



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y MECÁNICAS DE UN
MATERIAL COMPUESTO POR FIBRAS DE CAÑA DE CASTILLA (*Arundo Donax L.*) Y
ALCOHOL POLIVINÍLICO, AL VARIAR LA FORMULACIÓN Y EL ESPESOR DEL TABLERO**

Miguel Angel Cuiñ Morales

Asesorado por el Ing. Mauricio Valentino Rivera Tello

Guatemala, octubre de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS Y MECÁNICAS DE UN
MATERIAL COMPUESTO POR FIBRAS DE CAÑA DE CASTILLA (*Arundo Donax L.*) Y
ALCOHOL POLIVINÍLICO, AL VARIAR LA FORMULACIÓN Y EL ESPESOR DEL TABLERO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MIGUEL ANGEL CUIN MORALES

ASESORADO POR EL ING. MAURICIO VALENTINO RIVERA TELLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz Gonzáles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADORA	Inga. Hilda Piedad Palma de Martini
EXAMINADOR	Ing. Gerardo Ordoñez
EXAMINADOR	Ing. César Ariel Villela Rodas
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y MECÁNICAS DE UN MATERIAL COMPUESTO POR FIBRAS DE CAÑA DE CASTILLA (*Arundo Donax L.*) Y ALCOHOL POLIVINÍLICO, AL VARIAR LA FORMULACIÓN Y EL ESPESOR DEL TABLERO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química con fecha 25 de noviembre de 2019.



Miguel Angel Cuin Morales

Guatemala 21 de marzo de 2022

Ingeniero
Williams Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ingeniero Williams Álvarez Mejía:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final del trabajo de graduación titulado: "EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y MECÁNICAS DE UN MATERIAL COMPUESTO POR FIBRAS DE CAÑA DE CASTILLA (Arundo Donax L.) Y ALCOHOL POLIVINÍLICO, AL VARIAR LA FORMULACIÓN Y EL ESPESOR DEL TABLERO", elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química, MIGUEL ANGEL CUIN MORALES, quien se identifica con el registro académico 2012-13249 y con el CUI 2380 16161 01 06.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,



Mauricio Valentino Rivera Tello
ASESOR
Ingeniero Químico
Colegiado activo no. 2,089



Mauricio Valentino
Rivera Tello
INGENIERO QUIMICO
Colegiado. No. 2089



Guatemala, 22 de agosto de 2022.
Ref. EIQ.TG-IF.019.2022.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **055-2019**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Miguel Angel Cuin Morales.**

Identificado con número de carné: **2380161610106.**

Identificado con registro académico: **201213249.**

Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química.**

En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación.**

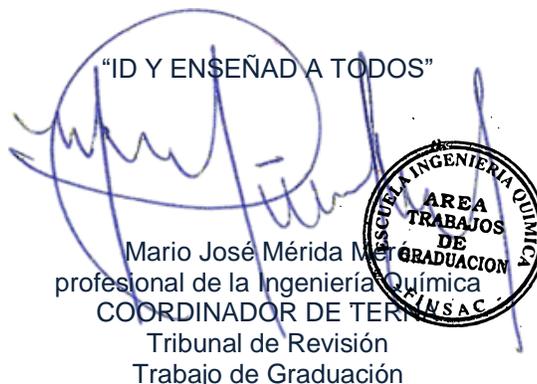
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y MECÁNICAS DE UN MATERIAL COMPUESTO POR FIBRAS DE CAÑA DE CASTILLA (Arundo Donax L.) Y ALCOHOL POLIVINÍLICO, AL VARIAR LA FORMULACIÓN Y EL ESPESOR DEL TABLERO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Mauricio Valentino Rivera Tello, profesional de la Ingeniería Química

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Mario José Mérida Meré
profesional de la Ingeniería Química
COORDINADOR DE TRABAJO DE GRADUACION
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



INGENIERO QUÍMICO
Mario José Mérida Meré
Colegiado No. 1411

C.c.: archivo





LNG.DIRECTOR.218.EIQ.2022

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y MECÁNICAS DE UN MATERIAL COMPUESTO POR FIBRAS DE CAÑA DE CASTILLA (Arundo Donax L.) Y ALCOHOL POLIVINÍLICO, AL VARIAR LA FORMULACIÓN Y EL ESPESOR DEL TABLERO**, presentado por: **Miguel Angel Cuin Morales**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“Id y Enseñad a Todos”


Ing. Williams G. Alvarez  M.I.Q., M.U.I.E.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, octubre de 2022.

LNG.DECANATO.OI.702.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y MECÁNICAS DE UN MATERIAL COMPUESTO POR FIBRAS DE CAÑA DE CASTILLA (*Arundo Donax L.*) Y ALCOHOL POLIVINÍLICO, AL VARIAR LA FORMULACIÓN Y EL ESPESOR DEL TABLERO**, presentado por: **Miguel Angel Cuin Morales**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana



Guatemala, octubre de 2022

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darme la oportunidad de hacer un sueño realidad, la gloria sea a Él.
Mis padres	Sebastián Cuin y Manuela Morales. Mis héroes, mis ejemplos a seguir.
Mis hermanos	Diego, Juana, Dominga, Abigail y Débora Cuin. Su amistad y amor siempre me llenan de felicidad.
Mis sobrinas	Alejandra y Daina Cuin, Sharon Mateo y Cristel Sandoval. Llenan mi vida de alegría.
Mi tía	Josefa Morales. Gracias por sus sabios consejos y su cariño.
Mis abuelos	Juana Cuin, Diego Morales y Dominga Tecum. Personas llenas de amor y sabiduría.
Mis amigos	Mis amigos de la secundaria y la universidad. Personas llenas de sueños y metas, las mejores amistades.

AGRADECIMIENTOS A:

- | | |
|---|---|
| Mis padres | Por todo su cariño y apoyo incondicional. Por siempre motivarme a seguir adelante. |
| Universidad de San Carlos de Guatemala | Por ser una importante influencia en mi carrera, y por las importantes enseñanzas de vida que he aprendido. |
| Facultad de Ingeniería | Por darme la oportunidad de formarme como profesional y crecer como persona. |
| Mis amigos de la Facultad | Por ser parte de esta etapa de mi vida, por brindarme su apoyo en los momentos de dificultad. |

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XV
OBJETIVOS.....	XVII
HIPÓTESIS.....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXI
1. MARCO CONCEPTUAL	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación.....	5
1.3. Determinación del problema	5
1.4. Definición	6
1.5. Delimitación.....	7
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. Biomasa	9
2.1.1. Biomasa Lignocelulósica	9
2.2. Caña de Castilla.....	10
2.2.1. Biología de la caña de Castilla	14
2.2.2. Ecología de la caña de Castilla	15
2.2.3. Composición de la caña de Castilla	15
2.2.4. Producción de caña de Castilla	16
2.2.5. Caña de Castilla en la construcción	17
2.3. Composición química de especies vegetales.....	17

2.3.1.	Lignina	18
2.3.2.	Celulosa	19
2.3.3.	Taninos	20
2.3.4.	Cenizas	21
2.3.5.	Extraíbles	21
2.4.	Tableros	22
2.4.1.	Clasificación de tableros.....	23
2.4.2.	Fabricación de tableros de partículas de madera ...	25
2.4.2.1.	Parámetros evaluados	27
2.5.	Normatividad.....	29
2.6.	Aglomerantes – resinas	29
2.6.1.	Alcohol Polivinílico	30
2.6.1.1.	Propiedades	30
2.6.1.2.	Usos	31
2.6.1.3.	Riesgos.....	31
3.	METODOLOGÍA	33
3.1.	Variables	33
3.1.1.	Variables independientes	33
3.1.2.	Variables dependientes	33
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	34
3.2.1.	Procedimiento para la formulación y elaboración de los tableros.	35
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	37
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	37
3.4.1.	Materia prima.....	37
3.4.2.	Materiales y reactivos.....	37
3.4.3.	Cristalería e instrumentación.....	38
3.4.4.	Equipo.....	38

3.5.	Técnica cuantitativa	38
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	41
3.6.1.	Caracterización de la composición química de la caña de Castilla	41
3.6.1.1.	Determinación de cenizas	41
3.6.1.2.	Determinación de los extraíbles	42
3.6.1.3.	Determinación de lignina	44
3.6.1.4.	Determinación de celulosa	45
3.6.1.5.	Determinación de taninos.....	47
3.6.2.	Evaluación de las propiedades Mecánicas	48
3.6.2.1.	Ensayo de flexión	48
3.6.2.2.	Ensayo de tensión	50
3.6.2.3.	Ensayo de dureza Janka.....	51
3.6.2.4.	Punto de ruptura.....	52
3.6.3.	Evaluación de las propiedades fisicoquímicas.....	53
3.6.3.1.	Punto de ignición	53
3.6.3.2.	Densidad	54
3.6.3.3.	Ensayo de humedad.....	54
3.6.3.4.	Ensayo de absorción de agua.....	55
3.6.3.5.	Ensayo de contracción volumétrica	56
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	56
3.7.1.	Ordenamiento de la información	56
3.7.2.	Procesamiento de la información	57
3.7.2.1.	Determinación del porcentaje de cenizas.....	57
3.7.2.2.	Determinación del porcentaje de extraíbles	57

3.7.2.3.	Determinación del porcentaje de lignina	58
3.7.2.4.	Determinación del porcentaje de celulosa	58
3.7.2.5.	Determinación del porcentaje de taninos	59
3.7.2.6.	Determinación de la flexión	59
3.7.2.7.	Determinación de la tensión.....	60
3.7.2.8.	Determinación de la dureza (Dureza Janka).....	61
3.7.2.9.	Determinación de la densidad.....	61
3.7.2.10.	Absorción de agua	62
3.7.3.	Programas que utilizar para el análisis de datos	62
3.8.	Análisis estadístico	62
3.8.1.	Determinación del número de corridas por espesor	63
3.8.2.	Media aritmética	64
3.8.3.	Desviación estándar	64
3.8.4.	Análisis de varianza.....	65
4.	RESULTADOS.....	67
4.1.	Composición química de la caña de Castilla.....	67
4.2.	Formulación de tableros	69
4.3.	Propiedades fisicoquímicas	70
4.3.1.	Punto de Ignición	70
4.3.2.	Densidad.....	72
4.3.3.	Humedad	74
4.3.4.	Absorción de agua.....	76
4.3.5.	Contracción volumétrica	78

