de las demás mediciones.

Figura 3.18: Gráfico de los residuos contra ajuste para módulo Elástico (MPa)



Fuente: Autor.

El módulo elástico correlaciona el esfuerzo aplicado con la deformación, que experimenta la probeta (briqueta de biomasa) bajo la carga que genera el esfuerzo, en este caso lineal. De forma semejante puede definirse como un parámetro que caracteriza el comportamiento elástico de un material y relaciona a la energía que podría absorber el material antes de deformarse plásticamente.

3.2.5 Microscopías

Como una manera para explicar los resultados obtenidos en los ensayos experimentales, se procedió a la observación de la estructura interna de las briquetas. Para esto se recurrió a la microscopía óptica, en donde mediante la observación en un campo claro, se determinó el contraste natural de las partículas y se identificó las discontinuidades superficiales y la rugosidad en la sección observada, por medio de un equipo estereoscópico de dos canales visuales que permite obtener una imagen tridimensional.

Debido a la gran cantidad de tratamientos y probetas obtenidas, se decidió reducir el número de probetas con base en los resultados obtenidos previamente. Para el ensayo se realizó la selección de tres tratamientos que se catalogaron como baja resistencia, media resistencia y alta resistencia a partir de los valores medios de las variables respuestas. De esta forma se tomaron varias muestras para los tres tratamientos elegidos en cada uno de los niveles de resistencia definidos. La Tabla 3.16 muestra los tratamientos seleccionados a evaluar mediante las microscopías ópticas y la clasificación que se les dio. La idea de la clasificación es poder observar las diferencias físicas en las briquetas, desde el punto de vista del arreglo y distribución de los constituyentes con que se fabricaron las briquetas, que puedan sustentar el comportamiento de la resistencia mecánica y demás variables medidas en la presente investigación.

Las observaciones además se realizaron con cortes longitudinales y transversales a las briquetas para saber si había alguna configuración especial o patrones que se repitieran en la aglomeración de partículas de las briquetas en ambos sentidos. Se tomaron muestras en distintas partes de las probetas (extremos y centro), para considerar toda su estructura.

Tabla 3.16: Clasificación de los tratamientos considerados para las tomas de microscopía óptica.

	Tratamiento
Baja Resistencia	CIO
	AIO
	CIO
Media Resistencia	AIII O
	BII O
	BII X
Alta Resistencia	AIIIX
	CIIX
	AIX

En primer lugar, se analizaron las imágenes obtenidas en el sentido de los cortes transversales de las briquetas. Las observaciones se hicieron considerando briquetas que se fracturaron por otros ensayos en un plano transversal así como briquetas que se cortaron en una posición definida con otros instrumentos para comparar si habían diferencias entre las fracturas y los cortes.

La estructura de la cascarilla de arroz se observa en forma semejante a hojuelas alargadas, mientras que el aserrín presenta una estructura en forma de gránulos aglomerados alrededor de las partículas de cascarilla de arroz. Adicionalmente, se notan las marcas debido al contacto entre las partículas de aserrín y la cascarilla de arroz.

En la Figura 3.19 se observan las microscopias cortadas en el sentido transversal de la briketa para aquellas que se catalogaron con baja resistencia. Lo primero que se nota es que las briquetas tipo C, de mayor proporción de cascarilla de arroz (75 %), muestran más claramente las láminas de la cascarilla, en su mayoría, en un plano coincidente con el corte. En la briketa tipo A, cascarilla de arroz 25 %, (Figura 3.19 (c) y (d)) es más clara la formación de una matriz a partir del aserrín aglomerado donde las hojuelas de cascarilla están incrustadas en dicha matriz

Los resultados transversales de briquetas de media resistencia se presentan en la Figura 3.20. De manera similar, se observa que la mayor proporción de cascarilla es visible en las microscopias. Es importante anotar, especialmente en las figuras (a), (b) y (c) que las cascarillas se han deslizado y se muestran ligeramente levantadas del plano principal de corte, lo cual podría indicar que hay un deslizamiento de las fibras de cascarilla e incluso en algunos casos como en la figura (a), se ve la rotura de las fibras que unían otro plano de la briketa. En las figuras (e) y (f) se puede apreciar algunas partículas que pudieron quedar del proceso de tamizado, ya que su tamaño es mucho menor al de las láminas de cascarilla de arroz, lo que pudo afectar el proceso de aglutinamiento al crear inclusiones y discontinuidades en las diferentes láminas transversales que conforman la briketa.

Los cortes transversales de briquetas de alta resistencia mostrados en la Figura 3.21, de manera similar a los casos anteriores presentan la proporción de cascarilla de arroz que aumenta conforme al tipo de clasificación, notándose mucho más claramente las láminas de cascarilla en las figuras (c) y (d) que en las demás imágenes de la figura. En las microscopias de las briquetas de baja proporción se nota que se generan acumulaciones del aserrín por efecto de la aglomeración de partículas, lo cual se percibe como una superficie que se ve mucho más rugosa e irregular.

Los cortes longitudinales presentaron mayor dificultad para su rotura y poder tomar la muestra, debido a esto fue necesario sacar secciones transversales más pequeñas que posteriormente se procedieron a cortar en la dirección longitudinal de las briquetas. Dicho comportamiento podría indicar que hay un sentido en las briquetas que genera mayor resistencia al corte. Se observa el sentido de preferencia en el que la cascarilla de arroz se acomoda en la briketa. Se aprecia que la cascarilla forma fundamentalmente capas en el sentido transversal de la briketa, comportamiento que parece repetirse en todas las briquetas sin importar su composición.

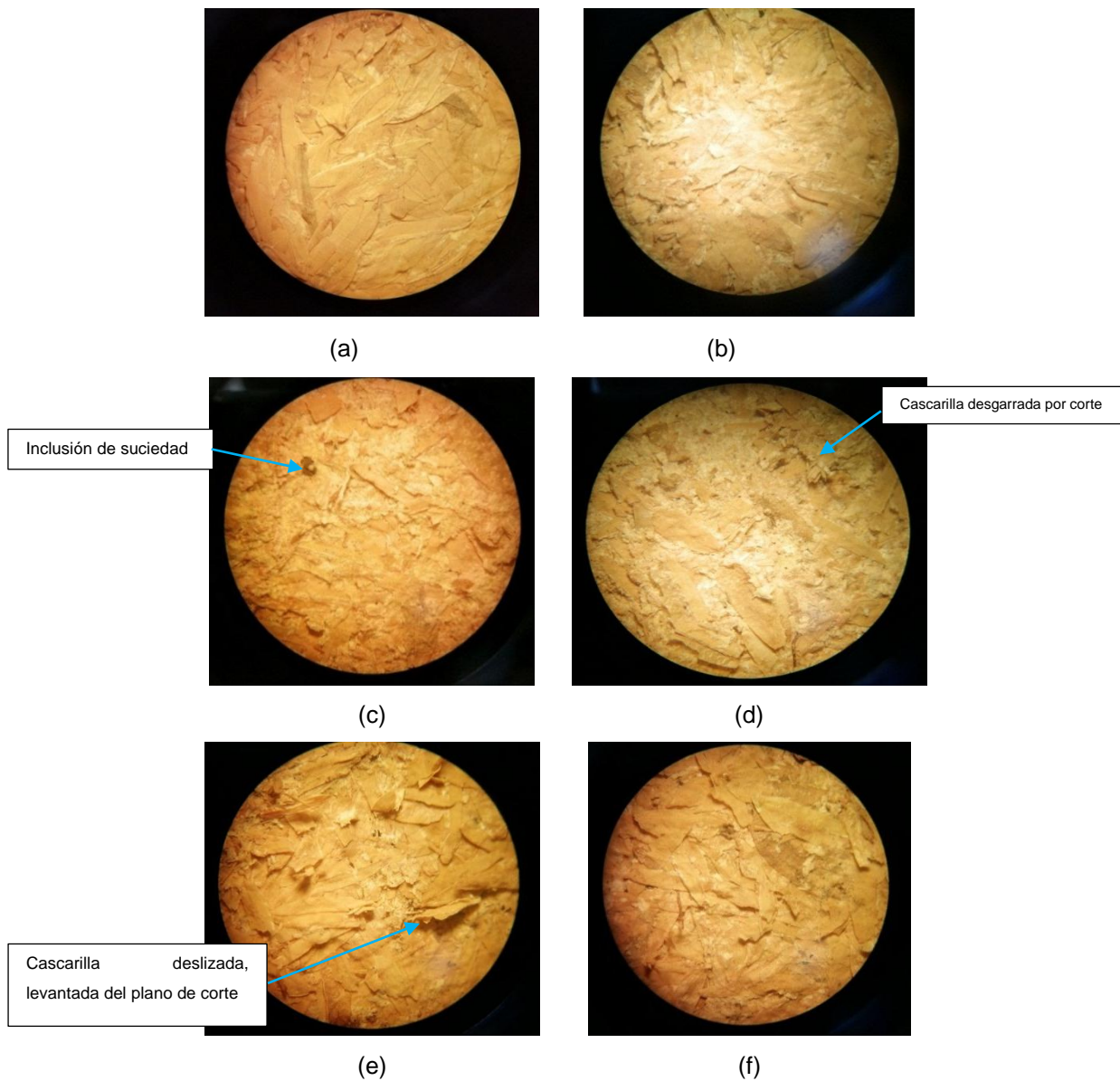
Para las microscopias longitudinales de las briquetas clasificadas como de baja resistencia que se muestran en la Figura 3.22, las diferentes capas transversales parecen más separadas que en las imágenes que se observan para las briquetas de mayor resistencia, debido posiblemente al menor tiempo de compresión de estas briquetas. Otro elemento que se percibe de la Figura 3.22, es que en las figuras (c) y (d), se puede apreciar parte del aserrín aglomerado entre las capas de cascarilla, mientras que en las demás se advierten más espacios vacíos entre las capas de cascarilla. También es visible que las cascarillas superficiales se levantan ligeramente del plano de corte transversal y no se ve que las cascarillas atraviesen la briketa de forma longitudinal, ni en el centro o extremos de la briketa.

Los cortes longitudinales de las briquetas de media resistencia de la Figura 3.23, muestran las briquetas un poco más compactas que para las de baja resistencia, entre otras razones, porque son briquetas que se fabricaron con una mayor duración de compactación. Al tener una composición de más aserrín de pino, se observa que este se aglomera de forma más visible entre las capas de la briketa en forma de pequeños cúmulos entre las hojuelas de cascarilla.

La Figura 3.24 muestra las microscopias de los cortes longitudinales para las briquetas con alta resistencia, las cuales se observan más compactas respecto a las microscopias de las briquetas de baja resistencia, debido a los mayores tiempos de compactación, así como un proceso de aglutinamiento mucho más claro observándose los cúmulos de aserrín entre las láminas de cascarilla. Pese a ser más compactas, igualmente, la probeta de mayor proporción de cascarilla (imágenes (c) y (d)) por la misma composición hace que sus hojuelas se separen mucho más que las de las briquetas de menor

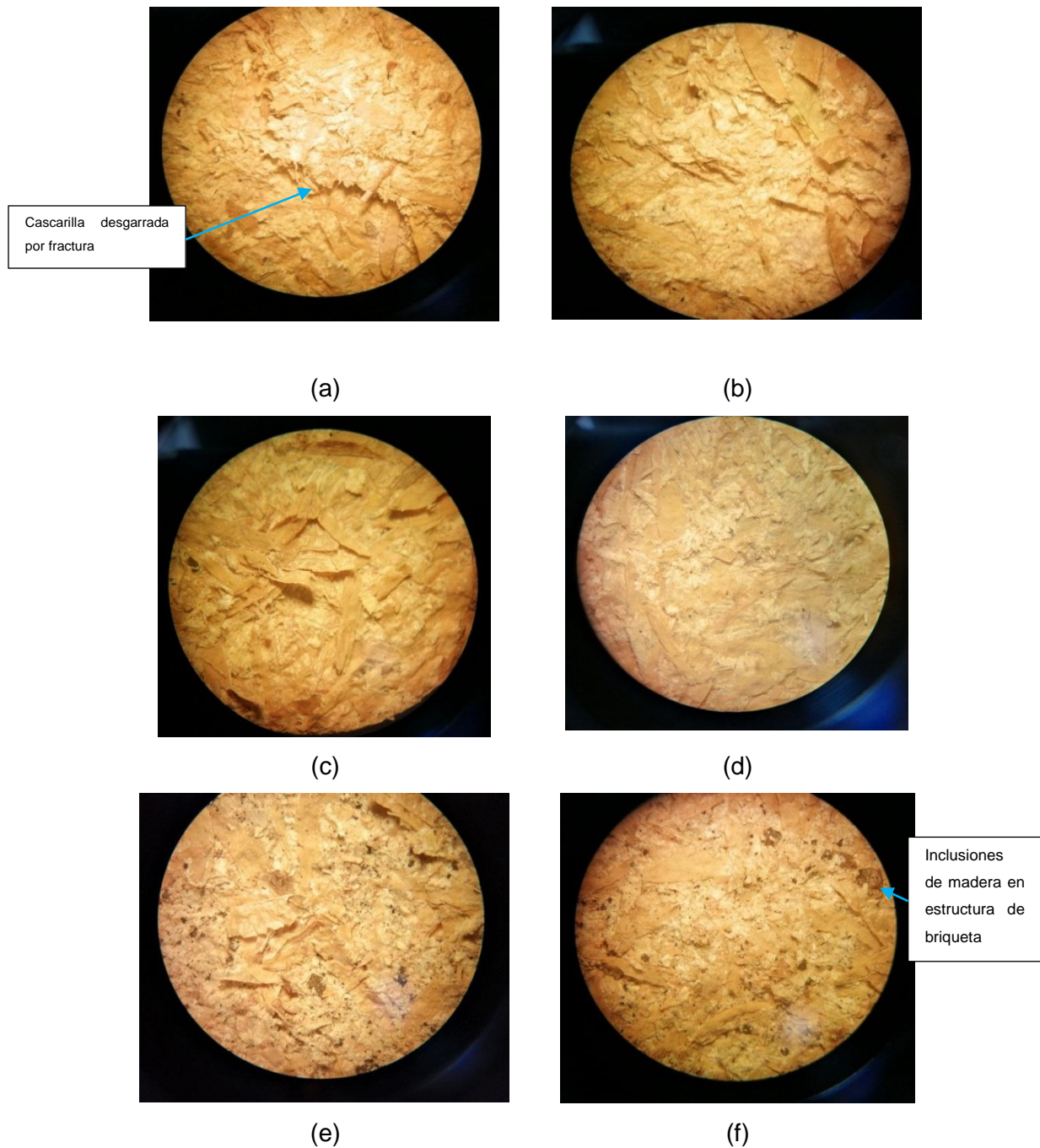
resistencia. No se perciben láminas o partículas de cascarilla de arroz en sentido longitudinal de la briqueta y se mantiene el orden de láminas transversales una sobre otra aglomeradas mediante la aglutinación del aserrín principalmente y la lignina que libera la cascarilla.

Figura 3.19: Microscopías ópticas en sentido transversal para briquetas con baja resistencia. Las figuras (a) y (b) corresponde a probetas CIIO; (c) y (d) corresponden a las probetas AIO; (e) y (f) son probetas CIO.