4.4.	Propiedades mecánicas.....	78
4.4.1.	Flexión	78
4.4.2.	Tensión	81
4.4.3.	Dureza	83
4.4.4.	Punto de ruptura	85
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	87
	CONCLUSIONES	95
	RECOMENDACIONES.....	97
	BIBLIOGRAFÍA.....	99
	APÉNDICES	105

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Caña de Castilla.....	11
2.	Tallos de la especie: <i>Arundo Donax L.</i>	12
3.	Rizoma de la caña de castilla	13
4.	Estructura de la cadena celulosa	20
5.	Diagrama de proceso: elaboración de tablero aglomerado	40
6.	Esquema del ensayo de flexión.....	49
7.	Equipo para prueba de tensión.....	51
8.	Sistema de ensayo de dureza Janka	52
9.	Caracterización de la composición química de la caña de Castilla (<i>Arundo Donax L.</i>).....	68
10.	Caracterización del punto de ignición al variar la formulación y el espesor de los tableros elaborados.....	71
11.	Caracterización de la densidad al variar la formulación y el espesor de los tableros elaborados.....	73
12.	Caracterización del porcentaje de Humedad al variar la formulación y el espesor de los tableros elaborados	75
13.	Caracterización del porcentaje de Absorción de Agua al variar la formulación y el espesor de los tableros	77
14.	Caracterización de la propiedad de flexión al variar la formulación y el espesor de los tableros elaborados.....	80
15.	Caracterización de la Tensión al variar la formulación y el espesor de los tableros elaborados.....	82

16.	Caracterización de la Dureza al variar la formulación y el espesor de los tableros elaborados.....	84
17.	Caracterización del Punto de Ruptura al variar la formulación y el espesor de los tableros elaborados.....	86

TABLAS

I.	Caña de Castilla vs. Madera	16
II.	Clases de tableros	24
III.	Dimensionales: variables dependientes	34
IV.	Cantidad de tableros a elaborarse	36
V.	Relaciones matemáticas de ANOVA de un factor	65
VI.	Composición química de la caña de Castilla (<i>Arundo Donax L.</i>).....	67
VII.	Formulación y variación de espesor de tableros elaborados.....	69
VIII.	Valores del punto de ignición al variar la formulación y espesor de los tableros elaborados.....	70
IX.	Valores de la densidad al variar la formulación y el espesor de los tableros elaborados.	72
X.	Valores de % de humedad al variar la formulación y espesor de los tableros elaborados	74
XI.	Valores del % de absorción de agua al variar la formulación y espesor de los tableros elaborados.....	76
XII.	Valores de la flexión (MR) al variar la formulación y espesor de los tableros elaborados	79
XIII.	Valores de tensión (ET) al variar la formulación y espesor de los tableros elaborados	81
XIV.	Valores de dureza Janka al variar la formulación y espesor de los tableros elaborados	83

XV.	Valores de Punto de Ruptura al variar la formulación y espesor de los tableros elaborados.....	85
-----	--	----

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Absorción
a	Ancho
cm	Centímetro
cm²	Centímetro elevado al cuadrado
cm³	Centímetro elevado al cubo
%p/p	Concentración: porcentaje peso/peso
ρ	Densidad
d	Diámetro
L_d	Distancia (entre soportes prueba de flexión)
ET	Esfuerzo máximo de tracción perpendicular
E²	Espesor elevado al cuadrado
°C	Grados Celsius
g	Gramo (s)
kg o kg_f	Kilogramo-fuerza
lb o lb_f	Libra-fuerza
m	Metro
mm	Milímetro
mm²	Milímetro elevado al cuadrado
mL	Mililitros
mlb	Mililitros de blanco
mlo	Mililitros de permanganato de potasio
min	Minuto (s)
MR	Módulo de ruptura

N	Normalidad
PI	Peso inicial
Pf	Peso final
P.M.	Peso de muestra
%	Porcentaje
P_{máx}	Presión máxima
plg	Pulgadas
Rep.	Repetición
T°	Temperatura
ton	Tonelada (s)

GLOSARIO

Alcohol Polivinílico	Polímero sintético soluble en agua.
ASTM	American Society for Testing and Materials.
Caña de Castilla	Especie de planta herbácea de la familia Poaceae.
Celulosa	Polisacárido que forma parte de la estructura de las plantas, les da sostén.
CONAP	Consejo Nacional de Áreas Protegidas.
Dureza Janka	Escala de medición para medir la dureza de las maderas.
Flexión	Deformación que presenta un cuerpo en dirección perpendicular a su eje longitudinal.
Punto de ignición	Temperatura a la que el material inicia su combustión.
Tensión	Esfuerzo mecánico que realiza un cuerpo para responder a una carga.
Extraíbles	Sustancias que se extraen de los cuerpos madereros y que no son celulosa, lignina ni taninos.

FAO	Food and Agriculture Organization (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura).
INAB	Instituto Nacional de Bosques.
Lignina	Clase de polímero orgánico que da estructura a las plantas.
MDF	Tablero que se diferencia del aglomerado por la densidad de las partículas.
Módulo de Ruptura	Medida de esfuerzo necesario para llevar una pieza de tablero aglomerado al fallo.
OSB	Tableros de virutas orientadas.
Taninos	Compuestos polifenólicos producidos por las plantas madereras leñosas.
UNE	Asociación Española de Normalización.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación consistió en el aprovechamiento de la biomasa de la caña de Castilla (*Arundo Donax L.*) utilizado como materia prima en la elaboración de tableros aglomerados. Los tableros fueron fabricados a partir de una mezcla de fibras de caña y Alcohol Polivinílico utilizado como aglutinante, realizándose muestras a tres espesores distintos para dos formulaciones diferentes.

Previamente se caracterizó la composición química de las fibras de caña de Castilla a través de distintos métodos para cuantificar el porcentaje de lignina, celulosa, cenizas, taninos y extraíbles. Los resultados obtenidos muestran que las fibras están compuestas en mayor porcentaje por Celulosa y Lignina, con 45 % y 36 % respectivamente.

La elaboración de los tableros inició con la reducción de las fibras de caña y la verificación de la humedad de estas. Luego se procedió a realizar la formulación de las muestras partiendo de 0,5 lb, 1 lb y 1,5 lb de caña de Castilla y la cantidad de aglutinante correspondiente, calculado respecto del peso de caña utilizada para dar dos formulaciones: 50/50 % y 40/60 %, variando únicamente el peso de aglutinante agregado.

A las piezas elaboradas se les realizaron pruebas fisicoquímicas (punto de ignición, densidad, humedad, absorción de agua) y mecánicas (flexión, tensión, dureza Janka, punto de ruptura), tomándose como referencia lo descrito en las normativas ASTM D 1037-91 y UNE 56 757, con el fin de comparar las propiedades de los tableros fabricados.

Se mostró que los tableros tienen una alta absorción de agua con valores promedios de absorción entre 54,91 % y 54,78 % (valores más bajos) para la formulación de 50/50 y 40/60 % respectivamente. Esta alta absorción se debe a que el aglutinante es altamente soluble en agua y las fibras de caña de Castilla tienden a absorber agua en la superficie de sus partículas. Estadísticamente no existe diferencia significativa en los resultados al variar el espesor o la formulación de las piezas, debido a que la absorción de humedad depende en su mayoría a la naturaleza de los componentes y no de la cantidad añadida.

Los tableros presentaron una alta porosidad en sus cuerpos, lo cual se mostró en los resultados obtenidos del ensayo de dureza Janka. Para ambas formulaciones se mostró que la dureza aumento en los espesores intermedios y luego volvió a disminuir en los espesores más altos, obteniéndose valores de 0,9701 kg_F/mm² para 50/50 % y 1,0370 kg_F/mm² para 40/60 %. A un mayor espesor se obtuvo una mayor porosidad lo que represento una mayor facilidad de penetración. Estadísticamente se determinó que existe una diferencia significativa en los resultados de la dureza al variarse el espesor y la formulación de las piezas.

OBJETIVOS

General

Evaluar las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de un material aglomerado compuesto por fibras de caña de Castilla (*Arundo Donax L.*) y alcohol Polivinílico al variar la formulación y el espesor del tablero.

Específicos

1. Caracterizar la composición química de las fibras de caña de Castilla: extraíbles, lignina, celulosa, cenizas y taninos.
2. Formular la composición de los tableros aglomerados dosificando alcohol polivinílico en un 50 % y un 60 % del peso de la caña de Castilla: ½ lb, 1 lb y 1 ½ lb.
3. Evaluar la variación de las propiedades fisicoquímicas al variar la formulación del material compuesto por fibras de caña de Castilla y alcohol polivinílico: punto de ignición, densidad, humedad, absorción de agua y contracción volumétrica.
4. Evaluar la variación de las propiedades fisicoquímicas al variar el espesor del material compuesto por fibras de caña de Castilla y alcohol polivinílico: punto de ignición, densidad, humedad, absorción de agua y contracción volumétrica.

5. Determinar la variación de las propiedades mecánicas al variar la formulación del material compuesto por fibras de caña de Castilla y alcohol polivinílico: flexión, tensión, dureza Janka y punto de ruptura.

6. Determinar la variación de las propiedades mecánicas al variar el espesor del material compuesto por fibras de caña de Castilla y alcohol polivinílico: flexión, tensión, dureza Janka y punto de ruptura.

HIPÓTESIS

Las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de los aglomerados compuestos por partículas de caña de Castilla (Arundo Donax) y Alcohol Polivinílico varían en función de la formulación y del espesor del tablero.

Hipótesis nula:

Propiedades fisicoquímicas:

Ho:

Las propiedades fisicoquímicas de los tableros de aglomerado de caña de Castilla y alcohol polivinílico no poseen diferencia significativa al variar la formulación.

Ho:

Las propiedades fisicoquímicas de los tableros de aglomerado de caña de Castilla y alcohol polivinílico no poseen diferencia significativa al variar el espesor.

Propiedades mecánicas:

Ho:

Las propiedades mecánicas de los tableros de aglomerado de caña de Castilla y alcohol polivinílico no poseen diferencia significativa al variar la formulación.

Ho:

Las propiedades mecánicas de los tableros de aglomerado de caña de Castilla y alcohol polivinílico no poseen diferencia significativa al variar el espesor.

Hipótesis alternativa:

Propiedades fisicoquímicas:

Ha:

Las propiedades fisicoquímicas de los tableros de aglomerado de caña de Castilla y alcohol polivinílico sí poseen diferencia significativa al variar la formulación.

Ha:

Las propiedades fisicoquímicas de los tableros de aglomerado de caña de Castilla y alcohol polivinílico sí poseen diferencia significativa al variar el espesor.

Propiedades mecánicas:

Ha:

Las propiedades mecánicas de los tableros de aglomerado de caña de Castilla y alcohol polivinílico sí poseen diferencia significativa al variar la formulación.

Ha:

Las propiedades mecánicas de los tableros de aglomerado de caña de Castilla y alcohol polivinílico sí poseen diferencia significativa al variar el espesor.

INTRODUCCIÓN

Existen muchas áreas boscosas que son áreas protegidas, sin embargo, la tala de árboles ilegal sigue siendo un problema. De acuerdo con las estadísticas, en Guatemala hubo una reducción de la cobertura de bosques entre el “año 1990 y el 2015, teniéndose una pérdida del 25 %”¹. En nuestro país se estima una deforestación anual de “73 148 hectáreas”² de bosque.

Los árboles talados son utilizados en la producción de madera para usos industriales y combustibles. La mayoría de los tableros utilizados en la construcción, embalajes y en los amueblados provienen de madera sólida. En el “año 2015 en Guatemala se tenían designados 15 000 hectáreas de área boscosa para la producción de madera”³. Las estadísticas registran que el volumen promedio de la madera cosechada “entre 1999 y 2001 fue de 575 000 metros cúbicos”⁴, y a esto hay que sumarle la “cosecha ilegal que es aproximadamente entre el 30 a 50 % del volumen cosechado por año”⁵, lo que nos da en promedio un volumen total de 793 300 m³.

A manera de reducir el uso de madera en la industria, se optado por la elaboración de tableros fabricados a partir de los residuos madereros. Existe una gran variedad de tableros, como los contrachapados, los de fibra, el alistonado, el Duro, los de madera-cemento, OSB, MDF, los de madera plástica, los de partícula, entre otros. Los tableros de partícula, que también se denominan

¹ FAO. *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015, compendio de datos*. p. 11.

² INAB. *Registros 2010*. p. 37.

³ FAO. *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015, compendio de datos*. p.113.

⁴ INAB-CONAP. *Registros 1998-2001*. p. 15.

⁵ ARJONA S., Carlos O. *Primera aproximación de la madera ilegal en Guatemala*. p. 30.

tableros aglomerados, son los que se obtienen a partir de partículas de madera u otro material, aglomerados mediante un aglutinante, presión y calor.

Existen estudios previos en los cuales se han buscado alternativas para la fabricación de tableros aglomerados compuestos por materia prima diferente a la madera, como los residuos agroindustriales u otro tipo de fibra vegetal renovable. La explotación adecuada de estas fibras vegetales representa una opción innovadora, por ejemplo, las fibras de la caña de Castilla (*Arundo Donax*). Esta caña que forma densos cañaverales que nos ofrece una gran cantidad de biomasa que puede ser aprovechada. Se han obtenido producciones desde “15 ton/ha de materia seca en suelos estériles hasta 40 ton/ha” en suelos fértiles⁶. La especie de *Arundo Donax* es una planta perenne y es una de las gramíneas más grandes alrededor del mundo, el color de sus hojas es “verde glauco y pueden mantener su color durante todo el año, alcanzan alturas de 30,5 a 61 cm”⁷. Las inflorescencias se empiezan a notar en la parte final del verano.

La especie es oriunda de Asia Central y tiene la capacidad de reproducirse con rapidez y se propaga normalmente en zonas a orillas de ríos. Es considerada una planta acuática, pero es capaz de crecer en condiciones de deficiencia hídrica. Se adapta a una gran diversidad de suelos e intensidades de luz, su único factor limitante es la temperatura ya que durante climas muy fríos deja de crecer. En Guatemala se han observado cañaverales de caña de Castilla a las orillas de sus ríos. Se propone la utilización de la biomasa obtenida de esta planta como alternativa a las fibras de madera utilizados como materia prima en la fabricación de tableros aglomerados, así como la evaluación de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas que los caracterizan.

⁶ GARCÍA ORTUÑO, Teresa. *Caracterización de la caña común (Arundo Donax L.) para uso como material de construcción*. p. 18.

⁷ DELTORO TORRÓ, Vicente; JIMÉNEZ RUIZ, Jesús; VILÁN FRAGUEIRO, Xóse Manuel. *Bases para el manejo y el control de Arundo Donax L. (caña común)*. p. 13.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1. Antecedentes

El estudio y la evaluación de las propiedades de tableros aglomerados, compuestos por diferentes residuos agroindustriales o partículas de distintas biomásas con varios tipos de aglomerantes, se han venido realizando con la finalidad de reducir el uso de la madera (y por ende reducir la tala de árboles) en la construcción, el embalaje y la industria de los muebles.

En la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, en la carrera de Ingeniería en Medio Ambiente, según CHUMO ZAMBRANO, Nixon Leonardo, en la tesis, *Ecotableros a base de residuos agroindustriales de cascarilla de arroz y bagazo de caña de azúcar en el cantón de Tosagua, Manabí*, se determinó que los Ecotableros con las mejores características de calidad y mayor eficiencia económica fueron los tableros que contenían 20 g de bagazo de caña, 80 g de cascarilla de arroz y espesores de 3 a 4 mm.

En la Universidad de San Carlos de Guatemala en la carrera de Ingeniería Química, según COYOY PAZ, Ana Gabriela, en la tesis, *Formulación de un material fibroreforzado a base de la mezcla de la cáscara de coco y polímero reciclado*, se determinó que el material fibroreforzado con mayor calidad se obtuvo con una formulación de 80 % propileno y 20 % fibra de coco, presentándose una baja capacidad de absorción y porcentaje de humedad, a pesar del alto contenido de humedad de la fibra de coco pura.

En la Universidad de Alicante en el Programa de Doctorado denominado, Ingeniería de Materiales, del Agua y del Terreno (código 1002), según MACIA MATEU, Antonio, en la tesis doctoral, *Tableros de Posidonia oceánica y partículas de madera de pino gallego, Estudio de propiedades mecánicas compresión paralela al tablero*, se determinó que los tableros que mejor comportamiento estructural presentaron fueron los tableros compuestos por un 25 % de Posidonia Oceánica y un 75 % de partículas de madera de Pino mezcladas con Poliéster de Reticulación Química con Isocianato (MDI) dosificado entre un 15 % y un 20 % del peso de la suma de las materias primas utilizadas.

En la Fundación Universitaria Agraria de Colombia en el programa de Ingeniería Agroindustrial, HERNANDEZ TORRE, David Augusto, realizó la tesis denominada: *Utilización de materias primas alternas (Tusa de maíz y residuos de la industria maderera) para la obtención de tableros aglomerados, mediante el uso de formaldehído como aglutinante*, con el fin de determinar la viabilidad del uso de materiales alternativos para la elaboración de tableros aglomerados que se puedan utilizar en la fabricación de mobiliarios.

En la Universidad Técnica de Ambato, Ecuador, en la carrera de Ingeniería Mecánica, según MORALES CISNEROS, Klever Santiago, en la tesis, *Estudio del proceso de doblado de material compuesto por láminas de Triplex y fibras de densidad media como material alternativo a la madera sólida y su incidencia en tiempos de producción de muebles*, se concluyó que el material compuesto por láminas de Triplex y fibras de densidad media pueden ser usados como material alternativo a la madera sólida en la fabricación de muebles debido a los valores aceptables obtenidos de las propiedades mecánicas del material compuesto.

En la Universidad Técnica Estatal de Quevedo en Ecuador, ERAS AGILA, Jorge Benigno, realizó la tesis, *Evaluación del proceso de elaboración de un*

aglomerado para cielo raso, a partir del raquis de la palma aceitera en combinación con la cascarilla de arroz, con el objetivo de proponer una alternativa para el uso de desechos agroindustriales y el desarrollo de las agroindustrias y reducir la contaminación ambiental.

En la Universidad Dr. Matías Delgado de El Salvador, en la Facultad de Ciencias y Artes Francisco Gavidia, según ACOSTA RODRÍGUEZ, Cecilia Carolina, y FIGUEROA LÓPEZ, Yanira Mayarit, en la tesis, *Estudio demostrativo del proceso artesanal de aglomerado a base de estopa de coco como materia prima*, se determinó que los tableros aglomerados de estopa de coco elaborados de manera artesanal son una alternativa ante los tableros elaborados a nivel industrial y que además conlleva un valor agregado por ser fabricados a través de un proceso ecológico.

En la Universidad de San Carlos de Guatemala en la carrera de Ingeniería Química, según GONZÁLES GUDIÉL, S., en la tesis, *Evaluación de la elaboración de tableros de partículas del aserrío de la madera de palo blanco (Cybistax donell-smithi Seibert) de los primeros raleos utilizando diferentes tipos de aglomerantes*, se determinó que los tableros de mejor calidad obtenidos correspondieron a los tableros de barniz poliuretano con proporción de 15 % y 18 % de aglomerante. La tesis se realizó con el objetivo de aprovechar los subproductos del aserrío de madera.

En la Universidad de San Carlos de Guatemala en la carrera de Ingeniería Química, según MONTERROSO WAIGHT, Brenda María, en la tesis, *Evaluación de propiedades físico-mecánicas de los tableros de aglomerados elaborados con cascarilla de café (coffea arabica) y colofonia, por el efecto de la carga de compactación y tiempo de prensado*, se llegó a la conclusión de que las propiedades mecánicas de los tableros compuestos por cascarilla de café y

colofonia se ven afectados por su bajo contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina.