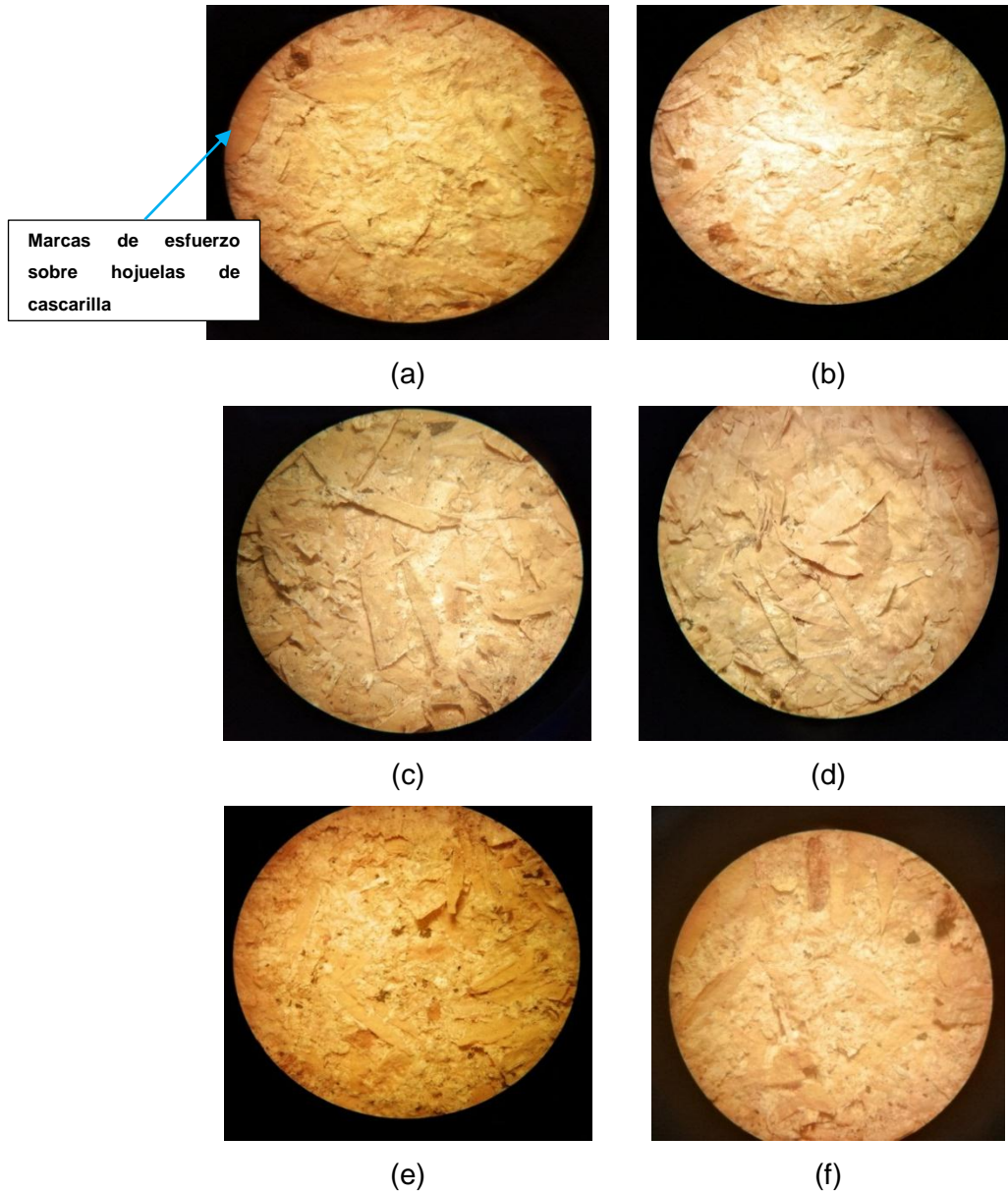
Fuente: Autor.

Figura 3.20: Microscopías ópticas en sentido transversal para briquetas con media resistencia. Las figuras (a) y (b) corresponde a probetas AIIIO; (c) y (d) corresponden a las probetas BIIO; (e) y (f) son probetas BIIX.



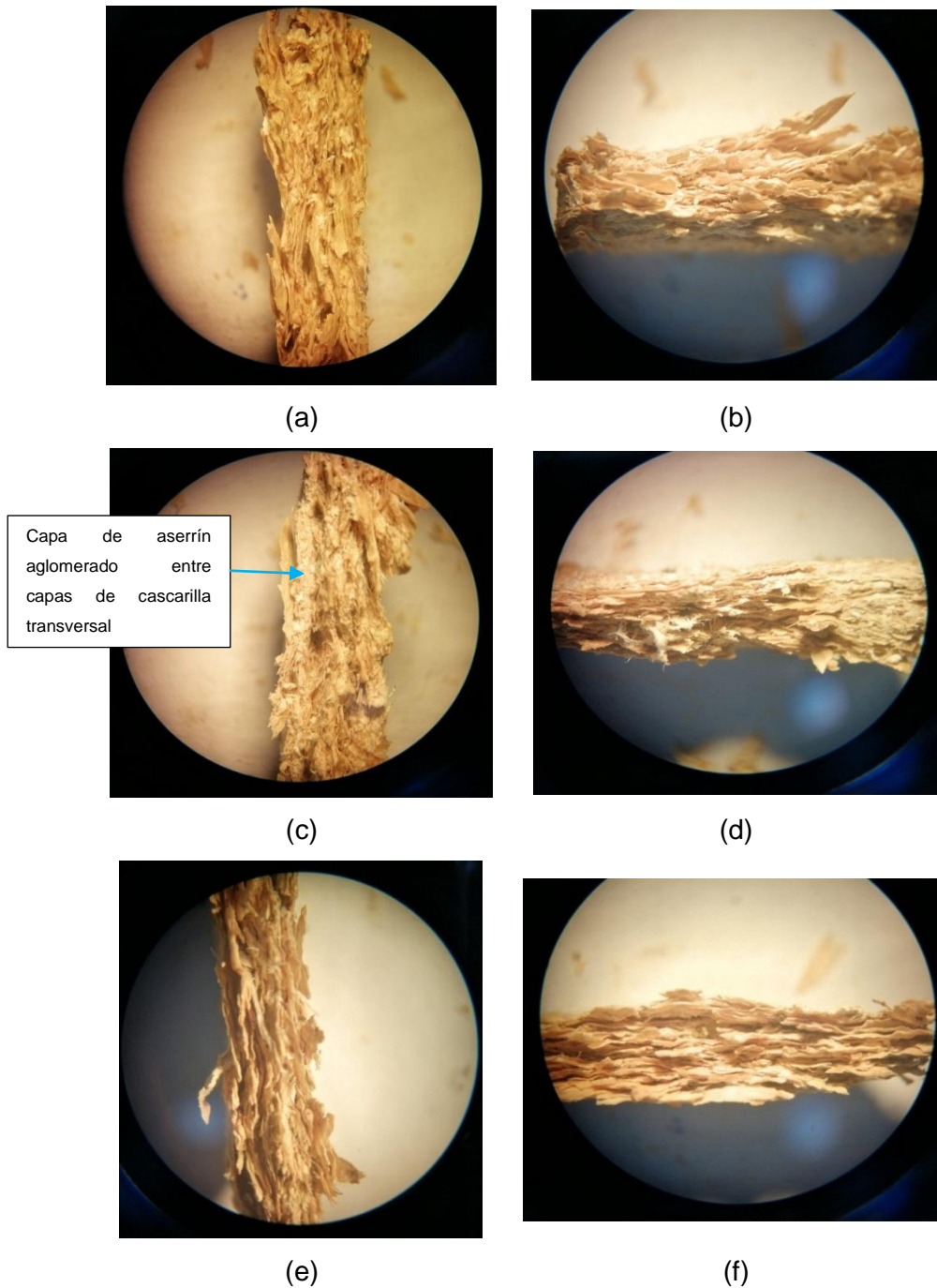
Fuente: Autor.

Figura 3.21: Microscopías ópticas en sentido transversal para briquetas con alta resistencia. Las figuras (a) y (b) corresponde a probetas AIIIX; (c) y (d) corresponden a las probetas CIIIX; (e) y (f) son probetas AIIX.



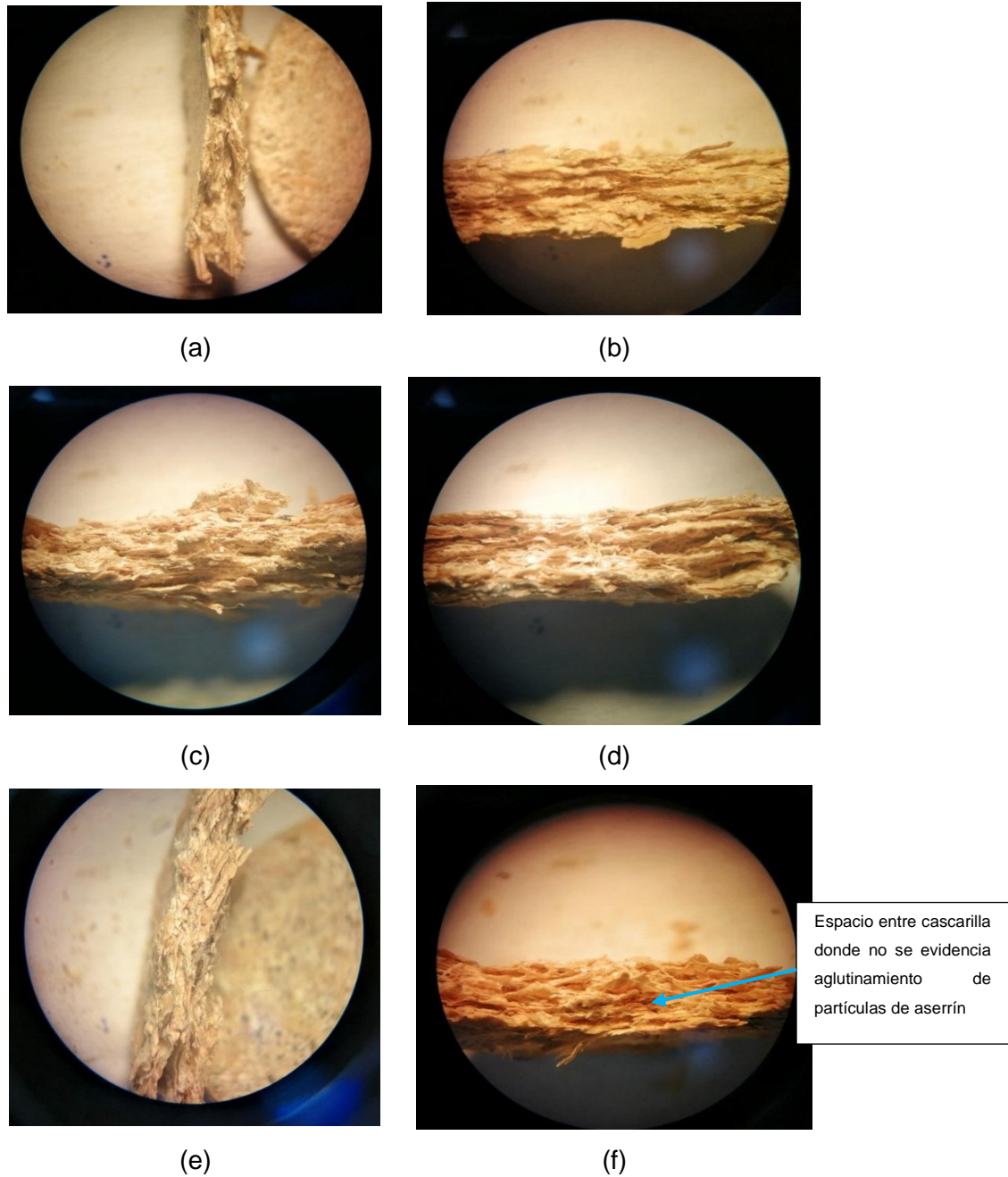
Fuente: Autor.

Figura 3.22: Microscopías ópticas en sentido longitudinal para briquetas con baja resistencia. Las figuras (a) y (b) corresponde a probetas CIIO; (c) y (d) corresponden a las probetas AIO; (e) y (f) son probetas CIO.



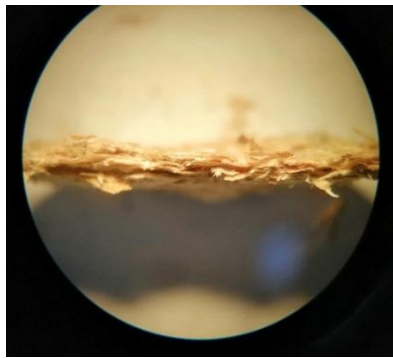
Fuente: Autor.

Figura 3.23: Microscopías ópticas en sentido longitudinal para briquetas con media resistencia. Las figuras (a) y (b) corresponde a probetas AIIIO; (c) y (d) corresponden a las probetas BIIO; (e) y (f) son probetas BIIX.

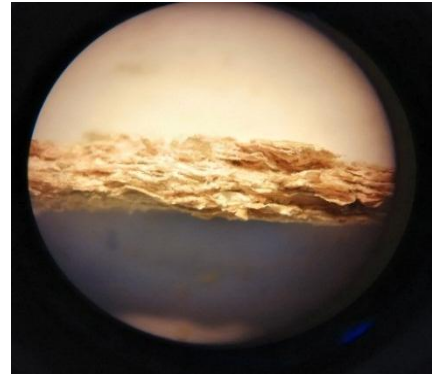


Fuente: Autor.

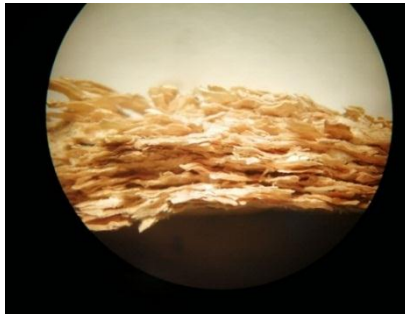
Figura 3.24: Microscopías ópticas en sentido longitudinal para briquetas con alta resistencia. Las figuras (a) y (b) corresponde a probetas AIIIX; (c) y (d) corresponden a las probetas CIIIX; (e) y (f) son probetas AIIX.



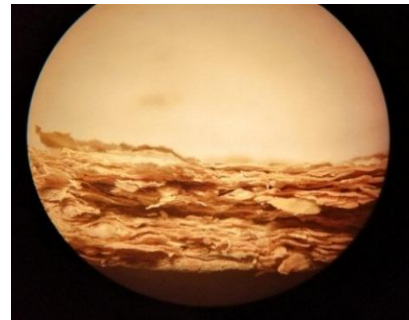
(a)



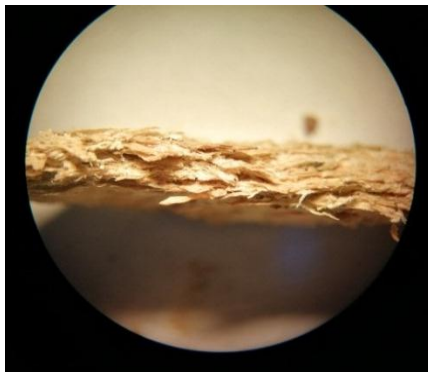
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Fuente: Autor.

3.2.6 Otros resultados

- **Análisis del contenido de humedad**

Se midió el contenido de humedad inicial de la materia prima, obteniéndose un valor promedio en la cascarilla de arroz de 10,24 %, mientras que para el aserrín de pino se obtuvo un contenido de humedad de 10,80 %. Estos valores corresponden a la humedad en el estado natural de la materia prima, siendo más bien bajo, lo que favorece las condiciones de almacenamiento y conservación de la misma.

Estos contenidos bajos de humedad favorecen los procesos de secado y transporte de agua al interior de las partículas usualmente descrito por modelos basados en la ley de Fick [66], que se llevan a cabo al fabricar las briquetas, (proceso que involucra temperatura y presión). Para este ensayo se realizaron 6 repeticiones de cada uno de los tratamientos, por medio del analizador de humedad OAHUS MB45, tomando una pequeña muestra entre 0,5 g y 1,2 g que viniera de diferentes partes de cada tipo de briketa.