En la Universidad de San Carlos de Guatemala en la carrera de Ingeniería Química, según SANTA CRUZ ORELLANA, Tania Sharaim, en la tesis, *Evaluación de la utilización de epicarpio de maní (Arachis Hypogae, C. Linneo)*, se llegó a la conclusión de que es posible realizar aglomerados de calidad agregando cascara de maní en una cantidad de hasta 30 %, y que la calidad de los paneles mejora con la reducción de las partículas de cascara de maní y el aumento de la cantidad del aglutinante.

En la Universidad de Burgos en el área de Química Orgánica, según ESTÉVEZ BOLÍVAR, Pedro Antonio, en la tesis, *Desarrollo caracterización y optimización de resinas base Urea-Formol (UF), como adhesivos para tableros aglomerados con baja emisión de Formaldehído*, se concluyó que un proceso alternativo para reducir el contenido de formaldehído en la elaboración de tableros aglomerados es la utilización de colas de distinta formulación y relación molar F/U, tanto en las capas externas como en las internas obteniéndose así buenas propiedades mecánicas.

En la Universidad Miguel Hernández del Che, en la Escuela Superior de Orihuela, según FLORES YEPES, José Antonio, en la tesis, *Fabricación y análisis de tableros de aglomerado de caña común (Arundo Donax L.)*, se determinó que los tableros aglomerados a base de caña común y resina de urea formaldehído presentan un comportamiento favorable y satisfactorio frente al agua, sin embargo, no lo hacen como un elemento resistente debido a la falta de adherencia del aglutinante utilizado.

1.2. Justificación

Guatemala es un país que cuenta con muchas zonas ribereñas, zonas en las cuales crecen y se reproducen una gran variedad de plantas. Se ha observado que en muchos terrenos a orillas de ríos se forman densos cañaverales, conformados por un tipo de caña denominado en nuestra región y en otras como caña de Castilla o caña común (*Arundo Donax*).

La caña de Castilla es originaria de Asia Central, se ha extendido a diferentes regiones incluyendo América Central. Se adapta a la mayoría de los suelos, se desarrolla muy bien bajo varias condiciones climáticas, por lo que se puede distribuir de una manera muy extensa. Es considerada una planta salvaje de rápida propagación.

En este estudio se presenta una alternativa para aprovechar la biomasa que se puede obtener a partir de la caña de Castilla, la cual puede generar entre “15 ton/ha de materia seca en suelos estériles hasta 40 ton/ha en suelos fértiles”⁸. La materia obtenida a partir de esta planta representa una opción para utilizarse como materia prima en la fabricación de tableros aglomerados y así reducir el uso de madera sólida, lo cual reduce el consumo de árboles y ayuda al cuidado del medio ambiente.

1.3. Determinación del problema

La tala de árboles no controlada se da debido a la demanda de madera utilizada en construcciones, embalajes e industria de muebles. En Guatemala se ha tenido una “pérdida del 25 % del área de bosque entre los años de 1990 y

⁸ GARCÍA ORTUÑO, Teresa. *Caracterización de la caña común (Arundo Donax L.) para uso como material de construcción*. p. 18.

2015”⁹. La búsqueda de opciones para la elaboración de materiales que cubran parte de esta demanda se ha venido realizando a través de estudios sobre tableros de partículas fabricados a partir de residuos agroindustriales y partículas de biomasa lignocelulósica no maderera.

Estos tableros aglomerados se han visto como una buena opción debido a que se aprovechan los residuos que las agroindustrias desechan y la fibra vegetal no maderera que se utiliza es renovable y reciclable, lo cual representa una alternativa amigable con el ambiente. Un ejemplo de fibra vegetal no maderera es la obtenida de la biomasa de la caña de Castilla.

1.4. Definición

La caña de Castilla es una especie muy agresiva, con una capacidad de reproducirse rápidamente en zonas ribereñas y puede adaptarse a una gran variedad de ambientes, por lo que se puede cultivar en diferentes regiones.

En Guatemala no existe proceso alguno en el cual se aproveche la biomasa generada por la caña de Castilla. Las fibras de esta caña pueden ser utilizadas como materia prima en la elaboración de tableros aglomerados, sin embargo, se desconocen las características de sus propiedades fisicoquímicas y mecánicas que se obtendrían al variar la formulación y el espesor de los tableros.

Este estudio se enfoca en la búsqueda de nuevas alternativas de biomasa para reducir el uso de madera, evaluando las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de tableros aglomerados elaborados a partir de una mezcla de partículas de caña de Castilla y alcohol polivinílico, tomando como referencia los procedimientos de las evaluaciones para tableros de partículas de las normas

⁹ FAO. *Evaluación de los Recursos Forestales mundiales 2015, compendio de datos*. p.11.

ASTM (*American Society for Testing and Materials*) y UNE (Una Norma Española).

1.5. Delimitación

La parte experimental correspondiente tanto a la evaluación de propiedades fisicoquímicas como la evaluación de las propiedades mecánicas se realizarán en el Laboratorio Multipropósito en la Sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Ensayos fisicoquímicos:
 - Punto de ignición
 - Densidad
 - Humedad
 - Absorción de agua
 - Contracción volumétrica

- Ensayos de propiedades mecánicas:
 - Flexión
 - Tensión
 - Dureza
 - Punto de ruptura

La parte experimental correspondiente a la caracterización de la composición química de las fibras de caña de Castilla se llevará a cabo en el Laboratorio Industrial de Extracciones Vegetales (LIEXVE) del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Caracterización de la composición química de las fibras de la materia prima:

- Lignina
- Celulosa
- Cenizas
- Taninos

La materia prima (caña de Castilla) se obtendrá de la colonia Joya Senahú, Chinautla, zona 6.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Biomasa

La biomasa es la materia orgánica que proviene tanto de animales como de vegetales, en estos se incluyen los residuos y desechos de estos, y que son aprovechados como energía ecológica. En la actualidad la biomasa residual también es aprovechada para la elaboración de materiales de valor agregado.

2.1.1. Biomasa Lignocelulósica

“Se denomina biomasa lignocelulósica a la fibra vegetal seca que está compuesta por celulosa, hemicelulosa y lignina. Las fibras lignocelulósicas están clasificadas en biomasa virgen, biomasa residual y cultivos energéticos”¹⁰.

La biomasa virgen abarca todas las plantas terrestres, como, por ejemplo, árboles, arbustos y pastos. La biomasa residual es la que se obtiene como un subproducto de bajo valor o como residuo de la agroindustria (bagazo de caña de azúcar, paja, cascarilla de arroz, aserrín, entre otros.). Los cultivos energéticos tienen un alto contenido de biomasa lignocelulósica la cual es producida con el fin de usarse como materia prima en la elaboración de biocombustibles de segunda generación.

Las fibras lignocelulósicas poseen ciertas características que las hacen de especial interés para la industria, debido a que son materiales poliméricos de

¹⁰ PIÑEROS CASTRO, Yineth. *Aprovechamiento de biomasa lignocelulósica, algunas experiencias de investigación en Colombia*. p. 8.

origen renovable, sus derivados son biodegradables y es un material reciclable. La biomasa lignocelulósica más utilizada en el mundo es la madera, esta es utilizada en la industria papelera, la industria inmobiliaria, construcción y en la industria de los combustibles. Los residuos de madera como el aserrín y las virutas son ampliamente utilizados en la elaboración de tableros aglomerados de partículas.

Como alternativa al uso de madera se han estado utilizando otros tipos de fibras vegetales para la elaboración de materiales útiles, como lo son los tableros aglomerados. Existen algunas dificultades para la explotación de este tipo de materia, siendo las principales la recolección y el almacenaje. La variedad de cualidades presentes en las fibras no madereras puede ser utilizada de una manera muy innovadora.

2.2. Caña de Castilla

La caña de Castilla (*Arundo Donax L.*) pertenece a la familia de las gramíneas (*Poaceae*) y está conformada por seis especies nativas de climas cálidos de Europa, Asia y África. “Desde un punto de vista taxonómico la especies que incluyen *Arundo Donax* pertenecen a la subfamilia *Arundinoideae*, que incluye gramíneas tropicales caracterizadas principalmente por su inflorescencia plumosa (*Cortaderia*, *Phragmites*, entre otros.)”¹¹.

La caña de castilla es una planta es originaria de Asia Central, debido a su capacidad de propagarse rápidamente se ha infiltrado en otros países y continentes con la ayuda del hombre que la ha introducido a otros territorios de

¹¹ DELTORO TORRÓ, Vicente; JIMÉNEZ RUIZ, Jesús; VILÁN FRAGUEIRO, Xosé Manuel. *Bases para el manejo y control de Arundo Donax L. (Caña común)*. p. 12.

manera intencional. Se ha extendido fuertemente en América Central, sur de Estados Unidos y en las islas de las Bermudas y las Bahamas.

Es conocida con muchos nombres en diversas regiones gracias a su extensa distribución geográfica y utilización. *Arundo Donax L.* es conocido con nombres como “caña común, caña de Castilla, caña gigante, carrizo, cañizo, caña española, bambú español, guadua de Castilla, caña del nal, canya de San Joan, garriz, kañavera, entre otros, en España y países de habla hispana”¹².

La caña de Castilla es la especie de mayor tamaño del género *Arundo L.* y una de las gramíneas más grandes del mundo. Sus hojas alternas de color verde glauco pueden mantenerse verdes todo el año. sin embargo, en regiones donde se tienen varias estaciones climáticas al año, las hojas y los tallos toman un color amarillento durante la época más seca del año o en los meses de invierno, que es el periodo en donde la especie entra en un estado de reposo vegetativo.

Figura 1. **Caña de Castilla**



Fuente: DELTORO TORRÓ, Vicente; JIMÉNEZ RUIZ, Jesús; VILÁN FRAGUEIRO, Xosé Manuel. *Bases para el manejo y control de Arundo Donax L. (Caña común)*. p. 36.

¹² GARCÍA ORTUÑO, Teresa. *Caracterización de la caña común (Arundo Donax L.) para uso como material de construcción*. p. 12.