Los resultados de contenido de humedad para las probetas ya fabricadas se pueden observar en el Anexo E. En general se obtuvieron valores de humedad entre 1 % y 6 %. Sin embargo, no se logró obtener un patrón de comportamiento para el contenido de humedad en las briquetas dado que la variabilidad de las respuestas no permitió desarrollar un modelo apropiado. Se podría contemplar que el modelo planteado no es apropiado para las variables, o bien que las variables seleccionadas como variables independientes no están asociadas al contenido de la humedad.

- **Análisis de coeficiente de Poisson**

Para el análisis del coeficiente de Poisson se consideró que el aserrín que compone la matriz de las briquetas posee un orden y ubicación aleatoria dentro del cuerpo de la briketa, por lo que las propiedades que podrían asumirse de un material ortotrópico empiezan a actuar en orientaciones distintas, en consecuencia esta característica es mucho menos evidente en la briketa. Adicionalmente, la medición se encuentra restringida por el montaje disponible, por lo que solo es posible medir la deformación en

planos longitudinales de la briqueta, donde debido al efecto de la simetría de la briqueta los resultados de las mediciones son muy semejantes para los diferentes planos longitudinales.

Se realizaron mediciones para cargas de 1000, 2000, 3000, 4000 y 5000 kgf (9,81, 19,61, 29,42, 39,23 y 49,03 kN), observando su deformación longitudinal y transversal, manteniendo una velocidad de carga de 5 mm/min. Dicho ensayo se practicó en las probetas que podían mostrar los mejores valores de resistencia, en este caso para probetas de baja proporción de cascarilla de arroz (tipo A con 25 %), verificando varios tratamientos con los tres niveles de tiempo de compactación y las dos temperaturas de fabricación definidos para el diseño de experimentos.

Los valores medios para el coeficiente de Poisson se encuentran entre 0,0574 y 0,1007. Estos valores de Poisson son comparables a otros materiales fibrosos o de tipo compuesto, por ejemplo el corcho, el cual presenta valores de coeficiente de Poisson cercano a cero [67]. En cuanto a estudios de este coeficiente en madera, aunque se suele decir que su valor es de alrededor 0,2 y 0,3 dependiendo de la dirección de la carga por su anisotropía y el tipo de madera, pero algunas investigaciones también han encontrado valores tanto negativos como relativamente cercanos a 0, ejemplo de esto es el estudio de Marmier, *et al.* [68] donde se encontró que en dirección horizontal a la fibra el valor de Poisson estaba entre -0,02 y -0,74, mientras que en sentido vertical se obtuvo 0,08 y 0,38.

Tabla 3.17: Resultados de coeficiente de Poisson para distintas briquetas.

	AIX-7			AIIX-5			AIX-12			AIIX-9			AIO-10		
F (kgf)	ϵ_{long}	ϵ_{axi}	ν	ϵ_{long}	ϵ_{axi}	ν	ϵ_{long}	ϵ_{axi}	ν	ϵ_{long}	ϵ_{axl}	ν	ϵ_{long}	ϵ_{ax}	ν
1000	0,0767	0,0039	0,0511	0,1094	0,0033	0,0302	0,1184	0,0043	0,0362	0,1134	0,0030	0,0261	0,1357	0,0046	0,0340
2000	0,1050	0,0062	0,0591	0,1456	0,0046	0,0317	0,1554	0,0076	0,0488	0,1498	0,0069	0,0461	0,1744	0,0069	0,0397
3000	0,1325	0,0105	0,0789	0,1728	0,0056	0,0325	0,1838	0,0106	0,0575	0,1771	0,0102	0,0576	0,2041	0,0122	0,0598
4000	0,1654	0,0167	0,1007	0,1978	0,0142	0,0718	0,2097	0,0162	0,0771	0,2042	0,0128	0,0628	0,2321	0,0165	0,0710
5000	0,2022	0,0431	0,2134	0,2212	0,0267	0,1209	0,2384	0,0363	0,1522	0,2331	0,0326	0,1398	0,2619	0,0326	0,1246
Media			0,1007			0,0574			0,0744			0,0665			0,0658

Al analizar el comportamiento de las mediciones, se aprecia que el coeficiente de Poisson tiende a estabilizarse para los valores de carga máximos evaluados (49 kN), y en consecuencia para las deformaciones mayores. En la Tabla 3.17 se presentan los resultados de las 5 muestras medidas, donde se observa el comportamiento que tiende a estabilizar el coeficiente a valores más altos de carga y deformación, siendo en estos casos con valores próximos a 0,12 y 0,15, que coinciden con los promedios máximos encontrados.

Algunas de las variables que en otros estudios pueden justificar el comportamiento del coeficiente de Poisson, a parte de la anisotropía, son la porosidad del material e incluso la velocidad de carga, que alteran momentáneamente el valor hasta que este tiende a un estado de equilibrio [69].

3.3 Resultados de las simulaciones computacionales

En esta sección se describe los resultados obtenidos por las simulaciones computacionales planteadas para describir el comportamiento mecánico de la briqueta con base en los resultados experimentales. En estas simulaciones se busca que los modelos puedan ajustarse lo mejor posible a los resultados experimentales considerando las limitaciones que el modelo ofrece.

3.3.1 Modelado de material

Como se ha definido en la sección de materiales y métodos, para definir el material se requieren las propiedades de la materia prima y de algunas de las variables correspondientes a los resultados experimentales. Estos valores se definieron a partir de los hallado en los antecedentes de investigaciones sobre la materia prima [62], [63], [64], y en los resultados de la presente investigación. Los valores para las variables requeridas se resumen en la Tabla 3.18.

Tabla 3.18: Resultados de cálculo de razón de cambio en la densidad de las briquetas y las densidades teóricas.

Tratamiento-Nombre briqueeta	AIO	BIO	CIO
Porcentaje de masa de cascarilla de arroz	25	50	75
Densidad briqueeta (kg/m ³)	1124,25	1097,08	1069,91
Módulo elástico aserrín de pino (MPa) [62]	320	320	320
Coefficiente de Poisson para aserrín de pino [62]	0,016	0,016	0,016
Densidad aserrín de pino (kg/m ³)	396,36	396,36	396,36
Módulo elástico cascarilla de arroz (MPa) [64]	2600	2600	2600
Coefficiente de Poisson para cascarilla de arroz [64]	0,04	0,04	0,04
Densidad Cascarilla de Arroz (kg/m ³)	279,75	279,75	279,75
Altura Briqueeta(mm)	47,63	48,67	49,54
Diámetro Briqueeta (mm)	30,18	30,18	30,20

Siguiendo las ecuaciones desde la (2.6) hasta la (2.14), se calcula la razón de cambio en la densidad y la densidad teórica de la cascarilla y el aserrín tras el proceso de densificación para cada tipo de briqueeta. Los valores calculados se encuentran en la Tabla 3.19.

Tabla 3.19: Resultados de cálculo de la razón de cambio en la densidad de las briquetas y las densidades teóricas.

Muestras	%cascarilla	$\Delta\rho$	ρ' . aserrín (kg/m ³)	ρ' . cascarilla (kg/m ³)
AIO	25	3,13	1241,41	876,18
BIO	50	3,34	1325,73	935,70
CIO	75	3,54	1404,39	991,22

En los resultados computacionales obtenidos la razón de cambio de la densidad, $\Delta\rho$, aumenta para una mayor proporción de cascarilla de arroz, dicho comportamiento que implica un aumento de la densidad de las briquetas con el aumento de cascarilla en la mezcla de biomasa es opuesto a lo observado a nivel experimental, donde la densidad aparente de la briqueeta tiende a decrecer con el aumento de la proporción de cascarilla en la mezcla como se observa en la Figura 3.3. Este comportamiento en el modelo se justifica por la diferencia en el tamaño de partícula entre la cascarilla y el aserrín de pino, donde al ser más grande la cascarilla que el aserrín y al mantener un volumen de briqueeta semejante, la razón de cambio debe aumentar para compensar la diferencia por

el mayor tamaño de partícula que se involucra. También se debe considerar que el modelo realiza la idealización geométrica de las partículas, lo que reduce el espacio entre las partículas de cascarilla de arroz y las de aserrín, efecto que no se da en las condiciones reales de la briqueta

Además, se tiene en cuenta que el modelo no está considerando efectos de porosidad dentro de la briqueta, por lo que este comportamiento no coincide completamente con lo observado en los ensayos experimentales, donde la densidad tiende a bajar con el aumento de cascarilla, por lo cual el modelo compensa este espacio ocupado por el aire en la porosidad con más material del que realmente hay y que corresponde en general a reducir el volumen de cascarilla dentro de estos espacios en la briqueta final.

Definidos los valores de propiedades mecánicas del material en su estado densificado se procede a modelar los elementos que interactúan en el material compuesto. Se definió la cascarilla como la fibra en el material compuesto; sin embargo, la proporción de cascarilla de arroz no corresponde exactamente a la cantidad de fibra en volumen para la briqueta, para esto se calculó el porcentaje de fibra equivalente por la ecuación (2.15). Los resultados se resumen para cada tipo de briqueta en la Tabla 3.20.

Tabla 3.20: Resultados de porcentaje de fibra para cada tipo de briqueta en modelo computacional.

Muestras	$V_{cascarilla} (m^3)$	$V_{mezcla} (m^3)$	porcentaje de fibra (%)
AIO	0,000034	0,00010672	32
BIO	0,000068	0,00011645	59
CIO	0,000102	0,00012574	81

De los resultados del porcentaje de fibra se tiene un comportamiento acorde a lo esperado, donde la cantidad de fibra aumenta con la cantidad de cascarilla. Para estos cálculos se consideró la relación volumétrica, con base en el cálculo de propiedades de los materiales después de la densificación, por lo que los valores obtenidos son mayores a la proporción de cascarilla debido a que parte de esta proporción de fibra corresponde a la porosidad en la briqueta real que no es tenida en cuenta dentro del modelo computacional.

Por último, el modelo considera la cascarilla como fibras cilíndricas, por lo que las dimensiones deben tratar de ajustarse a una geometría equivalente. Se definió que la longitud de la fibra coincida con la longitud promedio de la cascarilla mientras que se recalculo el diámetro equivalente asumiendo los valores promedio de masa de la cascarilla y la definición de densidad (ecuación (2.16)) y de volumen del cilindro (ecuación (2.17)). De la combinación de estas se calculó el diámetro equivalente por la ecuación (2.18), cuyos resultados se muestran en la Tabla 3.21.

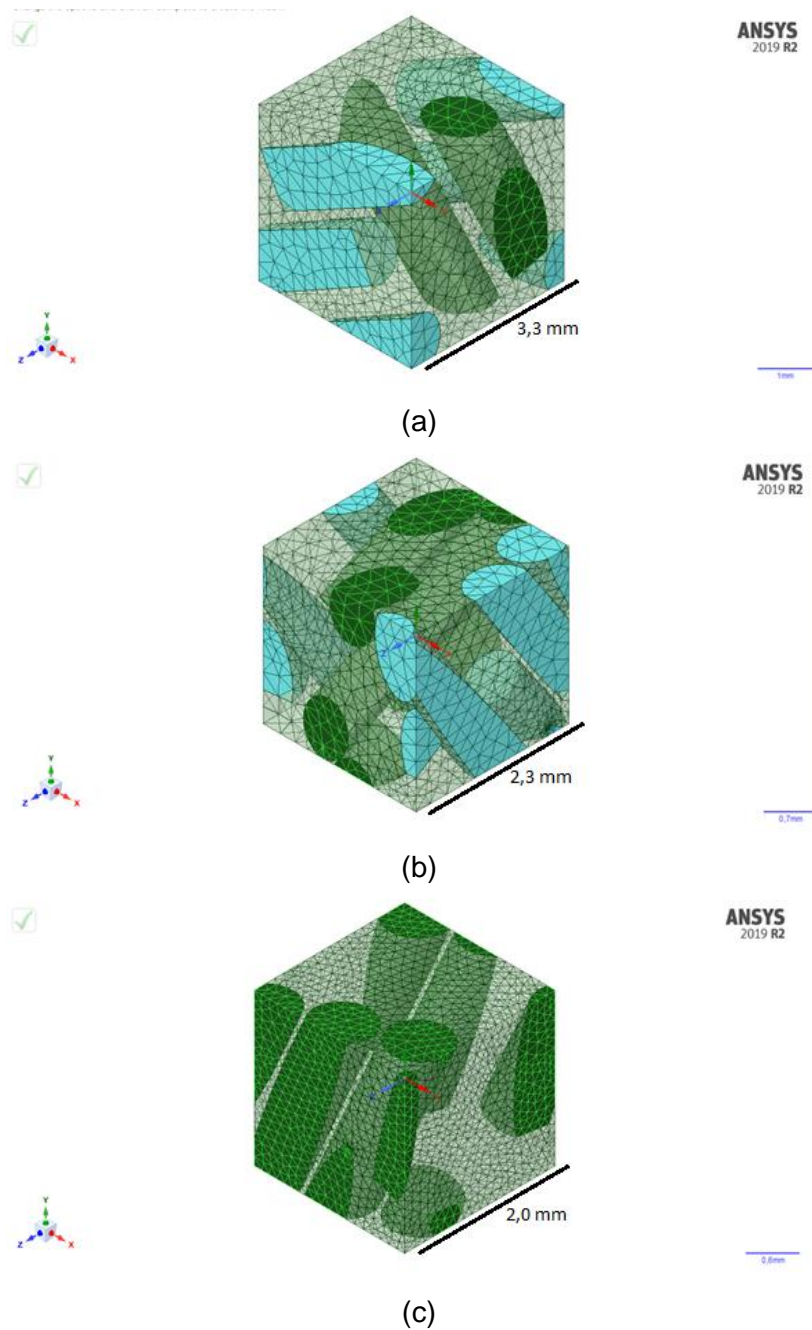
Tabla 3.21: Diámetro equivalente de fibras de cascarilla de arroz para briquetas modelo.

Muestras	m_{cu} (kg)	ρ_{cu} (kg/m ³)	$\rho_{cu} \cdot \Delta\rho$ (kg/m ³)	V_{fu} (x10 ⁻⁹ m ³)	L_f (m)	ϕ_f (m)	L_f / ϕ_f
AIO	0,0000035	279,75	388,12	9,01783	0,00714	0,000844	8,46
BIO			414,16	8,45084		0,000817	8,74
CIO			438,96	7,97339		0,000794	9,00

En el modelo se ajustó el mallado para la simulación dejando un tamaño de elemento fijo de 100 μ m. También se seleccionó un modelo de comportamiento ortotrópico, donde en cada dirección se obtendrán valores particulares para las propiedades mecánicas dependientes del sentido de la fibra, especialmente el módulo elástico y el coeficiente de Poisson.

La Figura 3.25 muestra los resultados gráficos de como se observa el modelo computacional para cada tipo de biqueta. Como se ha comentado anteriormente la matriz corresponde al aserrín mientras que las fibras tubulares corresponden a cascarilla de arroz. En las imágenes se observa un pequeño volumen para cada tipo de material.

Figura 3.25: Enmallado del material compuesto que representa los tres tipos de briquetas modeladas. (a) AIO, (b) BIO, (c) CIO.



Fuente: Autor.

La Tabla 3.22 resume los valores de las propiedades mecánicas obtenidas para cada eje principal del material, el eje y en este caso es el que coincide con el eje longitudinal de la briqueta. Como se había especificado en el modelo ortotrópico, el eje con módulos

elásticos más alto es “y”, posiblemente favorecido por efectos como una dirección predilecta para las fibras de cascarilla. En este sentido se aprecian valores similares a los encontrados experimentalmente, donde el tipo A presenta valores de entre 666,95 MPa y 722,34 MPa, el tipo B tiene valores de 729,71 MPa hasta 754,58 MPa y el tipo C valores en el rango de 704,97 MPa a 771,92 MPa. Es evidente la diferencia en los resultados de la simulación entre 100 y 130 MPa por debajo de los valores experimentales. Sin embargo, se mantiene la tendencia que a mayor proporción de cascarilla corresponde una mayor magnitud del módulo elástico.

Tabla 3.22: Resultados de propiedades mecánicas para distintos tipos de briquea.

Muestra	Módulo Elástico (MPa)			Coeficiente de Poisson			Densidad real (kg/m ³)
	Ex	Ey	Ez	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{xz}	
AIO	598,85	619,95	496,30	0,080	0,049	0,048	1140
BIO	543,43	681,82	644,79	0,383	0,045	0,121	1190
CIO	562,78	804,98	464,99	0,042	0,052	0,032	1290

Respecto a las respuestas del coeficiente de Poisson, se observa también una concordancia, ya que los valores promedios experimentales oscilaban entre 0,03 y 0,13, el único resultado que puede considerarse atípico sería el que tiene el coeficiente para la briquea BIO en el sentido “xy”, cuyo valor es cercano a tres veces el valor experimental máximo encontrado, que puede estar influyendo en los resultados de las simulaciones y ser una de las causas de las diferencias entre los valores obtenidos experimentalmente y por medio de la simulación.

La densidad aparente arrojada por las simulaciones muestra un comportamiento un poco distinto a los resultados experimentales, pese a que la diferencia no es alta, siendo de 0,34 % (4 kg/m³) para las briquetas AIO (1136,07 kg/m³ vs. 1140 kg/m³, experimental vs. simulación), 6,82 % (76 kg/m³) para las briquetas BIO (1114,07 kg/m³ vs. 1190 kg/m³, experimental vs. simulación) y 17,29 % (191 kg/m³) para las briquetas CIO (1099,85 kg/m³ vs. 1290 kg/m³, experimental vs. simulación). Los valores de densidad aparente obtenidos en la simulación se comportan de manera contraria a los hallados

experimentalmente, donde la densidad aparente tiende a decrecer con el aumento de proporción de cascarilla de arroz en la mezcla. Igualmente se observa que a mayor proporción de cascarilla de arroz contenida en la briqueta, se presenta mayor diferencia entre los resultados experimentales y de simulación. Este comportamiento puede deberse a que el modelo del material no tiene en cuenta el efecto de la porosidad en la mezcla de biomasa, así como no tiene en cuenta los efectos de interacción entre partículas de los dos materiales que dejan espacios que reducen la densidad de la briqueta.

3.3.2 Modelo de caída de briqueta

El modelo implementado para la caída de las briquetas, toma en cuenta las briquetas modeladas a partir de los materiales simulados mediante el modelo de material y bajo las condiciones descritas en materiales y métodos para el modelo de caída, donde se definieron las variables independientes del tipo de briqueta, el material de la superficie de impacto, la altura de caída y el ángulo de impacto. Se ajustó la malla del modelo mediante convergencia, para lograr independencia de los resultados con el tamaño de esta. Se obtuvo que el tamaño apropiado para las simulaciones correspondía a una malla de 6758 elementos con 8280 nodos.

Los resultados de la simulación se resumen en las tablas: Tabla 3.23, Tabla 3.24 y Tabla 3.25. Estas se encuentran organizadas por el tipo de briqueta, la superficie de impacto, la altura de caída y el ángulo de impacto con las respectivas respuestas de cada simulación, donde se consideró el esfuerzo sobre la briqueta, la deformación y la energía específica de deformación.

Tabla 3.23: Resultados para modelo del tipo de briqueta A

Tipo de briqueta	Superficie de impacto	Altura de caída (m)	Angulo de impacto (°)	Esfuerzo equivalente máx. (MPa)	Deformación equivalente máx. (m/m)	Energía específica de deformación máx. (J/kg)
AIO	Acero estructural	2	0	0,750	0,001043	2,59
			45	0,214	0,000593	448,90
			90	0,321	0,000445	17,47

Tipo de briketa	Superficie de impacto	Altura de caída (m)	Angulo de impacto (°)	Esfuerzo equivalente máx. (MPa)	Deformación equivalente máx. (m/m)	Energía específica de deformación máx. (J/kg)	
		5	0	2,050	0,002848	8,76	
			45	0,243	0,000585	808,06	
			90	0,946	0,001315	33,25	
	Concreto	2	2	0	0,574	0,000797	3,17
				45	0,256	0,000645	468,49
				90	0,320	0,000445	18,45
		5	5	0	2,003	0,002783	8,21
				45	0,246	0,000652	828,45
				90	0,942	0,001309	35,06

Tabla 3.24: Resultados para modelo del tipo de briketa B

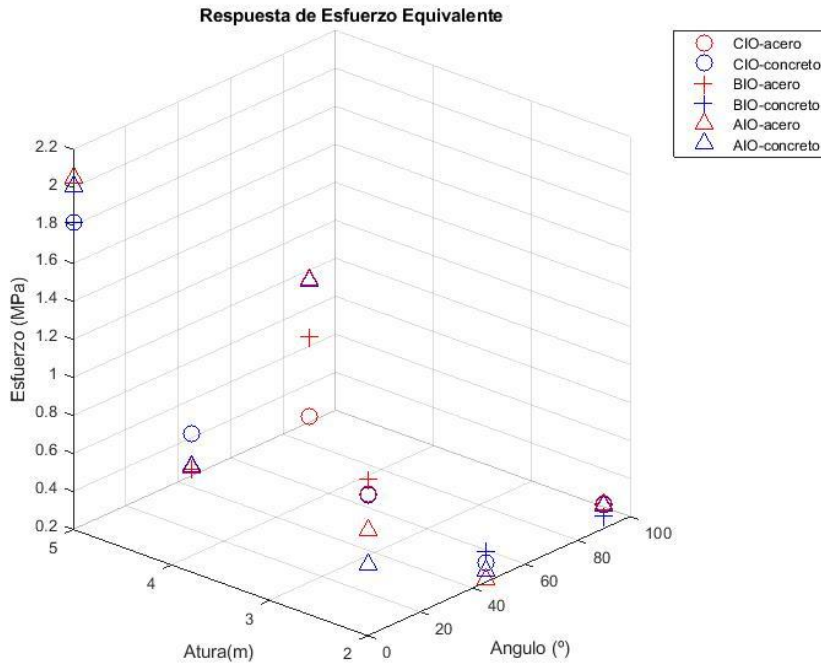
Muestra	Superficie de impacto	Altura de caída (m)	Angulo de impacto (°)	Esfuerzo equivalente máx. (MPa)	Deformación equivalente máx. (m/m)	Energía específica de deformación máx. (J/kg)	
BIO	Acero estructural	2	0	1,023	0,001250	2,62	
			45	0,361	0,000772	367,43	
			90	0,266	0,000325	17,11	
		5	5	0	1,817	0,002219	6,87
				45	0,232	0,000514	635,63
				90	0,650	0,000794	30,01
	Concreto	2	2	0	1,022	0,001248	2,62
				45	0,361	0,000770	367,16
				90	0,266	0,000325	17,09
		5	5	0	1,817	0,002220	6,87
				45	0,231	0,000514	635,16
				90	0,649	0,000792	29,97

Tabla 3.25: Resultados para modelo del tipo de briqueta C

Muestra	Superficie de impacto	Altura de caída (m)	Angulo de impacto (°)	Esfuerzo equivalente máx. (MPa)	Deformación equivalente máx. (m/m)	Energía específica de deformación máx. (J/kg)
CIO	Acero estructural	2	0	0,944	0,001030	3,82
			45	0,303	0,000981	407,99
			90	0,327	0,000356	19,16
		5	0	1,814	0,001977	10,32
			45	0,422	0,001063	852,95
			90	0,231	0,000251	36,56
	Concreto	2	0	0,942	0,001027	3,81
			45	0,303	0,000980	407,78
			90	0,326	0,000356	19,14
		5	0	1,815	0,001978	10,31
			45	0,422	0,001062	852,42
			90	0,230	0,000250	36,52

La Figura 3.26 muestra los resultados del esfuerzo máximo encontrado para las distintas condiciones modeladas, lo primero a destacar es que el material de la superficie de impacto parece dar una respuesta independiente del tipo de briqueta, altura o ángulo de impacto, ya que las diferencias encontradas entre ambos materiales (acero y concreto) son mínimas o nulas en muchos de los casos, para las tres variables respuestas consideradas. Sin embargo, es posible observar un esfuerzo equivalente ligeramente mayor en el impacto contra la placa metálica y una mayor energía específica de deformación en el impacto contra la placa de concreto. El efecto insignificante del tipo de material del suelo sobre la respuesta de la caída de las briquetas puede deberse a que las condiciones de la altura de lanzamiento y la masa de las briquetas hace que la energía del impacto no sea crítica para generar una diferencia significativa entre los dos tipos de materiales de la superficie de impacto.

Figura 3.26: Resultados para el esfuerzo equivalente máximo.



Fuente: Autor.

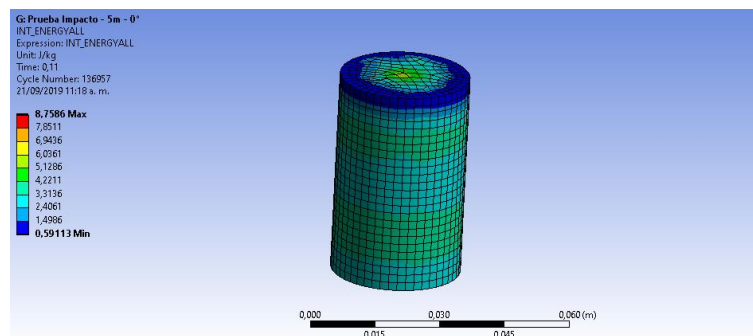
El valor pico del esfuerzo equivalente muestra un comportamiento distinto según la altura de caída y el ángulo de impacto. Para una altura de dos metros se observa que en los tres casos de estudio ocurre un decrecimiento en el esfuerzo, donde el mayor esfuerzo se presenta cuando la briketa cae en la base plana (0°), mientras que este se reduce al caer en la superficie lateral curva de la briketa (90°). Para la caída a cinco metros se ve un comportamiento diferente según el tipo de briketa. Las briquetas del tipo C con mayor cantidad de cascarilla, mantienen el comportamiento de disminución de esfuerzos de acuerdo al ángulo de impacto. Para las briquetas con menor proporción de cascarilla (tipo A y B), el comportamiento presenta el mayor esfuerzo en el impacto con la cara plana (0°), el cual decrece a un mínimo en el ángulo de 45° y vuelve a crecer ligeramente al caer en un ángulo de 90°.

El análisis de la gráfica de esfuerzos equivalentes máximos (Figura 3.26) señala que hay más de una sola variable interactuando en el modelo, pues el comportamiento general de

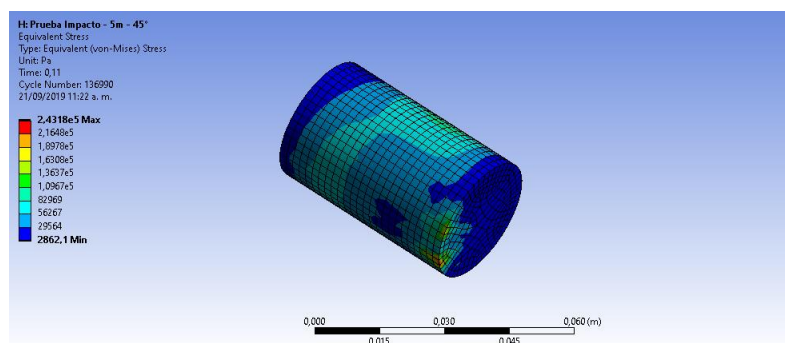
los esfuerzos equivalentes se ve alterado por la altura de lanzamiento, asociado a un mayor impacto sobre la briqueta y a una mayor energía de deformación; por el ángulo de impacto, asociado a la dirección de aplicación de la fuerza de impacto y por tanto a la dirección y distribución de los esfuerzos, los cuales a su vez dependerán de las propiedades ortotrópicas del material de la briqueta; y por el tipo de briqueta, esto último podría indicar una correlación con la densidad aparente, módulos elásticos o coeficiente de Poisson, que para el modelo de material de briqueta poseen valores ortotrópicos y afectan la respuesta del material.

La Figura 3.27 muestra un ejemplo de la distribución que los esfuerzos equivalentes toman según el ángulo de impacto. La forma de estas distribuciones se mantiene aproximadamente igual para los distintos tipos de briqueta y para las distintas alturas de lanzamiento, variando principalmente la magnitud de las respuestas. Estas distribuciones están asociadas a como la fuerza de impacto puede descomponerse en las distintas orientaciones para el sistema de referencia de la simulación, la cual genera esfuerzos que se distribuyen en direcciones radial, tangencial y longitudinal en la briqueta. En el caso del ángulo de impacto a 0° , la fuerza de impacto coincide con la orientación longitudinal por lo que el esfuerzo principal se encuentra en esta dirección y es igual al esfuerzo equivalente, además las propiedades del material se mantienen y afectan la respuesta de una manera específica. La fuerza de impacto a un ángulo de caída de 45° se descompone en las tres direcciones principales, haciendo que el esfuerzo para cada uno de los componentes sea distinto debido a las propiedades mecánicas ortotrópicas y al valor del componente de la fuerza de impacto, por lo que su esfuerzo equivalente es menor y los esfuerzos tienden a distribuirse en una dirección paralela a planos de 45° . Por su parte, los esfuerzos en el impacto a 90° también dependen de la descomposición de la fuerza de impacto, siendo en este caso las direcciones principales la radial y la tangencial de la briqueta, esta última componente favorece que los esfuerzos totales del impacto se distribuyan en el sentido de la superficie curva de la briqueta actuando de manera semejante a un arco, de tal forma que el esfuerzo equivalente es menor, adicional a este comportamiento también se debe considerar el efecto de las propiedades ortotrópicas que modifican los esfuerzos resultantes.

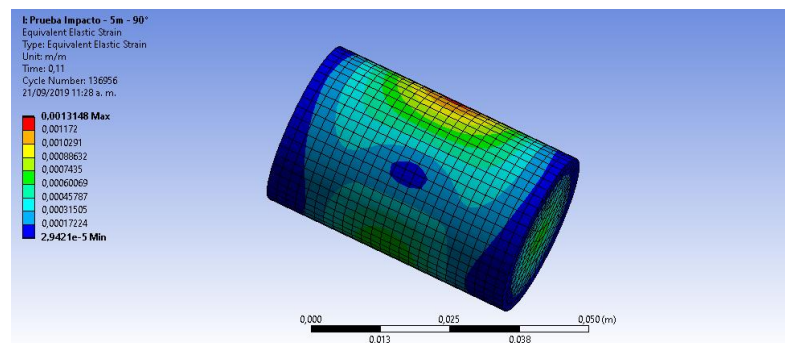
Figura 3.27: Distribución de los esfuerzos para biqueta AIO en ángulos de impacto (a) 0°, (b) 45° y (c) 90°.