La parte aérea de la caña de Castilla es enteramente fotosintética durante los primeros meses de vida y está formada por tallos rígidos de una “altura de entre 5 y 6 m, los cuales están huecos y fraccionados, y tienen un diámetro promedio de 2 centímetros. Alcanza alturas amplias debido a estructuras en forma de anillos engruesados (nudos) cada 20-30 centímetros”¹³. Estos nudos tienden a abundancia de fibras lignificadas, lo que representa una gran estabilidad mecánica, de modo que su porte erguido es independiente de la turgencia de la planta (los tallos de la caña no se marchitan por la falta de agua). Además, los nudos alojan brotes de las que crecen ramas secundarias en su segundo año de vida.

Figura 2. **Tallos de la especie: *Arundo Donax L***



Fuente: DELTORO TORRÓ, Vicente; JIMÉNEZ RUIZ, Jesús; VILÁN FRAGUEIRO, Xosé Manuel. *Bases para el manejo y control de Arundo Donax L. (Caña común)*. p. 13.

¹³ DELTORO TORRÓ, Vicente; JIMÉNEZ RUIZ, Jesús; VILÁN FRAGUEIRO, Xosé Manuel. *Bases para el manejo y control de Arundo Donax L. (Caña común)*. p. 13.

Tanto tallos y hojas poseen un alto contenido de sílice, debido a la presencia de células silíceas asociada con los haces vasculares en la capa dérmica.

El órgano perenne de la caña de Castilla es el rizoma, el cual actúa como una reserva de carbohidratos además de ser el responsable de la producción de nuevos tallos. Está localizado en la parte subterránea de la planta a una profundidad de entre 5-15 centímetros normalmente, ya que puede llegar a los 40-50 centímetros. Del rizoma parten también raíces fibrosas capaces de penetrar en el suelo hasta una profundidad de 1 m. Este órgano se expande de manera horizontal y se ramifica al alcanzar áreas de sustrato libres de competencia.

Figura 3. **Rizoma de la caña de castilla**



Fuente: DELTORO TORRÓ, Vicente; JIMÉNEZ RUIZ, Jesús; VILÁN FRAGUEIRO, Xosé Manuel. *Bases para el manejo y control de Arundo Donax L. (Caña común)*. p. 14.

La planta crece normalmente en zonas ribereñas y forma densos cañaverales que se expanden de manera lenta debido al crecimiento de los rizomas. Los rizomas son arrancados pueden ser arrancados por las corrientes de agua del río y así ser trasladados a otras zonas. La caña de Castilla es una planta salvaje por lo que se desconoce parcialmente sus mecanismos de propagación.

2.2.1. Biología de la caña de Castilla

“El rizoma de la caña deja de producir tallos cuando está por debajo de 7 °C, y por encima de los 30 °C también se produce una inhibición de la brotación”¹⁴. En territorios con variación en sus estaciones, los nuevos tallos crecen durante el verano y la primavera, se desarrollan verticalmente y producen únicamente tejido fotosintético.

En época de invierno la planta sufre una reducción en su actividad fisiológica, las hojas inferiores comienzan a secarse, el contenido de agua en la parte aérea disminuye en paralelo a una gradual lignificación y pérdida del color verde. Junto a este proceso se produce una inflorescencia espumosa en la parte superior de los tallos.

La caña de Castilla florece a finales de la época de verano, sin embargo, sus semillas no son fértiles por lo que el crecimiento y la extensión de los cañaverales se da de dos formas: a) Crecimiento vegetativo. Es el resultado del enraizamiento de tallos lignificados (producción de nuevas plantas a partir de las yemas presentes en los nudos de los tallos tumbados al suelo) y el crecimiento de rizomas. b) Reproducción asexual. Ocurre ocasionalmente cuando las plantas

¹⁴ SPENCER, David F., KSANDER, Gregory G. *Estimating Arundo Donax shoot biomass*. p. 272.

originadas por enraizamiento de cañas lignificadas se convierten en plantas autónomas.

2.2.2. Ecología de la caña de Castilla

La caña de Castilla es considerada una planta invasora debido a su plasticidad fenotípica, y posiblemente es capaz de crecer en una amplia variedad de condiciones ambientales por esta propiedad que posee. También es considerada una planta acuática, pero tiene la capacidad de crecer bajo condiciones de deficiencia hídrica debido a la resistencia a la sequía del rizoma y a la capacidad de sus raíces de obtener agua de las capas profundas del sustrato. Su plasticidad le permite desarrollarse bajo un amplio gradiente de intensidades luminosas. Sin embargo, existen estudios que apuntan a que la sombra puede dificultar su establecimiento en las orillas fluviales.

Arundo Donax L. puede crecer y desarrollarse en una diversidad de suelos (arcillosos, arenosos, pedregosos e incluso los semisalinos). La temperatura podría ser su único factor ecológico limitante, ya que es sensible a las heladas una vez iniciado su crecimiento.

2.2.3. Composición de la caña de Castilla

La biomasa proveniente de la caña de Castilla es considerada como fibra vegetal, siendo la celulosa su componente principal (como en las demás plantas no madereras y madereras). La celulosa es un polímero natural de la glucosa que forma fibras resistentes a la tracción las cuales aparecen entretrejidas en una matriz amorfa de hemicelulosa y lignina. La hemicelulosa es un polímero de la glucosa ramificado y la lignina es un polímero de origen fenólico insoluble en agua. En la maduración de la caña se produce una lignificación de la celulosa por

lo que el material obtiene una alta resistencia a la compresión y aumenta su dureza.

Tabla I. **Caña de Castilla vs. Madera**

Especie	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)
Caña de Castilla (<i>Arundo Donax L.</i>)	31	30	21
Madera dura	45	30	20
Madera blanda	42	21	26

Fuente: elaboración propia, con información DELTORO TORRÓ, Vicente; JIMÉNEZ RUIZ, Jesús; VILÁN FRAGUEIRO, Xosé Manuel. *Bases para el manejo y control de Arundo Donax L. (Caña común)*., empleando Microsoft Word.

2.2.4. Producción de caña de Castilla

El cultivo de la caña de Castilla se realiza en pocos lugares. Se cultiva en la región de Var en Francia, con la finalidad de usarse para la fabricación de instrumentos musicales; en el norte de Italia, para la industria del rayón; y recientemente se empezó a cultivar en otras regiones como en Argentina, Formosa, entre otros. La producción intencional de la caña no es tan popular, por lo que hay pocas referencias sobre su cultivo.

La recolección de la caña se hace de manera manual y es muy dificultosa, debido a los densos cañaverales que se producen. En la actualidad se han experimentado nuevos métodos de recolección con ayudas de máquinas segadoras existentes en el mercado.

En los cultivos que se han realizado se ha logrado obtener entre “20 y 25 toneladas de materia seca por hectárea; 35 ton/ha considerado sólo vástagos secados al aire; producciones de materia seca en suelos estériles de 15 ton/ha, hasta 40 ton/ha”¹⁵ en suelos fértiles.

2.2.5. Caña de Castilla en la construcción

La caña de castilla ya se ha utilizado en épocas anteriores en la construcción, sin embargo, la introducción de nuevos materiales más duraderos y económicos ha hecho que este material no esté tan industrializado como la madera y el bambú.

La búsqueda de nuevas alternativas para la obtención de materiales utilizados tanto en la construcción como en otras actividades, como lo es la industria mobiliaria, ha orientado al estudio de las propiedades físico-mecánicas de la caña de castilla. Se han realizado estudios diversos sobre estas propiedades del tallo obtenido directamente de los cañaverales, sin embargo, en Guatemala no se ha explorado su utilidad en materiales aglomerados de partículas.

2.3. Composición química de especies vegetales



La composición química elemental de las especies vegetales madereras y no madereras son básicamente las mismas. Por ejemplo, la madera está compuesta químicamente por carbono, hidrogeno, y oxígeno, principalmente. La caracterización química de varias especies vegetales muestra la siguiente

¹⁵ GARCÍA ORTUÑO, Teresa. *Caracterización de la caña común (Arundo Donax L.) para uso como material de construcción*. p. 18.

composición: “carbono 49-50 %, hidrogeno 6 %, oxígeno 44-45 %, y nitrógeno 0.1-1 % (porcentaje en peso de madera)”¹⁶.

Los componentes orgánicos de una especie vegetal como la madera o similares, son producto de la combinación del oxígeno, hidrogeno y carbono. Estos componentes son: α -celulosa, hemicelulosa y lignina; estos no son fáciles de identificar y cada uno es una combinación de compuestos químicamente relacionados.

2.3.1. Lignina

Lignina es una palabra de origen latín (*Lignum*) que significa madera, por lo que a las especies vegetales que tienen un alto contenido de lignina se les denomina leñosas. La lignina está presente en las paredes celulares de las plantas.

Es un compuesto complejo aromático, siendo el polímero orgánico más abundante del mundo vegetal, luego de los polisacáridos. Es una fibra vegetal no perteneciente a los polisacáridos y que cumple con un papel importante en la estructura de las maderas. Por ejemplo, proporciona un medio de transporte para los nutrientes, agua y metabolitos.¹⁷.

Las características físicas de los polímeros de lignina son: insolubles en agua, solubles en álcalis fuertes, no digeribles, no se absorben. En conjunto con la celulosa sirven para la construcción y como soporte mecánico del tallo y las ramas.

¹⁶ PAZ FONG, Francisco José. *Determinación de la composición química de la madera obtenida del primer clareo en árboles de Melina (Gmelina Arborea Roxb.) de una plantación proveniente del departamento de Izabal.* p. 2.

¹⁷ PAZ FONG, Francisco José. *Determinación de la composición química de la madera obtenida del primer clareo en árboles de Melina (Gmelina Arborea Roxb.) de una plantación proveniente del departamento de Izabal.* p. 9.

2.3.2. Celulosa

“La celulosa es un homopolisacárido (es decir, compuesto de un único tipo de monómero) rígido, insoluble, que contiene desde varios cientos hasta varios miles de unidades de glucosa.”¹⁸.