(a)



(b)



(c)

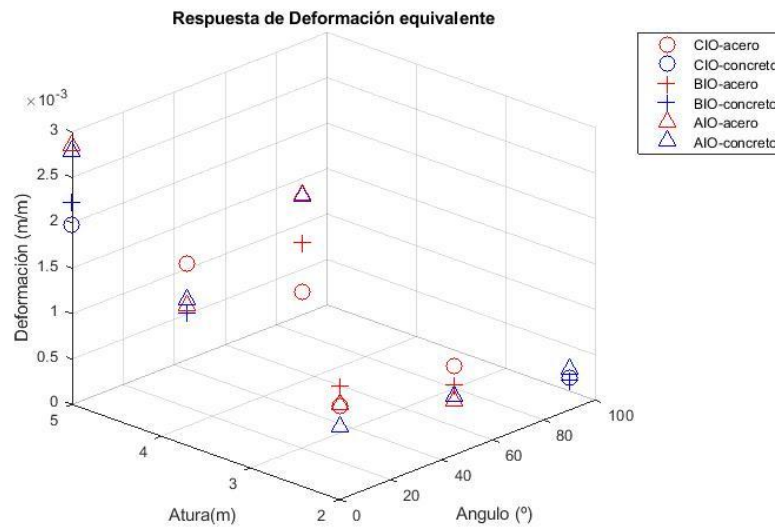
Fuente: Autor.

En las briquetas lanzadas desde una altura de cinco metros y de menor proporción de cascarilla de arroz (AIO y BIO) el comportamiento de los esfuerzos muestra que, para un ángulo de impacto de 90 °, los esfuerzos equivalentes máximos tienden a aumentar nuevamente, si bien el comportamiento de la distribución de esfuerzos se mantiene como

lo explicado anteriormente, se asume que el aumento de la fuerza de impacto y en consecuencia de la energía de deformación en combinación con las propiedades ortotrópicas hacen que estas magnitudes de esfuerzos equivalentes sean mayores.

En cuanto a la respuesta de la deformación (ver Figura 3.28), se puede observar como la deformación es mayor en el impacto desde cinco metros que en la de dos metros, con comportamientos distintos para cada nivel de altura. Para la caída desde cinco metros el comportamiento muestra que las briquetas de mayor proporción de cascarilla de arroz (tipo C) decrece su valor de deformación cuando el ángulo de caída aumenta, esto puede deberse en parte a la dirección preferencial que el modelo presenta para las fibras, ya que en este sentido se tiene los menores módulos de rigidez por lo que la capacidad de deformación es menor en esta dirección. En el impacto a cinco metros también se ve, para las briquetas AIO y BIO, como la deformación se reduce con el ángulo de impacto a 45° y vuelve a aumentar para el impacto a un ángulo de inclinación de 90°.

Figura 3.28: Resultados para la deformación máxima



Fuente: Autor.

Respecto al impacto desde dos metros se observa un comportamiento donde las briquetas de menor proporción de cascarilla (tipos A y B), se comportan de manera decreciente encontrando la mayor deformación al caer en la cara plana (0°) mientras esta

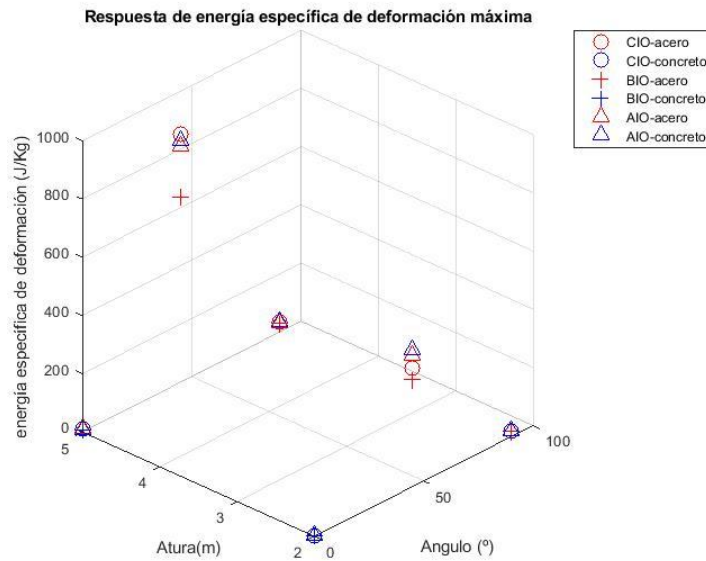
decrece al aumentar el ángulo de impacto, siendo la mínima deformación en el ángulo de impacto de 90°; también se destaca, que mientras varia la proporción de cascarilla (tipo de briketa), la variación entre las deformaciones de acuerdo al ángulo de impacto también decrece, por lo que parece haber una menor diferencia en la deformación en cuanto menor cantidad de cascarilla posee la briketa. La briketa tipo CIO, muestra una máxima deformación en el ángulo de impacto de 45°, posiblemente debido a que en este caso la deformación se da en una región mucho más puntual.

El comportamiento entre esfuerzos equivalentes y deformaciones parece estar asociado como se esperaría de un modelo elástico, ya que las gráficas muestran un comportamiento similar entre respuestas de esfuerzo y deformación. Esta condición se presenta mediante la correlación entre las variables de esfuerzo y deformación a través de un tensor de rigidez, por tanto, los análisis realizados al considerar la distribución de esfuerzos y las propiedades ortotrópicas del material para el esfuerzo equivalente máximo son aplicables de manera semejante al modelo de deformación.

Finalmente, se obtuvieron los resultados de la energía específica de deformación en la briketa al impacto contra una superficie (ver Figura 3.29). En este caso, los comportamientos a la caída desde dos y cinco metros son bastante semejantes para las distintas briquetas, observándose una mayor energía asociada a la mayor altura de lanzamiento, donde la energía específica de deformación a cinco metros es aproximadamente el doble con respecto a la energía que se obtuvo para los dos metros de altura (ver energía específica de deformación en Tabla 3.23, Tabla 3.24 y Tabla 3.25).

La mayor energía se presentó a los 45° de ángulo de impacto, posiblemente porque en esta condición es donde se da la menor área de contacto y por tanto la energía absorbida por la briketa durante el impacto, está mucho más concentrada en una región de la masa que respecto a los impactos a 0° y a 90°.

Figura 3.29: Resultados para la energía específica de deformación máxima.



Fuente: Autor.

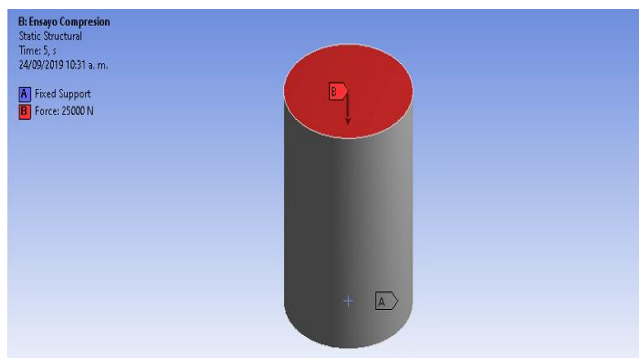
También se ve que la briqueta de media proporción (tipo BIO) es la que muestra menor absorción de energía, 367 J/kg, respecto a los otros dos tipos de briquetas probadas, las cuales presentaron valores muy similares, 852 J/kg para CIO y 828 J/kg para AIO.

La energía debida a la fuerza de impacto en la briqueta, se transforma en energía de deformación absorbida por esta, que se transporta en el interior de la misma a modo de ondas elásticas que estarían asociadas a la deformación y esfuerzos que sufre el cuerpo.

3.3.3 Modelo de compresión

El montaje del modelo descrito para la simulación a compresión no confinada de la briqueta es el mostrado en la Figura 3.30, donde se observan las cargas y restricciones para modelar las condiciones de un ensayo de compresión.

Figura 3.30: Montaje de condiciones de simulación del modelo a compresión



Fuente: Autor.

Los resultados de los modelos a compresión se muestran en la Tabla 3.26, donde se presentan los valores de carga máxima alcanzada y la deformación correspondiente a dicha carga máxima.

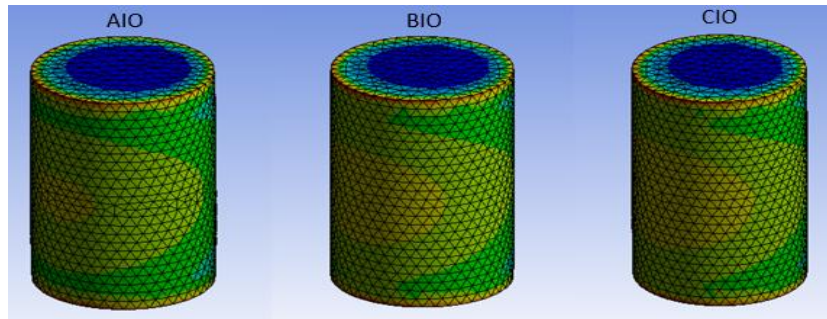
Tabla 3.26: Resultados para los esfuerzos equivalentes máximos y deformación equivalente máxima para el ensayo de compresión.

Muestras	Esfuerzo equivalente máx. (MPa)	Deformación equivalente máx. (m/m)
AIO	88,54	0,123
BIO	88,56	0,108
CIO	88,56	0,096

Se encontró que los esfuerzos equivalentes obtenidos en la simulación (ver Figura 3.31) son muy cercanos entre sí por lo que casi no hay variación en este sentido. Sin embargo, los valores arrojados por el modelo son similares a los valores obtenidos experimentalmente con esfuerzos máximos, con una variación del 4,7 % para AIO (84,54 MPa vs. 88,54 MPa, experimental vs. simulación), del 2,9 % para BIO (91,16 MPa vs. 88,56 MPa, experimental vs. simulación) y del 3,2 % para CIO (85,83 MPa vs. 88,56 MPa, experimental vs. simulación). Se puede apreciar que los resultados de la simulación para el esfuerzo equivalente son similares independiente del tipo de briketa, sin

embargo se destaca el hecho que la diferencia con los resultados experimentales es muy pequeña, de menos del 5%, por lo cual se puede considerar que están dentro del rango de confiabilidad usado en los modelos de regresión para el esfuerzo máximo.

Figura 3.31: Distribución de los esfuerzos equivalentes de Von Mises en las briquetas sometidas a compresión.



Fuente: Autor.

La mayor diferencia se encuentra en la deformación equivalente máxima, donde la briqueta AIO tuvo un valor experimental promedio de 0,1962 (una variación del 37,3 % respecto al valor experimental), la briqueta BIO de 0,2169 (una variación del 50,2 % respecto al valor experimental) y la CIO de 0,2209 (una variación del 56,5 % respecto al valor experimental), valores que difieren ampliamente de los obtenidos en las simulaciones de compresión. Esta discrepancia puede deberse a factores como efectos no considerados de porosidad y a que la simulación considera un modelo principalmente lineal-elástico, mientras que las curvas de carga en los ensayos experimentales muestran un comportamiento ligeramente elasto-plástico para el material compuesto que conforma la mezcla de ambas biomásas.

4. Capítulo 4: Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

La búsqueda de nuevas alternativas energéticas que permitan alcanzar la condición de renovable al reutilizar o haga uso de material descartado en otros procesos, ha hecho que la biomasa, como fuente energética, sea considerada en distintas investigaciones para obtener material densificado como briquetas o pellets de alta calidad y que cumplan de mejor manera con su función. En este sentido, debido a la diversidad de fuentes de material disponible como fuente energética, la investigación de la biomasa se ve influenciada por el origen del material a utilizar, pues sus propiedades pueden afectar el comportamiento del producto final.

En el presente trabajo, se desarrolló la investigación sobre el comportamiento físico y mecánico de las briquetas de biomasa a partir de una mezcla de cascarilla de arroz y aserrín de pino donde, fue posible evidenciar que varias de las propiedades respuesta del proceso de densificación (índice de durabilidad, resistencia a la compresión, densidad aparente, módulo elástico, etc.) se ven influenciadas en distintos grados respecto a las variables independientes seleccionadas (temperatura, proporción de mezcla de biomasa y tiempo de compactación).

Fue posible obtener briquetas que cumplen con los estándares y normas internacionales para su evaluación de uso industrial, esto con la ventaja de no utilizar aglomerantes extra y utilizar la materia prima de biomasa tal cual sale como desecho de los procesos de producción. Es así como los valores de índice de durabilidad, cumplieron con las distintas normas como la DIN 51731 [34], [35], donde se establecen valores por encima del 97 %, obteniéndose valores entre 93 y 99%, con un valor medio de 97,7%. Al respecto, se encontró que el valor óptimo de 99.14 %, de acuerdo al modelo usado, se alcanza con

las variables independientes ajustadas a una temperatura de proceso de 110 °C y una proporción de cascarilla de arroz de 25 % en la mezcla de biomasa. Para este estudio se consideraron valores óptimos, aquellos que maximizaron los valores de las variables de respuesta mecánicas y físicas.

Al analizar los resultados se encontró que la temperatura del proceso fue la variable que presentó un efecto marcado sobre las variables de respuesta, especialmente, sobre la densidad aparente, módulo elástico y resistencia a compresión máxima; en este último caso, la única variable estadísticamente significativa. También la temperatura del proceso influyó en el índice de durabilidad, aunque el efecto predominante sobre esta variable lo tuvo la proporción de mezcla de biomasa.

Para la densidad aparente, los valores óptimos fueron: temperatura de 110 °C, tiempo de compactación de 60 s y una proporción de 0,25 de cascarilla de arroz sobre el total de la mezcla, correspondiente al tratamiento AIIIIX. Con lo anterior se logra una densidad aparente óptima de 1177,47 kg/m³. Para esta variable respuesta, los valores mínimos obtenidos están por encima de lo que muchas normas europeas consideran (como la ITEBE o la SS187120), mayores a 600 kg/m³ [34], lo cual muestra que el proceso en general cumple con estándares de clasificación para la densidad aparente de las briquetas.

La resistencia a la compresión máxima presentó un valor promedio de 64,82 kN. A partir del modelo, cuyos valores óptimos fueron temperatura de 110 °C, tiempo de compactación de 60 s y una proporción de cascarilla de arroz de 35,4 %, se obtuvo un valor de resistencia de 67,30 kN. Igualmente, el cálculo de los valores máximos para la respuesta en la variable módulo elástico, se obtuvo cuando las variables independientes toman valores de temperatura de proceso de 110 °C, tiempo de compactación de 60 s y la proporción de mezcla es de 61% de cascarilla de arroz.

Como parte del estudio, mediante ensayos preliminares, se encontró que era necesario realizar un precalentamiento y pre-mezcla de la biomasa. Estos favorecen los procesos de densificación haciendo que las briquetas obtenidas muestren un comportamiento más homogéneo y que fenómenos como el de activación de la lignina se produzca mucho

más fácilmente, lo cual mejora los efectos de aglomeración. También permiten reducir los tiempos necesarios dentro de la cámara de prensado, pues la mezcla de biomasa ya ingresa con una temperatura cercana a la definida para el tratamiento y el proceso de densificación se puede realizar mucho más rápidamente.

Durante el proceso de precalentamiento, igualmente, es importante considerar las propiedades térmicas de la biomasa así como la disposición en el envase de calentamiento, ya que se observó que al tratarse de materiales con baja conductividad térmica se puede concentrar el calor en ciertas zonas y provocar que el material alcance una temperatura suficientemente alta para que se queme parte de la mezcla de biomasa, lo cual puede afectar tanto mecánicamente como químicamente los resultados de las pruebas y la calidad de la briqueta final.

Otra variable respuesta fue el contenido de humedad en las briquetas, sin embargo, para los resultados no mostraron una respuesta que fuera estadísticamente significativa y permitiera desarrollar un modelo que asociara las variables independientes con el contenido de humedad final. Pero se logró observar que la humedad se reduce de valores entre 10 % y 11 % en la materia prima hasta una humedad de entre 1 % y 6 % en la briqueta, valores que entran dentro de los criterios de aceptación de distintos estándares internacionales.

De manera general, se puede concluir que para las briquetas de cascarilla de arroz y aserrín de pino, las variables de respuesta asociadas a las propiedades de resistencia mecánica, se consiguieron con las condiciones de niveles altos de temperatura de 110 °C, tiempo de compactación de 60 s y una baja proporción de cascarilla de arroz en la mezcla del 25%; siendo estas las condiciones bajo las cuales las funciones y comportamientos tienden a maximizarse en los rangos estudiados. Dicho comportamiento se justifica ya que la temperatura y compresión de partículas favorecen mecanismos de aglomeración como es la unión mediante la lignina así como entrelazado de fibras y fuerzas compresivas externas que mantienen unidas las partículas entre sí.

En las microscopias se observa una tendencia a organizar las láminas de cascarilla de forma que se generan capas transversales que se unen mediante la aglomeración y efectos de la compresión en conjunto con el aserrín, donde este último parece formar

gránulos más grandes debido al efecto de la lignina sobre el aserrín; dicha adhesión también parece ser la que une las láminas de cascarilla con los granos de aserrín dando la consistencia compacta de las briquetas. Las mismas láminas parecen entrecruzarse para darle mayor rigidez en el sentido longitudinal de la briqueeta, mientras que en el sentido transversal los fenómenos de aglomeración y fuerzas de compresión son las que actúan como resistencia en este sentido de corte, por tanto se encuentra mayor resistencia al corte en dirección longitudinal de las briquetas, que en el sentido radial.

Los modelos computacionales muestran aproximaciones aceptables; sin embargo se ven muy limitados por el efecto de otras variables secundarias como la porosidad que modifica de manera importante la respuesta especialmente en la densidad aparente de las briquetas y la resistencia máxima de las mismas.

Respecto a la simulación de impacto, se obtuvo que las condiciones más críticas para el impacto se daban para una altura de lanzamiento de 5 m. La respuesta fue pertinente puesto que al aumentar la altura de lanzamiento, la energía específica también se aumentó aproximadamente al doble. La evaluación del impacto a una altura de 5 m mediante el esfuerzo equivalente y la deformación equivalente presentó las condiciones más críticas con una caída en un ángulo de 0° , es decir por la cara plana. Sin embargo al evaluar el impacto mediante la energía específica de deformación, las condiciones más críticas se dieron con una caída en ángulo de 45° , es decir en el borde de la briqueeta. Igualmente se encontró que la briqueeta de media proporción de cascarilla en la mezcla (tipo BIO) mostró menor absorción de energía, 367 J/kg, respecto a los otros dos tipos de briquetas probadas las cuales presentaron valores muy similares, 852 J/kg para CIO y 828 J/kg para AIO independientes del tipo de material definido para la placa de impacto. A las condiciones dadas no se encontró diferencia significativa en el material de impacto (acero y concreto). Las briquetas que mayor esfuerzo soportaron fueron las de tipo A, mientras que las tipos C alcanzaban una resistencia menor.

4.2 Recomendaciones

El trabajo desarrollado ha permitido encontrar distintos resultados y conclusiones acerca de la mezcla de biomasa de cascarilla de arroz y aserrín de pino bajo condiciones

naturales de obtención. Los ensayos han brindado distintas respuestas, sin embargo se puede ampliar su descripción mediante ensayos de flexión a tres puntos para obtener información complementaria sobre el comportamiento a compresión y tensión en un sentido longitudinal de las briquetas, que puede mostrar una respuesta distinta a la observada en el ensayo de compresión, ya que como se ha observado en las microscopías realizadas se presenta una diferencia en el ordenamiento y empaquetamiento de la biomasa de acuerdo a la dirección que se considere.

También pueden realizarse pruebas de microscopía electrónica de barrido (SEM) para poder observar a una escala conveniente los mecanismos de unión y que se evidencie de una forma más clara el efecto de la lignina o el entrecruzamiento de las partículas que se encuentran en las briquetas.

En este trabajo se utilizó la materia prima en el estado que se obtiene como producto de desecho de los procesos de producción, obteniendo resultados viables y de calidad aceptable por algunos estándares. Sin embargo, sería interesante también estudiar que efecto tendría un pre-procesamiento de la materia prima mediante molado o pulverizado para que las partículas tanto de cascarilla de arroz como de aserrín posean un tamaño más uniforme y verificar que cambios se producen sobre las variables de respuesta o en el proceso de aglomeración.

En los resultados del ensayo de resistencia a compresión máxima se evidenciaron algunos valores desplazados respecto a los valores medios de la respuesta, dichos puntos coinciden con un tiempo de fabricación y almacenamiento distinto en comparación a la mayoría de las muestras evaluadas. Esta diferencia podría indicar un efecto del tiempo de almacenamiento sobre la variable respuesta que podría ser evaluado en estudios futuros.

A. Anexo: Clasificación de especies para cultivos vegetales [13]

Cultivos agrícolas transitorios			
Especie	Nombre	Uso Principal	Fuente
<i>Sesamum orientale</i>	Ajonjolí	Oleaginosa	Handbook of Energy Crops
<i>Gossypium hirsutum</i>	Algodón	Biomasa para combustión y oleaginosa	Handbook of Energy Crops
<i>Oryza sativa</i>	Arroz total	Biomasa para combustión	Handbook of Energy Crops
<i>Phaseolus vulgaris</i>	Frijol	Biomasa para combustión	Handbook of Energy Crops
<i>Zea mays</i>	Maiz Total	Biomasa para combustión y biomasa para producción de alcohol	Handbook of Energy Crops
<i>Hordeum vulgare</i>	Cebada	Biomasa para combustión	Handbook of Energy Crops
<i>Arachis hypogaea</i>	Maní	Oleaginosa	Handbook of Energy Crops
<i>Solanum tuberosum</i>	Papa	Biomasa para producción de alcohol	Handbook of Energy Crops
<i>Sorghum bicolor</i>	Sorgo	Biomasa para combustión	Handbook of Energy Crops
<i>Glycine max</i>	Soya	Oleaginosa	Handbook of Energy Crops
<i>Triticum aestivum</i>	Trigo	Biomasa para combustión y biomasa para producción de alcohol	Handbook of Energy Crops
<i>Manihot esculenta</i>	Yuca	Biomasa para producción de alcohol	Handbook of Energy Crops

Cultivos agrícolas permanentes			
Especie	Nombre	Uso Principal	Fuente
<i>Theobroma cacao</i>	Cacao	Oleaginosa	Handbook of Energy Crops
<i>Coffea arabica</i>	Café	Biomasa para combustión	Handbook of Energy Crops
<i>Saccharum officinarum</i>	Caña de Azúcar	Biomasa para producción de alcohol y biomasa para combustión	Handbook of Energy Crops
<i>Saccharum officinarum</i>	Caña Miel	Biomasa para producción de alcohol y biomasa para combustión	Handbook of Energy Crops
<i>Saccharum officinarum</i>	Caña Panela	Biomasa para producción de alcohol y biomasa para combustión	Handbook of Energy Crops
<i>Cocos nucifera</i>	Cocotero	Oleaginosa	Handbook of Energy Crops
<i>Elaeis guineensis</i>	Palma Africana	Oleaginosa	Handbook of Energy Crops
<i>Mussa paradisiaca</i>	Banano	Biomasa para producción de alcohol y biomasa para combustión	UPME

Especies plantaciones forestales			
Tipo Bosque	Especie	Nombre	Uso Principal
Montano Bajo	<i>Eucalyptus globulus</i>	Eucalipto	Madera aserrada y pulpa
Montano Bajo	<i>Acacia melanoxylon</i>	Acacia	Madera aserrada y pulpa
Montano Bajo	<i>Cupressus sp.</i>	Cipres	Madera aserrada y pulpa
Montano Bajo	<i>Pinus radiata</i>	Pino	Madera aserrada y pulpa
Montano Bajo	<i>Pinua patula</i>	Pino	Madera aserrada y pulpa
Premontano	<i>Eucalyptus grandis</i>	Eucalipto	Pulpa
Premontano	<i>Eucalyptus camandulensis</i>	Eucalipto	Pulpa
Premontano	<i>Eucalyptus saligna</i>	Eucalipto	Pulpa
Premontano	<i>Pinus tenuifolia</i>	Pino	Pulpa
Premontano	<i>Pinus patuta</i>	Pino	Pulpa
Premontano	<i>Pinus oocarpa</i>	Pino	Pulpa

Especies plantaciones forestales			
Tipo Bosque	Especie	Nombre	Uso Principal
Tropical Zona Caribe	<i>Teca sp.</i>	Teca	Madera aserrada
Tropical Zona Caribe	<i>Roble (Flormorado)</i>	Roble	Madera aserrada
Tropical Zona Caribe	<i>Bombacopsis quinata</i>	Caiba Tolúa	Madera aserrada
Tropical Zona Caribe	<i>Melina</i>	Melina	Madera aserrada
Tropical Zona Caribe	<i>Eucaliptus tereticornis</i>	Eucalipto	Madera aserrada
Tropical Zona Caribe	<i>Eucaliptus pellita</i>	Eucalipto	Madera aserrada
Tropical Zona Caribe	<i>Eucaliptus urophyllia</i>	Eucalipto	Madera aserrada
Tropical Zona Caribe	<i>Cordia gerascanthus</i>	Cordia	Madera aserrada
Tropical Orinoquía	<i>Eucaliptus pellita</i>	Eucalipto	Madera aserrada
Tropical Orinoquía	<i>Eucaliptus urophyllia</i>	Eucalipto	Madera aserrada
Tropical Orinoquía	<i>Eucaliptus tereticornis</i>	Eucalipto	Madera aserrada
Tropical Orinoquía	<i>Pinus caribaea</i>	Pino	Madera aserrada
Tropical Orinoquía	<i>Pinus oocarpa</i>	Pino	Madera aserrada
Tropical Orinoquía	<i>Schizolobium parahyba</i>	Frijolito	Madera aserrada

Especies de bosques naturales			
Tipo Bosque	Especie	Nombre	Uso Principal
Bosque Guandal	<i>Camnosperma panamensis</i>	Sajo	Madera aserrada
Bosque Guandal	<i>Dialyanthera parvifolia</i>	Cuágare	Madera aserrada
Bosque de Terraza ondulada	<i>Virola reidii</i>	Otobo o Virola	Madera aserrada
Bosque de Terraza ondulada	<i>Humiriastrum porocera</i>	Chanul	Madera aserrada
Bosque de Terraza ondulada	<i>Dacryodes canalensis</i>	Anime	Madera aserrada
Bosque de Terraza ondulada	<i>Brosium utile</i>	Sande	Madera aserrada
Bosque de Terraza ondulada	<i>Goupia glabra</i>	Chaquiro	Madera aserrada
Bosque de Colina	<i>Prioria copaifera</i>	Cativo	Madera aserrada
Bosque de Colina	<i>Cedreta spp.</i>	Cedro	Madera aserrada
Bosque de Colina	<i>Tabebuia rosae</i>	Roble	Madera aserrada
Bosque de Colina	<i>Carapa guianensis</i>	Güino	Madera aserrada

Especies de bosques naturales			
Tipo Bosque	Especie	Nombre	Uso Principal
Bosque de Colina	<i>Cariniana pyriformis</i>	Abarco	Madera aserrada
Bosque de Colina	<i>Brosium utile</i>	Sande	Madera aserrada
Bosque de Colina	<i>Pouteria caimito</i>	Caimo	Madera aserrada
Bosque de Colina	<i>Lecythis spp.</i>	Coco	Madera aserrada
Bosque de Colina	<i>Dacryodes canalensis</i>	Anime	Madera aserrada
Bosque de Colina	<i>Anacardium rhinocarpus</i>	Caracolí	Madera aserrada
Bosque de Colina	<i>Virola surinamensis</i>	Nuanamo	Madera aserrada
Bosque de Colina	<i>Coumarouna oleifera</i>	Choiba	Madera aserrada
Catival	<i>Prioria copaifera</i>	Cativo	Madera aserrada
Catival	<i>Cariniana pyriformis</i>	Abarco	Madera aserrada
Zona Andina (150 - 2000 m)	<i>Nectandra spp.</i>	Amarillo	Madera aserrada
Zona Andina (150 - 2000 m)	<i>Talauma sambuensis</i>	Almanegra	Madera aserrada
Zona Andina (150 - 2000 m)	<i>Cedrela spp.</i>	Cedro	Madera aserrada
Zona Andina (150 - 2000 m)	<i>Dacryodes canalensis</i>	Anime	Madera aserrada
Zona Andina (150 - 2000 m)	<i>Abarema jupumba</i>	Carbonero	Madera aserrada
Zona Andina (150 - 2000 m)	<i>Brosium utile</i>	Sande	Madera aserrada
Zona Andina (150 - 2000 m)	<i>Tabebuia rosae</i>	Roble	Madera aserrada
Zona Andina (150 - 2000 m)	<i>Dalbergia glauca</i>	Cobre	Madera aserrada
Zona Andina (150 - 2000 m)	<i>Cordial gerascanthus</i>	Canalete	Madera aserrada
Zona Andina (150 - 2000 m)	<i>Clathrotropis brachypetala</i>	Sapán	Madera aserrada
Zona Andina (150 - 2000 m)	<i>Schizolobium parahyba</i>	Frijolito	Madera aserrada
Zona Andina (150 - 2000 m)	<i>Himatanthus articulata</i>	Azuceno	Madera aserrada
Serranía de San Lucas	<i>Cariniana pyriformis</i>	Abarco	Madera aserrada
Serranía de San Lucas	<i>Bombacopsis quinata</i>	Ceiba Tolúa	Madera aserrada
Serranía de San Lucas	<i>Nectandra spp.</i>	Amarillo	Madera aserrada
Serranía de San Lucas	<i>Jacaranda copaia</i>	Chingalé	Madera aserrada
Serranía de San Lucas	<i>Clathrotropis brachypetala</i>	Sapán	Madera aserrada
Serranía de San Lucas	<i>Humiriastrum colombinum</i>	Aceituno	Madera aserrada
Serranía de San Lucas	<i>Couma macocarpa</i>	Perillo	Madera aserrada
Serranía de San Lucas	<i>Couratari guianensis</i>	Coco	Madera aserrada

Especies de bosques naturales			
Tipo Bosque	Especie	Nombre	Uso Principal
Bosques de Galería	<i>Bombacopsis quinata</i>	Ceiba Tolúa	Madera aserrada
Bosques de Galería	<i>Nectandra spp.</i>	Amarillo	Madera aserrada
Bosques de Galería	<i>Cordia alliodora</i>	Laurel	Madera aserrada
Bosques de Galería	<i>Jacaranda copaia</i>	Chingalé	Madera aserrada
Bosques de Galería	<i>Dacryodes canalensis</i>	Anime	Madera aserrada
Piedemonte Amazónico	<i>Tabebuia rosae</i>	Roble	Madera aserrada
Piedemonte Amazónico	<i>Cedrela spp.</i>	Cedro	Madera aserrada
Piedemonte Amazónico	<i>Cedrelinga catenaeformis</i>	Achapo	Madera aserrada
Piedemonte Amazónico	<i>Dacryodes canalensis</i>	Anime	Madera aserrada
Piedemonte Amazónico	<i>Catostemma alstonii</i>	Arenillo	Madera aserrada
Piedemonte Amazónico	<i>Cordia alliodora</i>	Laurel	Madera aserrada
Piedemonte Amazónico	<i>Aniba sp.</i>	Canelo	Madera aserrada
Piedemonte Amazónico	<i>Jacaranda copaia</i>	Chingalé	Madera aserrada
Piedemonte Amazónico	<i>Platymiscium pinnatum</i>	Guayacán	Madera aserrada
Piedemonte Amazónico	<i>Nectandra spp.</i>	Amarillo	Madera aserrada
Piedemonte Amazónico	<i>Aniba perutilis</i>	Comino	Madera aserrada