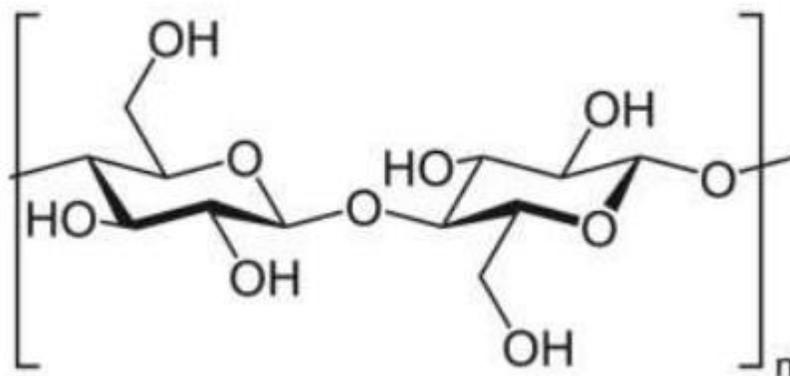
Este componente orgánico se forma a partir de la combinación de moléculas β -glucosa, siendo una hexosa que forma glucosa mediante un proceso de hidrólisis. La fórmula empírica de esta molécula es $(C_6H_{10}O_5)_n$, siendo n mínimo igual a 200, por lo que su peso molecular puede variar.

La celulosa forma parte de los tejidos que da soporte mecánico a las plantas. Una cepa de una célula vegetal nueva, aproximadamente, contiene un 40 % de este polisacárido estructural. La madera lo contiene en un 50 % y el algodón contiene hasta un 90 % de este compuesto orgánico”¹⁹.

¹⁸ PAZ FONG, Francisco José. *Determinación de la composición química de la madera obtenida del primer clareo en árboles de Melina (Gmelina Arborea Roxb.) de una plantación proveniente del departamento de Izabal.* p. 10.

¹⁹ PAZ FONG, Francisco José. *Determinación de la composición química de la madera obtenida del primer clareo en árboles de Melina (Gmelina Arborea Roxb.) de una plantación proveniente del departamento de Izabal.* p. 11.

Figura 4. Estructura de la cadena celulosa



Fuente: AREA, María Cristina. *Fibras. Estructura y Topo química*. p. 22.

2.3.3. Taninos

“Los taninos son compuestos polifenólicos, capaces de contraer los tejidos orgánicos, por lo que es de uso industrial ha sido de gran manera para curtir pieles.”²⁰.

La fórmula empírica con la cual se representa a los taninos es $C_{76}H_{52}O_{46}$ y es descrita como penta-(m-digaliol)-glucosa. Con peso molecular entre 500 uma a 3 000 umas.

Los taninos se producen en distintas partes de los vegetales y las diferencias presentadas en el color, calidad y concentración de estos se debe a las características propias de cada planta específica. Se oxidan al contacto con el aire y tiene un punto de inflamación de 199 °C. Forman un colorante azul-

²⁰ FONSECA MALDONADO, Mario Roberto. *Determinación de la composición química de la madera de pino Candelillo (Pinus maximinoi H.E. Moore) procedente de la finca Río Frío, Tactic, Alta Verapaz*. p. 43.

verdoso al momento de combinarse con sales de hierro, por lo cual es aprovechado para la elaboración de bases de tintas.

2.3.4. Cenizas

Las cenizas son determinadas a partir de un proceso en el cual la especie vegetal seca es introducida a un horno en el cual se combustiona hasta que su estructura comienza a fraccionarse hasta obtener un producto final conocido como carbón vegetal. La combustión del material seco produce carbón, vapor de agua, y otros compuestos químicos más complejos.

Los compuestos químicos complejos que se forman a partir del fraccionamiento de la materia seca por medio de su combustión son básicamente en la forma de alquitranes y gases no condensables, principalmente hidrogeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono. Junto con las cenizas de la materia seca original se tienen también residuos de alquitranes.

“El carbón que se produce contiene alrededor de un 30 % en peso de cenizas y el balance de carbono fijo entre 67-70 % y también contiene cantidades muy pequeñas de otros elementos como fosforo, azufre, sodio, aluminio, titanio,”²¹ entre otros.

2.3.5. Extraíbles

Los extraíbles son compuestos presentes en menor cantidad en las especies vegetales como la madera, y no forman parte de la composición de las paredes celulares de estas mismas. Hay varios factores que afectan la cantidad

²¹ FONSECA MALDONADO, Mario Roberto. *Determinación de la composición química de la madera de pino Candelillo (Pinus maximinoi H.E. Moore) procedente de la finca Río Frío, Tactic, Alta Verapaz.* p.48.

en que estos compuestos se presentan en los vegetales, tales como las condiciones de crecimiento, la parte de la planta de donde se tome la muestra, entre otros.

En maderas secas, las sustancias extraíbles son entre un “3 % a 10 %, para coníferas abarcan aproximadamente entre 5 % y 8 %, y para latifolias entre 2 % y 4 %”²². Estas sustancias también son las responsables de ciertas características que toman las plantas, como lo son el color, sabor o abrasividad.

“Los extraíbles que se encuentran en los tejidos vegetales son sustancias tales como terpenos, fenoles, taninos, minerales, azúcares, hidrocarburos alifáticos y aromáticos, ácidos alifáticos y aromáticos, esterinas, aceites esenciales, ácidos grasos y resinosos, resinas, grasas y otros”¹⁶.

2.4. Tableros

Los tableros de mayor fabricación en la industria son los que se fabrican a partir de residuos de madera, que ha surgido como una alternativa al uso de madera sólida. Estos tableros de residuos madereros son obtenidos por determinada desintegración del fuste del árbol y recomposición con el auxilio de pegamentos, en la forma que más interese. De esta manera surgen distintos tipos de tableros.

Aunque existen evidencias de la fabricación de tableros en la antigüedad, no fue hasta hace un siglo que apareció de forma generalizada. Su fabricación se debió a varias razones, pero las dos principales fueron: la necesidad de

²² PAZ FONG, Francisco José. *Determinación de la composición química de la madera obtenida del primer clareo en árboles de Melina (Gmelina Arborea Roxb.) de una plantación proveniente del departamento de Izabal.* p. 25.

materiales de superficies más anchas que las obtenidas a partir de madera sólida, y la necesidad de obtener un material de mayor homogeneidad.

El primer tablero que apareció fue el contrachapado y como una derivación de esta el tablero alistonado. Pero no fue hasta 6 décadas que la elaboración de tableros tomo fuerza con la aparición del tablero de partículas, también llamado aglomerado, en donde la aglomeración se realizaba con cola sintética. Paralelo a este apareció el tablero de fibras duro la cual no contiene aglomerante. Luego apareció el tablero de fibras de densidad media, y últimamente han surgido otros tipos de tableros denominados laminados.

Todos los tipos de tableros mencionados anteriormente son los de uso más generalizado, pero además de estos, debido a las diferentes necesidades que se presentan en la industria, han surgido otros tipos de tableros de usos más específicos, por ejemplo, los tableros de virutas anchas, los tableros OSB, tableros madera-cemento, e incluso tableros formados por otros materiales lignocelulósicos no madereros, como los tableros de bagazo de caña de azúcar. Además, se han realizado estudios para darle más auge a los tableros de fibras vegetales no madereros.

En Guatemala se fabrican una variedad de tableros aglomerados los cuales incluyen: el tablero aglomerado Uberico, tablero enchapado, tablero melamínico, MDF, el tablero aglomerado MUF y el cartón piedra.

2.4.1. Clasificación de tableros

Los tableros se pueden clasificar de acuerdo con el uso que se le vaya a dar o por su forma de fabricación.

Tabla II. **Clases de tableros**

TIPO DE CLASIFICACIÓN	CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN	TIPO DE TABLEROS
De acuerdo con su uso final.	Tableros estructurales	Son los empleados en la industria de la construcción y del embalaje.	Contrachapados estructurales, Waferboard y OSB.
	Tableros no estructurales	Son los empleados en la industria de los muebles	Contrachapado decorativo, duros y MDF
Por su forma de fabricación y materia prima empleada	Tableros de partículas	Son fabricados a partir de madera u otro tipo de materia y aglomerados mediante aglutinantes, calor y presión.	Tableros de partículas, Waferboard y OSB
Por su forma de fabricación y materia prima empleada	Tableros de fibras	Elaborados a partir de fibras de madera por infiltrado y prensado	Duros, MDF y aislantes
	Tableros contrachapados	Elaborados a partir de láminas de madera y conformados perpendicularmente entre sí.	Contrachapados

Continuación tabla II.

Por su Forma de fabricación y materia prima empleada	Tableros extrusionados	Compuesto por fibra de madera/plástico fundidos en una máquina de extrusión.	Mezclado de madera y plástico
Por su forma de fabricación y materia prima empleada	Tableros CSL	Elaborado bajo presión en continuo por largas y gruesas tiras de madera,	Continuos Strand Lumber
	Madera Micro laminada	Basado en chapas de madera, de mayor resistencia y buenos niveles de rendimiento.	LVL

Fuente: elaboración propia, con información de FLORES YEPES, José Antonio. *Fabricación y análisis de tableros de aglomerado de caña común (Arundo Donax L.)*, empleando Microsoft Word.

Los *Waferboard* son tableros fabricados con partículas de madera en forma de hojuelas, los tableros OSB son fabricados a partir de virutas o hebras orientadas en forma perpendicular entre sí, y los MDF son tableros de fibras de densidad media.

2.4.2. Fabricación de tableros de partículas de madera

La fabricación de tableros de partículas comienza con la eliminación de la corteza de la madera, la cual rebaja las propiedades mecánicas del tablero y la

oscurece. Luego se somete a un tratamiento de corte y fragmentación en grueso y en anchura. Se procede al astillado con la ayuda de molinos para producir partículas.

Las astillas obtenidas se someten a un proceso de tamizado para obtener el tamaño adecuado para el siguiente paso. Normalmente se utiliza un tamiz de entre 5-50 mm de luz. Los fragmentos que no alcanzaron el tamaño adecuado de partícula son reducidos en molinos de martillos. Posteriormente se procede a la fase de secado la cual representa una característica muy importante a la hora del prensado del tablero y esta se divide en dos fases: La primera fase consiste en un “calentamiento de contacto indirecto con las partículas con aire a 300 °C. La segunda fase se pone a las partículas en contacto directo con aire a 500 °C. Las partículas salen del secador con una humedad entre 3-6 %”²³.