Fuente: AENE Consultoría S.A., 2003

B. Anexo: Producción de cultivos de gran relevancia en Colombia [14] [15]

Sector	Producto	Producción Anual (ton)	Área Cultivada (ha)
Palma de aceite	Aceite de palma	942 000	427 367
	Bio-diesel	443 037	No hay datos
Café*	Grano de café	902 183	618 241
Banana*	Bananas*	136 248	15 253
Plátano*	Plátano*	1'235 400	185 291
Caña de azúcar	Caña de azúcar	22'728 758	223 905
	Azúcar	2'339 998	No hay datos
Caña panelera	Melaza	254 206	No hay datos
	Bio etanol	341 190 m ³	No hay datos
	Panela*	990 908	146 957
Cacao*	Cacao*	55 299	74 880
Granos	Maíz*	631 342	201 743
	Guisantes (arvejas)*	100 548	24 481
	Frijoles*	50 409	41 948
	Avena	2672	No hay datos
	Cebada (C)	5681	No hay datos
	Sorgo (S)	16 411	3939
	Soya (Sy)	39 555	18 538
	Trigo (T)	23 350	10 348
	(C+S+Sy+T)	84 997	32 825
	(C+S+Sy+T)*	151 300	51 783
Arroz*	Arroz*	10 376	3781
Papa*	Papa*	2'582 147	132 563

Fuente: Adaptada de los datos de Patiño, Pedro (2012) y actualizada con datos de NL Agency Ministry of foreign affairs (2013), señalados con *

C. Anexo: Resultados de ensayos mecánicos para la densidad aparente

		Codificado										Real		Densidad Aparente (kg/m ³)																						
		T	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	°C	Frac	s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16						
1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	90	0,25	40	1149	1139	1117	1095	1056	1100	1121	1084	1132	1129	1113	1174	1149	1139	1117	1095	1056	1100	1121	1084	1132	1129	1113
-1	-1	1	-1	1	1	0	1	1	0	0	90	0,75	40	1059	1164	1107	1056	1098	1107	1087	1078	1121	1128	1123	1193	1059	1164	1107	1056	1098	1107	1087	1078	1121	1128	1123
1	0	-1	1	1	0	-1	1	1	0	1	90	0,75	20	1173	1157	1104	1095	1099	1142	1113	1100	1138	1151	1099	1173	1147	1157	1104	1095	1099	1142	1113	1100	1138	1151	1099
110	110	110	110	90	90	90	90	90	90	90	90	0,25	20	1167	1169	1104	1127	1118	1119	1142	1120	1026	1142	1117	1167	1163	1169	1104	1127	1118	1119	1142	1120	1026	1142	1117
0,25	0,25	0,25	0,25	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,50	0,50	0,50	0,50	40	1218	1179	1143	1159	1133	1122	1118	1119	1178	1166	1138	1218	1179	1143	1159	1133	1122	1118	1119	1178	1166	1138	
60	40	20	20	60	60	60	40	20	60	60	60	20	20	1199	1184	1175	1134	1069	1166	1156	1094	1163	1130	1164	1199	1184	1175	1134	1069	1166	1156	1094	1163	1130	1164	
1174	1149	1139	1117	1095	1056	1100	1121	1084	1132	1129	1113	1174	1149	1139	1117	1095	1056	1100	1121	1084	1132	1129	1113	1174	1149	1139	1117	1095	1056	1100	1121	1084	1132	1129	1113	
1193	1059	1164	1107	1056	1098	1107	1087	1078	1121	1128	1123	1193	1059	1164	1107	1056	1098	1107	1087	1078	1121	1128	1123	1193	1059	1164	1107	1056	1098	1107	1087	1078	1121	1128	1123	
1173	1147	1157	1104	1095	1099	1142	1113	1100	1138	1151	1099	1173	1147	1157	1104	1095	1099	1142	1113	1100	1138	1151	1099	1173	1147	1157	1104	1095	1099	1142	1113	1100	1138	1151	1099	
1167	1163	1169	1104	1127	1118	1119	1142	1120	1026	1142	1117	1167	1163	1169	1104	1127	1118	1119	1142	1120	1026	1142	1117	1167	1163	1169	1104	1127	1118	1119	1142	1120	1026	1142	1117	
1218	1179	1179	1143	1159	1133	1122	1118	1119	1178	1166	1138	1218	1179	1179	1143	1159	1133	1122	1118	1119	1178	1166	1138	1218	1179	1179	1143	1159	1133	1122	1118	1119	1178	1166	1138	
1199	1184	1175	1134	1154	1069	1166	1156	1094	1163	1130	1164	1199	1184	1175	1134	1154	1069	1166	1156	1094	1163	1130	1164	1199	1184	1175	1134	1154	1069	1166	1156	1094	1163	1130	1164	
1188	1186	1169	1123	1122	1088	1135	1123	1114	1150	1151	1161	1188	1186	1169	1123	1122	1088	1135	1123	1114	1150	1151	1161	1188	1186	1169	1123	1122	1088	1135	1123	1114	1150	1151	1161	
1179	1195	1164	1150	1117	1158	1138	1145	1131	1163	1152	1166	1179	1195	1164	1150	1117	1158	1138	1145	1131	1163	1152	1166	1179	1195	1164	1150	1117	1158	1138	1145	1131	1163	1152	1166	
1196	1190	1183	1122	1115	1105	1152	1130	1156	1147	1162	1175	1196	1190	1183	1122	1115	1105	1152	1130	1156	1147	1162	1175	1196	1190	1183	1122	1115	1105	1152	1130	1156	1147	1162	1175	
1194	1188	1195	1152	1088	1108	1151	1164	1132	1164	1118	1147	1194	1188	1195	1152	1088	1108	1151	1164	1132	1164	1118	1147	1194	1188	1195	1152	1088	1108	1151	1164	1132	1164	1118	1147	
1150	1185	1168	1100	1108	1041	1122	1101	1109	1159	1172	1139	1150	1185	1168	1100	1108	1041	1122	1101	1109	1159	1172	1139	1150	1185	1168	1100	1108	1041	1122	1101	1109	1159	1172	1139	
1183	1215	1166	1119	1100	1137	1114	1169	1120	1160	1175	1155	1183	1215	1166	1119	1100	1137	1114	1169	1120	1160	1175	1155	1183	1215	1166	1119	1100	1137	1114	1169	1120	1160	1175	1155	
1181	1138	1143	1145	1122	1107	1115	1139	1110	1145	1155	1137	1181	1138	1143	1145	1122	1107	1115	1139	1110	1145	1155	1137	1181	1138	1143	1145	1122	1107	1115	1139	1110	1145	1155	1137	
1172	1172	1144	1121	1135	1090	1131	1113	1107	1155	1127	1126	1172	1172	1144	1121	1135	1090	1131	1113	1107	1155	1127	1126	1172	1172	1144	1121	1135	1090	1131	1113	1107	1155	1127	1126	
1178	1188	1166	1119	1121	1092	1112	1125	1131	1122	1129	1130	1178	1188	1166	1119	1121	1092	1112	1125	1131	1122	1129	1130	1178	1188	1166	1119	1121	1092	1112	1125	1131	1122	1129	1130	
1159	1188	1142	1131	1108	1100	1135	1122	1120	1137	1145	1088	1159	1188	1142	1131	1108	1100	1135	1122	1120	1137	1145	1088	1159	1188	1142	1131	1108	1100	1135	1122	1120	1137	1145	1088	

			Codificado			Real			Densidad Aparente (kg/m ³)		
	T	P									
	1	0	1	0	0	110	0,50	20	1	2	3
	TC					°C	Frac	s	1	2	3
									1	2	3
									4	5	6
									7	8	9
									10	11	12
									13	14	15
									16		
1	1	1	1	1	1	110	0,75	40	1130	1109	1130
1	1	1	1	0	0	110	0,50	60	1143	1109	1130
1	0	-1	-1	1	0	110	0,50	40	1143	1109	1130
110	110	110	110	110	110	110	0,50	20	1143	1109	1130
0,75	0,75	0,75	0,75	0,50	0,50	110	0,50	40	1143	1109	1130
60	40	20	20	60	40	110	0,50	20	1143	1109	1130
1120	1130	1134	1134	1143	1109	110	0,50	20	1143	1109	1130
1142	1125	1120	1120	1162	1158	110	0,50	20	1143	1109	1130
1124	1138	1110	1110	1128	1151	110	0,50	20	1143	1109	1130
1132	1140	1127	1127	1169	1161	110	0,50	20	1143	1109	1130
1181	1135	1128	1128	1158	1157	110	0,50	20	1143	1109	1130
1180	1147	1128	1128	1178	1148	110	0,50	20	1143	1109	1130
1156	1160	1057	1057	1164	1148	110	0,50	20	1143	1109	1130
1148	1167	1133	1133	1158	1148	110	0,50	20	1143	1109	1130
1202	1138	1124	1124	1176	1136	110	0,50	20	1143	1109	1130
1160	1141	1157	1157	1173	1181	110	0,50	20	1143	1109	1130
1162	1138	1135	1135	1164	1157	110	0,50	20	1143	1109	1130
1187	1138	1135	1135	1161	1197	110	0,50	20	1143	1109	1130
1122	1131	1111	1111	1150	1163	110	0,50	20	1143	1109	1130
1156	1158	1135	1135	1205	1177	110	0,50	20	1143	1109	1130
1154	1168	1183	1183	1170	1171	110	0,50	20	1143	1109	1130
1179	1157	1173	1173	1174	1147	110	0,50	20	1143	1109	1130

D. Anexo: Resultados de ensayos mecánicos para la resistencia a compresión

Codificado			Real			Resistencia máxima a compresión (kN)				
T	P	TC	° C	Fracción	s	1	2	3	4	5
-1	-1	-1	90	0,25	20	61,60	59,74	49,13	58,49	73,43
-1	-1	0	90	0,25	40	60,08	58,72	65,87	60,78	74,73
-1	-1	1	90	0,25	60	62,41	62,35	63,57	65,58	67,24
-1	0	-1	90	0,50	20	56,96	60,23	63,09	63,67	74,64
-1	0	0	90	0,50	40	61,23	63,63	62,90	62,06	76,05
-1	0	1	90	0,50	60	62,79	63,96	64,01	61,30	69,91
-1	1	-1	90	0,75	20	57,03	60,16	58,48	66,34	65,41
-1	1	0	90	0,75	40	56,37	54,91	57,50	57,86	67,51
-1	1	1	90	0,75	60	56,37	63,17	63,11	61,27	64,16
1	-1	-1	110	0,25	20	65,13	60,34	61,65	49,93	73,38
1	-1	0	110	0,25	40	63,91	68,49	62,32	67,80	82,74
1	-1	1	110	0,25	60	61,25	63,62	62,90	64,43	82,20
1	0	-1	110	0,50	20	59,39	63,02	65,53	69,28	72,73
1	0	0	110	0,50	40	57,98	60,80	62,85	66,18	73,04
1	0	1	110	0,50	60	65,40	64,34	62,48	58,93	71,59
1	1	-1	110	0,75	20	65,34	65,81	57,80	62,20	70,16
1	1	0	110	0,75	40	61,54	58,68	65,03	67,27	65,03
1	1	1	110	0,75	60	67,60	62,65	65,92	65,86	73,62

E. Anexo: Resultados de ensayos mecánicos para Índice de Durabilidad y Porcentaje de Humedad

Codificado			Real			Índice Durabilidad (%)		Contenido de humedad (%)					
T	P	TC	° C	Frac	s	1	2	1	2	3	4	5	6
-1	-1	-1	90	0,25	20	98,6	98,7	6,07	5,43	5,74	2,44	3,01	5,08
-1	-1	0	90	0,25	40	98,8	98,5	3,96	4,01	3,30	4,42	4,72	4,27
-1	-1	1	90	0,25	60	98,6	99,1	5,03	3,58	5,60	4,18	5,07	5,28
-1	0	-1	90	0,50	20	97,6	96,5	4,53	5,23	4,82	5,58	3,51	3,61
-1	0	0	90	0,50	40	97,5	97,7	3,88	6,24	5,71	4,67	5,87	4,24
-1	0	1	90	0,50	60	97,2	97,1	4,77	5,80	4,40	3,53	4,10	4,60
-1	1	-1	90	0,75	20	94,4	96,4	4,75	4,10	4,64	5,22	3,85	3,66
-1	1	0	90	0,75	40	93,2	96,9	3,58	4,92	3,86	4,61	3,01	3,36
-1	1	1	90	0,75	60	96,2	95,8	3,56	4,07	2,93	3,25	3,48	3,48
1	-1	-1	110	0,25	20	99,0	98,6	5,32	4,43	4,23	4,17	3,51	3,97
1	-1	0	110	0,25	40	99,2	99,2	2,17	2,67	3,75	2,95	2,87	1,05
1	-1	1	110	0,25	60	99,2	99,1	3,59	3,94	2,27	2,15	1,92	2,43
1	0	-1	110	0,50	20	98,1	97,8	3,58	1,80	3,80	4,25	4,21	4,45
1	0	0	110	0,50	40	98,5	97,7	3,13	1,94	1,96	2,31	2,57	2,00
1	0	1	110	0,50	60	98,6	97,5	3,97	3,13	2,28	2,72	4,56	3,82
1	1	-1	110	0,75	20	96,0	96,2	1,88	3,50	4,36	4,55	3,32	6,48
1	1	0	110	0,75	40	96,6	97,4	5,26	5,49	4,78	5,43	4,02	3,86
1	1	1	110	0,75	60	97,0	97,7	2,52	3,82	3,23	2,98	4,43	3,04

F. Anexo: Resultados de ensayos mecánicos para el módulo elástico

Codificado			Real			Modulo Elástico (MPa)				
T	P	TC	° C	Fracción	s	1	2	3	4	5
-1	-1	-1	90	0,25	20	642,2	638,8	630,0	628,0	795,7
-1	-1	0	90	0,25	40	655,1	635,3	755,3	759,6	806,4
-1	-1	1	90	0,25	60	677,1	682,9	681,2	783,1	785,2
-1	0	-1	90	0,50	20	659,7	679,2	748,5	736,9	824,2
-1	0	0	90	0,50	40	748,8	675,6	707,5	791,9	849,1
-1	0	1	90	0,50	60	700,0	714,0	759,0	737,7	803,7
-1	1	-1	90	0,75	20	669,4	748,1	727,3	771,3	764,2
-1	1	0	90	0,75	40	674,6	646,1	726,0	728,4	749,8
-1	1	1	90	0,75	60	719,7	791,5	743,2	782,9	822,3
1	-1	-1	110	0,25	20	739,7	658,4	682,0	718,4	817,3
1	-1	0	110	0,25	40	755,0	951,5	672,3	788,2	902,9
1	-1	1	110	0,25	60	689,8	746,5	689,2	726,7	927,6
1	0	-1	110	0,50	20	707,5	757,3	728,5	850,2	836,8
1	0	0	110	0,50	40	691,8	741,7	804,0	812,8	878,9
1	0	1	110	0,50	60	849,2	755,0	806,6	735,1	837,6
1	1	-1	110	0,75	20	809,3	738,7	719,2	755,8	799,2
1	1	0	110	0,75	40	736,1	735,0	765,5	848,1	766,3
1	1	1	110	0,75	60	818,6	820,7	775,7	836,8	900,2