Las partículas desecadas se a la fase de encolado, que es donde se pone a las partículas en contacto con el aglutinante que en este caso es la cola para madera. El siguiente paso es la formación de la manta para posteriormente pasarse al preprensado sin calefacción. Este preprensado comprime la manta hasta un grueso entre el 50 y el 65 % con respecto al grueso inicial.

El siguiente paso del proceso es el prensado de la manta con calefacción controlada produciéndose así el fraguado de cola de la manta. En este paso se debe controlar la temperatura, velocidad de prensado y la carga de presión. Luego del fraguado se procede a la apertura de los moldes.

Los tableros obtenidos se voltean con la ayuda de un volteador mecánico. En este paso se realiza una inspección superficial y se deja enfriar al tablero. Por último, se realiza el lijado y el escuadrado.

²³ VIGNOTE PEÑA, Santiago; MARTÍNEZ ROJAS, Isaac. *Tecnología de la madera*. p. 475.

2.4.2.1. Parámetros evaluados

Los parámetros que normalmente son evaluados en tableros de partículas se dividen en parámetros fisicoquímicos y mecánicos. Estas evaluaciones se llevan a cabo con la finalidad de determinar las propiedades que definen al material, y así establecer su viabilidad para el uso final que se le quiera dar.

- Parámetros fisicoquímicos:

Estos parámetros son los parámetros físicos y químicos que definen al tablero:

- Punto de ignición: este es el conjunto de condiciones (temperatura, presión, humedad, entre otros.) necesarias para que el material empiece a arder al acercar una fuente de calor.
- Densidad: es la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia u objeto sólido. Los tableros de partículas se comercializan en medidas y espesores estandarizados. Si se aumenta el espesor del tablero se reduce su densidad y con ello su resistencia, es decir, que tableros de pequeños espesores tienen un poco más de densidad y mejor resistencia.
- Humedad: esta propiedad se refiere al porcentaje de humedad en equilibrio del material, es decir, es la cantidad de humedad que solido contiene debido a su higroscopicidad, sin que tenga contacto con una masa de agua líquida.

- Absorción de agua: es la propiedad de los algunos sólidos para absorber humedad cuando se sumergen en agua líquida, hasta llegar a la saturación, causando un aumento en el volumen y peso del material.
- Contracción volumétrica: consiste en que el sólido absorba o pierda humedad. En la madera existe un punto denominado punto de saturación de la fibra (PSF), en la cual la madera no sufre contracción.
- Parámetros mecánicos

Estos determinan las propiedades de resistencia mecánica del material, que en este caso son pruebas para tableros de partículas.

- Flexión: un material tiende a flexionarse (doblarse) cuando se le aplica una o varias fuerzas perpendiculares a su posición. El ensayo de flexión mide la resistencia de un material a ser doblado hasta llegar al fallo.
- Tensión: es la carga máxima soportada por el material al aplicársele fuerza en ambos extremos. Mide la deformación del tablero hasta el límite de deformación elástica permanente o hasta la fragmentación.
- Dureza: es la oposición de los materiales a sufrir alteraciones como la penetración, la abrasión, el rayado, la cortadura, las deformaciones permanentes, etc. Un material tiende a absorber una

cantidad de la energía de cualquier fuerza que se le aplica antes de deformarse.

- Punto de ruptura: son las condiciones bajo la cual el material se fractura (área superficial del material y fuerza aplicada).

2.5. Normatividad

Las normas ASTM (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, por sus siglas en ingles), es una organización de normas internacionales que publica normas técnicas para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios, de consenso voluntario.

La designación ASTM D 1037-91 es un conjunto de normas sobre métodos de pruebas estándar para la evaluación de propiedades de la madera-base de fibra y de partículas.

Las normas UNE (Una Norma Española), son un conjunto de normas técnicas españolas creados en los Comités Técnicos de Normalización (CTN) de la asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). La designación UNE 56 757 es el conjunto de referencias para la consulta de normas que establecen los métodos de ensayo para tableros de partículas de prensado plano y de fibras de densidad media.

2.6. Aglomerantes – resinas

Los aglomerantes son sustancias utilizados en los materiales aglomerados con la finalidad de unir las a las partículas y demás elementos de los que están formados. Estas sustancias pueden ser orgánicas o sintéticas y tienen la

capacidad de unificar y dar cohesión, por medio de reacciones químicas, a una mezcla de materiales.

2.6.1. Alcohol Polivinílico

El alcohol polivinílico es un polímero derivado del alcohol vinílico. Este polímero tiene la capacidad de formar películas con capacidad emulsionante y adhesiva, que puede soportar tensiones fuertes. Es un material flexible, higroscópico y muy soluble en agua de fórmula molecular $(C_2H_3OR)_n$ donde R representa a H o $COCH_3$ (FAO, 2004).

2.6.1.1. Propiedades

- Descripción física: crema blanca inodora, gránulos o polvo.
- Olor: inodoro.
- Punto de ebullición: 644 °F a 760 mmHg (aproximadamente).
- Punto de fusión: 442 °F (experimenta descomposición).
- Punto de ignición: 175 °F (79 °C) vaso abierto
- Solubilidad: Es soluble en agua, aumentándose su solubilidad con la disminución del peso molecular del polímero. También es soluble en etanol, pero insoluble en otros disolventes orgánicos, derivados del petróleo, aceites vegetales, aceites animales, hidrocarburos aromáticos, ésteres, éteres y acetona.
- Densidad: 1,19 – 1,31 g/cm³.
- Estabilidad: estable bajo las condiciones de almacenamientos correctos.
- Descomposición: cuando se calienta a más de 200 °C se descompone emitiendo un humo acre e irritante.
- Viscosidad: 4,8 – 5,8 mPa (solución al 4 % a 20 °C y peso molecular promedio de 26 – 30 g/mol).

- pH: 5,0 – 6,5 (solución al 4 %).

2.6.1.2. Usos

Se utiliza como materia prima para la elaboración de otros polímeros, como el nitrato de polivinilo. Se usa también en la elaboración de telas como sustitución del algodón. También es utilizado en los empaques de los alimentos por la capacidad que tiene de funcionar como barrera al oxígeno y a los aromas. En fin, tiene muchos otros usos por las características que posee.

2.6.1.3. Riesgos

- Inhalación: a una temperatura mayor a 200 °C el alcohol polivinílico se descompone liberando un humo irritante para los ojos, y el tracto respiratorio.
- Ingestión y contacto con la piel: no es dañina.
- Contacto con los ojos: irritación mecánica.
- Exposición crónica: se ha visto, en estudio con animales, algunos efectos potencialmente dañinos para la salud.

La situación que representa el mayor riesgo para la salud es la descomposición del material, por lo que es recomendable no exponer esta sustancia a temperaturas superiores al indicado anteriormente. En caso de que se necesite llevarlo a la descomposición, utilizar el equipo de protección personal adecuado.

3. METODOLOGÍA

3.1. Variables

Tanto las variables independientes como las dependientes fueron definidas a partir de las evaluaciones presentadas en los antecedentes del estudio de aglomerados.

3.1.1. Variables independientes

Variable independiente: espesor, % materia prima.

Variables fijas: temperatura, presión y tiempo de prensado

3.1.2. Variables dependientes

Las variables dependientes: punto de ignición, densidad, humedad, absorción de agua, contracción volumétrica, flexión, tensión, dureza y punto de ruptura.

Variables dependientes para la caracterización de composición química: extraíbles, lignina, celulosa, cenizas y taninos.

Tabla III. **Dimensionales: variables dependientes**

VARIABLE	DIMENSIONALES
Punto de ignición	°C
Densidad	g/cm ³
Humedad	%
Absorción de agua	%
Contracción volumétrica	%
Flexión	kg/cm ²
Tensión	kg/cm ²
Dureza	kg/mm ²
Punto de ruptura	kg
Extraíbles, lignina, celulosa y taninos	%

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

3.2. Delimitación del campo de estudio

La caña de Castilla (*Arundo Donax*) es una planta que se reproduce con facilidad tendiendo esto como consecuencia la producción de grandes cantidades de biomasa de caña por hectárea. Esta biomasa seca puede ser aprovechada para la elaboración de productos útiles en sustitución de la madera, en la elaboración de tableros y otros productos de valor agregado.

Se caracterizó la composición química de las fibras de caña de Castilla: extraíbles, lignina, celulosa, cenizas y taninos. Esta fase experimental se llevó a cabo en el Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales LIEXVE, Sección

Química Industrial, del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

La elaboración de los tableros y la evaluación de sus propiedades fisicoquímicas y mecánicas se realizaron en la Sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

3.2.1. Procedimiento para la formulación y elaboración de los tableros

Para el experimento se elaboraron tableros utilizando fibra de caña de Castilla como materia prima y alcoholes polivinílico como aglutinante, compactados a una presión constante de 10 toneladas, durante un tiempo constante de 10 min y a temperatura ambiente.

Se procedió a moler la caña hasta un tamaño adecuado, utilizando un molino de discos, y se verificó que su humedad fuera menor al 10 %; luego se tomaron tres cantidades diferentes de caña (0,5 lb, 1 lb y 1,5 lb).

Se tomaron 0,5 lb de caña de Castilla, este peso se multiplicó por 0,5 para obtener la cantidad de aglutinante necesario y se luego se procedió a mezclar la caña con el aglutinante; posteriormente esta mezcla se llevó a la prensa hidráulica y se le aplicó una presión de 10 ton. Pasados 10 min se procedió a desmoldar al tablero y se dejó secar. Este procedimiento se repitió hasta obtenerse 3 tableros de formulación 50/50 %.

Para la elaboración de tableros de formulación 40/60 % se tomaron 0,5 lb de caña y este peso se multiplicó por 0,6 para obtener la cantidad de aglutinante

necesario que se utilizó en la mezcla. Luego se siguió con el mismo procedimiento descrito anteriormente.