Bibliografía

- [1] Antonio F. Barrero. (2016, Febrero) Energías Renovables. [Online]. <https://www.energias-renovables.com/eolica/colombia-quiere-desatar-la-revolucion-eolica-20160211>
- [2] Luis Alfredo Henandez A., "Impotancia Energética y Ambiental de la Biomasa en Colombia," *Agronomía Colombiana*, vol. XI, no. 2, pp. 228-235, 1994.
- [3] Humberto de Jesus Euftrade Junior, Gabriela Tami Nakashima, Fábio Minoru Yamaji, Saulo Philipe Sebastião Guerra, and Adriano Wagner Ballarin, "Eucalyptus short-rotation coppice for solid fuel production," *Industrial Crops & Products*, no. 108, pp. 636–640, 2017.
- [4] P. Balasubramani, V. Anbumalar, M.S. Nagarajan, and P. Maheandera Prabu, "Biomass briquette manufacturing system model for environment," *Journal of Alloys and Compounds*, no. 686, pp. 859-865, 2016.
- [5] Jianjun Hu et al., "Economic, environmental and social assessment of briquette fuel from agricultural residues in China a study on flat die briquetting using corn stalk," *Energy*, no. 64, pp. 557-566, 2014.
- [6] E. Granada, L.M. López González, J.L. Míguez, and J. Moran, "Fuel lignocellulosic briquettes, die design and products study," *Renewable Energy*, no. 27, pp. 561-573, 2002.
- [7] R.N. Singh, "Equilibrium moisture content of biomass briquettes," *Biomass and Bioenergy*, no. 26, pp. 251-253, 2004.
- [8] A. Yank, M M. Ngadi, and R. Kok, "Physical properties of rice husk and bran briquettes under low pressure densification for rural applications," *Biomass and Bioenergy*, no. 84, pp. 22-30, 2016.
- [9] M. Chávez-Sifontes and M. Domine, "Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial.," *Avances en Ciencias e Ingeniería.*, vol. 4, no. 4, pp. 15 - 46, Octubre 2013, <http://hdl.handle.net/10251/80767>.
- [10] J. P. Casey, *Pulpa y Papel*, Primera ed. México: Limusa, 1990.
- [11] Yuri Alexandra González Castillo, Sahra Nathalíe Rincón Rincón, Gabriel de Jesús

- Camargo Vargas, German Eduardo Dévora Isiordia, and Fabio Emiro Sierra Vargas, "Caracterización de Materiales lignocelulósicos residuales de palma de aceite y palma de coco para la fabricación de pellets," *AVANCES Investigación en Ingeniería*, vol. 11, no. 1, pp. 83-91, 2014.
- [12] Ministerio de Educación de Colombia. (2011) Colombia una potencia en energías alternativas. [Online]. <http://www.mineducacion.gov.co/cvn/1665/article-117028.html>
- [13] AENE consultoría S.A., "Potencialidades de los Cultivos Energéticos y Residuos Agrícolas en Colombia," Unidad de Planificación Minero Energética (UPME), Bogotá D.C., Resumen Ejecutivo 2003.
- [14] Pedro Elías Patiño Martínez, "Biomasa Residual Vegetal: Tenologías de Transformación y Estado Actual," *Innovaciencia*, vol. 2, pp. 45 - 52, Septiembre 2012.
- [15] NL Agency Ministry of foreign affairs, "Biomass Oportunities in Colombia," NL Agency Netherlands Programmes for Sustainable Biomass, Resumen proyecto de inversión 2013.
- [16] DANE, "Encuesta Nacional Agropecuaria - ENA 2015," DANE, Bogotá, Boletín Técnico 2016.
- [17] Unidad de Planificación Minero Energética (UPME). (2017) Atlas de Potencial Energético de Biomasa Residual. [Online]. <http://upmeonline.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=31e8d575328842748672626929bdcbf6>
- [18] UPME, Ideam, Colciencias, UIS, "Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia," UPME, Ideam, Colciencias, UIS, Bogotá D.C., Informe ISBN: 978-958-8504-59-9, 2009.
- [19] Agustín Valverde G., Bienvenido Sarriall L., and José P. Monteagudo Y., "Análisis Comparativo de las Características Físicoquímicas de la Cascarilla de arroz," *Scientia et Technica*, vol. XIII, no. 37, pp. 255 - 260, Diciembre 2007.
- [20] J.M. Castellano, M. Gómez, M. Fernández, L.S. Esteban, and J.E. Carrasco, "Study on the effects of raw materials composition and pelletization conditions on the quality and properties of pellets obtained from different woody and non woody

- biomasses," *Fuel*, no. 139, pp. 629 - 636, Septiembre 2015.
- [21] Jaider Sierra Aguilar, "Alternativas de Aprovechamiento de la Cascarilla de Arroz en Colombia," Departamento de Ingeniería Agrícola, Universidad de Sucre, Sincelejo, Colombia, Monografía de grado 2009.
- [22] Pasturas de America. (2016) Residuos del cultivo de maíz. [Online].
<http://www.pasturasdeamerica.com/utilizacion-forrajes/residuos-agricolas/maiz/>
- [23] V. N. Rodríguez, D.A. Zambrano F., and C.A Ramírez G. (2016, Marzo) Manejo y disposición de los subproductos y de las aguas residuales del beneficio del café. [Online].
http://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos_cafe/manejo_de_subproductos
- [24] Nelson Rodríguez Valencia and Diego Antonio Zambrano Franco. (2010, Marzo) Los Subproductos del Café: Fuente de Energía Renovable. [Online].
<http://www.jotagallo.com/agricola/assets/cenicafe-avance-tecnico-393-subproductos-del-cafe.pdf>
- [25] Hipólito Ortiz Laurel, Sergio Salgado Garcia, and Emilio M. Arada Ibañez. (2013) Efectividad de la Recuperación de Residuos de Cosecha de la Caña de Azúcar con Equipo Mecánico. [Online].
<http://conadesuca.gob.mx/pdfsATAM/6%20pEFECT%20RECUP%20RESIDUOS%20%20COSECHA%20CA%20C3%91A%20AZUC%20CON%20EQUIPO%20MEC%20.pdf>
- [26] Antonio Valdes Delgado. Los Residuos Agrícolas de la Cosecha Cañera. [Online].
http://www.nest.unifei.edu.br/portugues/pags/novidades/curso_cyted/files/pdf/Tema%201-%20Residuos%20Agricolas%20da%20Cana-de-Acucar/ExperienciasInternacionais.pdf
- [27] Zhiyong Cai and Robert J. Ross, "Mechanical Properties of Wood-Based Composite Materials," in *Wood handbook : wood as an engineering material*. Madison, Estados Unidos: Centennial ed., 2010, ch. 12, pp. 12-1 - 12-9.
- [28] IDEAM. (2016) Geovision Seguimiento de bosques. [Online].
<http://visor.ideam.gov.co:8530/geovisor/#!/profiles/5/no>
- [29] Organización Internacional de Maderas Tropicales (OIMT), Universidad del Tolima. (2015) Núcleos Forestales Competitivos. [Online].

http://maderas.ut.edu.co/nforestales/pagina_nf.php

- [30] Maria Claudia Diez G., "Exploración de relaciones simbióticas en Raíces de Pino Romerón (*Retrophyllum rospigliosii*) (Pilg.) C.N. Page (PODOCARPACEAE) en un Fragmento de Bosque Andino," Corantioquia y Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Informe de proyecto 2004.
- [31] Semillero. net. Pino Colombiano. *Podocarpus oleifolius*. [Online]. http://elsemillero.net/nuevo/semillas/pino_colombiano.html
- [32] Huber Cabrales Contreras, "Caracterización del proceso de densificación de biomasa residual proveniente de Palma de Aceite Africana (Tusa)," Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional De Colombia, Bogotá, Tesis de Maestría 2016.
- [33] Luis Eduardo Atuesta Boda and Luis Eduardo Sierra Vargas, "Caracterización Físico - Química de Pellets producidos a partir de mezclas 50/50 Carbón Bituminoso/Madera Residual," *Informador Técnico (Colombia)*, vol. 79, no. 1, pp. 18 - 25, Junio 2015.
- [34] Pelletshome. Qualità del pellet (Calidad del Pellet). [Online]. <https://www.pelletshome.it/qualita-del-pellet>
- [35] DINEN 15270, "Pellet burners for small heating boilers. Definitions, requirements, testing, marking.," Deutsches Institut für Normung., Berlin, Alemania, Norma Técnica 2007.
- [36] Asociación Española de Normalización y Especificación - AENOR, *Biocombustibles Sólidos: Determinación de la durabilidad mecánica de pellets y briquetas*. Madrid, España, 2015.
- [37] S.A. Ndindeng et al., "Quality optimization in briquettes made from rice milling by-products," *Energy for Sustainable Development*, vol. 29, pp. 24 - 31, Octubre 2015.
- [38] Rukayya I. Muazu and Julia A. Stegemann, "Effects of operating variables on durability of fuel briquettes from rice husks and corn cobs," *Fuel Processing Technology*, vol. 133, pp. 137 -145, Febrero 2015.
- [39] Kaliyan Nalladurai and R. Vance Morey, "Constitutive model for densification of corn stover and switchgrass," *Biosystems Engineering*, vol. 104, pp. 47 - 63, Julio 2009.

- [40] Solange Araújo et al., "Effect of a mild torrefaction for production of eucalypt wood briquettes under different compression pressures," *Biomass and Bioenergy*, vol. 90, pp. 181 - 186, Abril 2016.
- [41] C. Antwi-Boasiako and B.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, Diciembre 2016.
- [42] Á. Ramírez-Gómez, E. Gallego, J.M Fuentes, C. González-Montellano, and F. Ayuga, "Values for particle-scale properties of biomass briquettes made from agroforestry residues," *Particuology*, vol. 12, pp. 100 - 106, Mayo 2014.
- [43] Sławomir Obidziński, "Analysis of usability of potato pulp as solid fuel," *Fuel Processing Technology*, vol. 94, pp. 67 - 74, Noviembre 2012.
- [44] T. Rajaseenivasan, V. Srinivasan, G. Syed Mohamed Qadir, and K. Srithar, "An investigation on the performance of sawdust briquette blending with neem powder," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 55, pp. 2833 - 2838, Julio 2016.
- [45] Li Fengmina and Zhang Mingquana, "Technological Parameters of Biomass Briquetting of Macrophytes in Nansi Lake," *Energy Procedia*, vol. 5, pp. 2449 - 2454, 2011.
- [46] Rosa Angélica Arias Ortiz and Juan Daniel Meneses Cruz, "Caracterización físico-química de residuos agroindustriales (cascarilla de arroz y cascarilla de café), como materia prima potencial para la obtención de bioetanol, Laboratorios de Química UNAN-Managua I-II semestre 2016," Departamento de Química, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua, Nicaragua, Monografía de grado 2016.
- [47] Abelardo Prada and Carol E. Cortés, "LA DESCOMPOSICIÓN TÉRMICA DE LA CASCARILLA DE ARROZ: UNA ALTERNATIVA DE APROVECHAMIENTO INTEGRAL," *Revista ORINOQUIA, Universidad de los Llanos*, vol. 14, no. 1, pp. 155-170, 2010.
- [48] Salomé Gayosso-Rodríguez, Lizette Borges-Gómez, Eduardo Villanueva-Couoh, Maximiano A. Estrada-Botello, and René Garruña, "CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE MATERIALES ORGÁNICOS PARA SUSTRATOS AGRÍCOLAS,"

Revista Agrociencia, vol. 52, pp. 639-652, Febrero 2018.

- [49] Mario Roberto Fonseca Maldonado, "Determinación de la Composición Química de la Madera de Pino Candelillo (*Pinus maximinoi* H. E. Moore) Procedente de la Finca Rio Frio, Tactic, Alta Verapaz," Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, Trabajo de Grado 2006.
- [50] René Bernabé-Santiago, Luz Elena A. Ávila-Calderón, and José Guadalupe Rutiaga-Quñones, "Componentes químicos de la madera de cinco especies de pino del municipio de Morelia, Michoacán.," *Madera y Bosques*, vol. 19, no. 2, pp. 21-35, 2013.
- [51] William G. Cochran and Gertrude M. Cox, *Diseños Experimentales*, Segunda ed. México: Trillas, 1997.
- [52] Patricia Romero Mares. (2012, Octubre) Departamento de Probabilidad y Estadística UNAM. [Online].
<http://www.dpye.iimas.unam.mx/patricia/indexer/factoriales.pdf>
- [53] B. Lela, M. Barišic, and S. Nizetic, "Cardboard/sawdust briquettes as biomass fuel: Physical-mechanical and thermal characteristics," *Waste Management*, no. 47, pp. 236-245, Noviembre 2015.
- [54] UNE- EN ISO 17831-2, "Determinación de la durabilidad mecánica de pellets y briquetas - Parte 2: Briquetas," AENOR, Madrid, 2016.
- [55] Nalladurai Kaliyan and R.Vance Morey, "Constitutive model for densification of corn stover and switchgrass," *Biosystems Engineering*, no. 104, pp. 47 - 63, Julio 2009.
- [56] Oscar Melo, Luis López, and Sandra Melo, "Principios del Diseño de Experimentos," in *Diseño de Experimentos Métodos y Aplicaciones*. Bogotá D.C., Colombia: Universidad Nacional, 2017, ch. 1, pp. 11-30.
- [57] Arkadiusz Gendeka, Monika Aniszewskaa, Jan Malaťákb, Velebilb, and Jan, "Evaluation of selected physical and mechanical properties of briquettes produced from cones of three coniferous tree species," *Biomass and Bioenergy*, no. 117, pp. 173-179, Julio 2018.
- [58] ASABE s269.4, "Cubes, Pellets, and Crumbles - Definitions and Methods for Determining Density, Durability and Moisture Content," ASABE, Niles Road, St. Joseph, 2007.

- [59] ASTM International, E1820 – 09: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, 2009.
- [60] UNE- EN 12504-1, "Ensayos de hormigón en estructuras - Extracción, examen y ensayo a compresión," AENOR, Madrid, 2009.
- [61] UNE- EN ISO 18134-3, "Determinación del contenido de Humedad. Método de secado en estufa. Parte 3: Humedad de la muestra para análisis general," AENOR, Madrid, 2016.
- [62] Jens K. Holm, Ulrik B. Henriksen, Johan E. Hustad, and Lasse H. Sørensen, "Toward an Understanding of Controlling Parameters in Softwood and Hardwood Pellets Production," *Energy & Fuels*, vol. 20, no. 6, pp. 2686-2694, Agosto 2006.
- [63] Ziyong Chen, Yangzi Xu, and Satya Shivkumar, "Microstructure and Tensile Properties of Various Varieties of Rice Husk," *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 98, no. 3, pp. 1061-1070, Julio 2017.
- [64] Petch Jearanaisilawong, Shayanin Eahkanong, Bundit Phungsara, and Anchalee Manonukul, "Determination of in-plane elastic properties of rice husk composite," *Materials and Design*, vol. 76, pp. 55-63, Marzo 2015.
- [65] Jaya Shankar Tumuluru, Christopher T. Wright, J. Richard Hess, and Kevin L. Kenney, "A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application," *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 5, no. 6, pp. 683–707, Noviembre 2011.
- [66] R. B. Anderson, James Bayer, and L. J. E. Hofer, "Linear Solutions of Fick's Law," *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, vol. 4, no. 2, pp. 167-171, 1965.
- [67] M.A. Fortes and M.Teresa Nogueira, "The poison effect in cork," *Materials Sciencean Engineering*, vol. 122, no. 2, pp. 227-232, Julio 1989.
- [68] Arnaud Marmier et al., "Evidence of negative Poisson's ratio in wood from finite element analysis and off-axis compression experiments," *Materials Letters*, vol. 210, pp. 255–257, Septiembre 2017.
- [69] W Van Paepegem, "Fatigue models for woven textile composite laminates," in *Fatigue of Textile Composites*. Gent, Bélgica: Woodhead Publishing Series in

Composites Science and Engineering, 2015, ch. 13, pp. 295-325.