Se realizó el mismo proceso utilizándose 1 Lb y 1,5 Lb de caña de Castilla. La cantidad de tableros por cada formulación determinada y peso de caña utilizada, así como la cantidad de tableros totales, se describen en la siguiente tabla:

Tabla IV. **Cantidad de tableros a elaborarse**

FORMULACIÓN Peso caña / Peso aglutinante (%)	Peso de caña de Castilla (Lb)	Peso de alcohol Polivinílico (Lb)	Espesor del Tablero	Repetición
50/50	0,5	0,25	E ₁	R ₁₋₁
				R ₁₋₂
				R ₁₋₃
	1	0,5	E ₂	R ₂₋₁
				R ₂₋₂
				R ₂₋₃
	1,5	0,75	E ₃	R ₃₋₁
				R ₃₋₂
				R ₃₋₃
40/60	0,5	0,30	E' ₁	R' ₁₋₁
				R' ₁₋₂
				R' ₁₋₃
	1	0,6	E' ₂	R' ₂₋₁
				R' ₂₋₂
				R' ₂₋₃
	1,5	0,90	E' ₃	R' ₃₋₁
				R' ₃₋₂
				R' ₃₋₃
Tableros totales				18

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Br. Miguel Angel Cuin Morales.
- Asesor: Ing. Qco. Mauricio Valentino Rivera Tello.
- Jefe del Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales LIEXVE, Sección Química Industrial CII/USAC: Ing. Qco. Mario José Mérida Meré
- Personal del LIEXVE.
- Personal del Laboratorio Multipropósito en la Sección de Tecnología de la Madera.

3.4. Recursos materiales disponibles

Los recursos materiales con los que se contaron para llevar a cabo el estudio de investigación se describen en las siguientes secciones.

3.4.1. Materia prima

La materia prima necesaria para llevar a cabo el estudio de investigación se obtuvo de las fibras de caña de Castilla, de plantas ubicadas en la colonia Joya Senahú, del municipio de Chinautla, Guatemala.

3.4.2. Materiales y reactivos

El reactivo necesario para la elaboración de los tableros aglomerados fue el alcohol Polivinílico.

3.4.3. Cristalería e instrumentación

Para la elaboración y evaluación de propiedades fisicoquímicas y mecánicas de los tableros fueron necesarios los siguientes instrumentos: *Beackers*, varilla de agitación, vernier, cinta métrica, termómetro, moldes, recipiente para mezclado y crisoles.

Para la caracterización química de la materia prima se dispuso de los siguientes: *Beackers*, probetas, balones, decantadores, balanza analítica, Erlenmeyers, balones aforados, pipetas, buretas y soportes.

3.4.4. Equipo

El equipo necesario para la elaboración y evaluación de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas los tableros fueron: Balanza analítica, balanza de humedad, plancha de calentamiento, molino de chuchillas, prensa hidráulica, equipo para prueba de ruptura, tamizador, equipo para prueba de tensión y equipo para la prueba de flexión.

Los equipos de los que se dispusieron para la caracterización química fueron: tamizador, desecador, horno de secado, equipo de extracción soxhlet, planchas de calentamiento, equipo para filtración a vacío.

3.5. Técnica cuantitativa

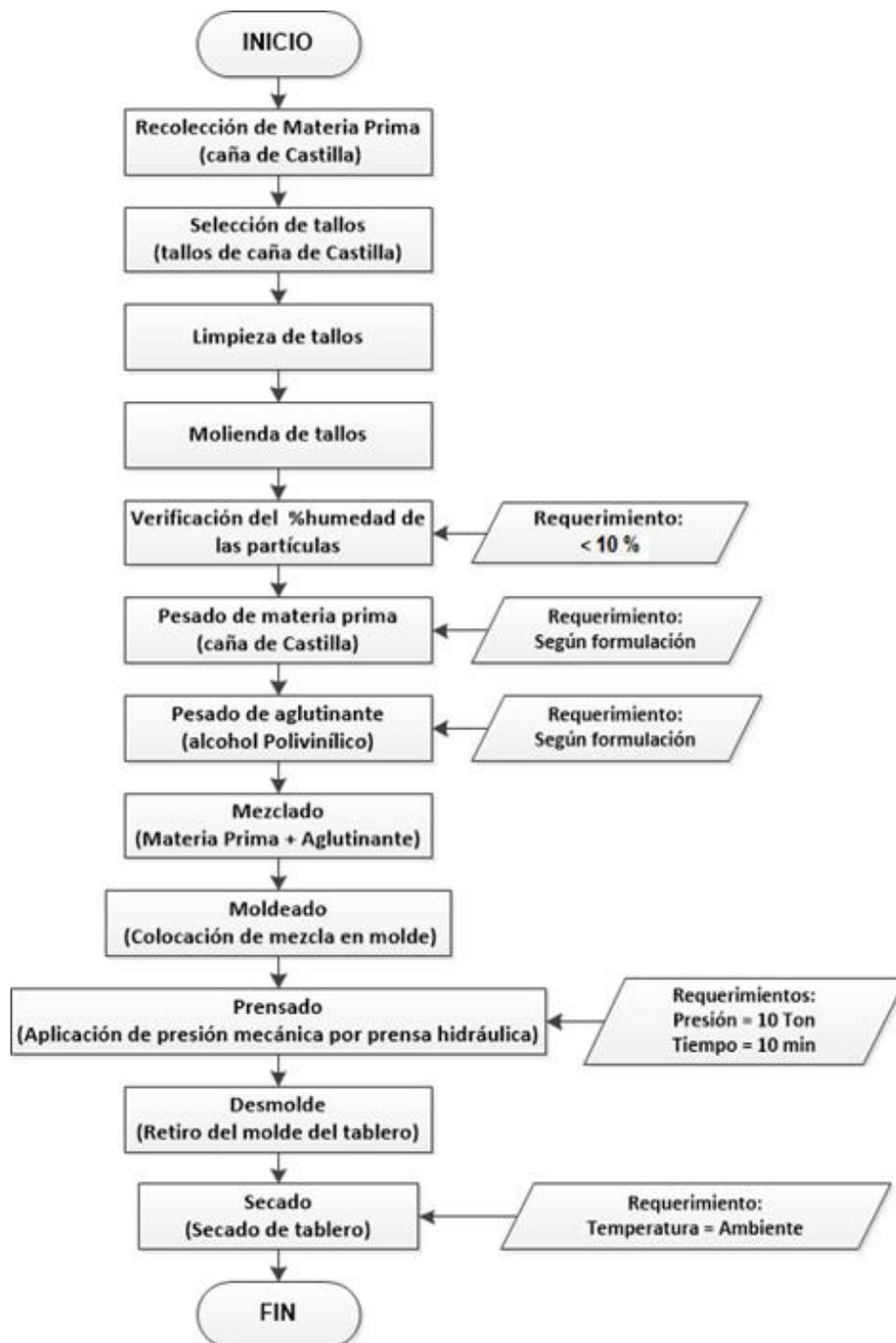
Se utilizó una técnica cuantitativa para registrar las mediciones exactas de las pruebas fisicoquímicas y mecánicas de acuerdo con los resultados a obtenerse para cada formulación y para cada espesor, tomándose en cuenta lo

descrito en los métodos de las normas ASTM D 1037-91, UNE 56 757 y UNE 56,710.

Para la evaluación de los tableros aglomerados se cuantificaron las siguientes propiedades: Punto de ignición, densidad, humedad, absorción de agua, contracción volumétrica, flexión, tensión, dureza Janka y punto de ruptura.

Para la caracterización de la composición química de las fibras de caña de Castilla se utilizaron los métodos descritos en la Normas ANSI/ASTM D 1105-06, D1106-56, D 1103-60 y D 1102-56. De igual manera se usó una técnica cuantitativa para registrar las mediciones exactas de las variables dependientes: cenizas, extraíbles, lignina, celulosa y taninos.

Figura 5. Diagrama de proceso: elaboración de tablero aglomerado



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Las variables fueron tomadas en la ejecución de las pruebas para la caracterización de la composición química de la materia prima, elaboración de los aglomerados, evaluación de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas. A continuación, se detalla la metodología experimental.

3.6.1. Caracterización de la composición química de la caña de Castilla

Se caracterizó la composición química de la caña de Castilla siguiendo lo indicado en las normas ANSI/ ASTM D y numeral correspondiente a cada ensayo. Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales (LIEXVE).

Se tomó una parte de la caña de Castilla molida y se tamizó para obtenerse los diferentes tamaños de partículas requeridas para cada uno de los ensayos llevados a cabo. A continuación, se describe la metodología experimental.

3.6.1.1. Determinación de cenizas

Se determinó el porcentaje de cenizas siguiendo lo indicado en la norma ANSI/ASTM D 1102-56.

- Equipo necesario:

Crisoles de porcelana o sílica con capacidad de 30 mL, Mufla con pirómetro para mantener la temperatura, balanza analítica, horno para secar y desecadora. También pinzas de metal largas.

- Procedimiento:
 - Obtener una muestra tamizada (tamiz No. 40).
 - Calcinar en un crisol, 1 g de muestra a 600 °C en una mufla durante 1 hora.
 - Retirar de la mufla y trasladar la muestra a una desecadora durante 15 min. Luego tarar.
 - Agregar 1 g de muestra en el crisol (previamente secada y tamizada).
 - Agregar la muestra a la mufla aplicando 100 °C, luego aumentar la temperatura de manera paulatina hasta 600 °C (evitando la ignición de la materia) y mantener a esta temperatura.
 - Revisar la muestra después de 90 min, verificando que solo se tenga cenizas (color grisáceo blancuzco).
 - Llevar la muestra a una desecadora por 15 min. Pesarse y desecar hasta obtener un peso constante.
 - Los resultados obtenidos se deben registrar en la hoja de toma de datos.

NOTA: el procedimiento debe ser aplicado a tres muestras trabajadas al mismo tiempo.

3.6.1.2. Determinación de los extraíbles

Se determinó el porcentaje de Extraíbles siguiendo lo indicado en la norma ANSI/ASTM D 1105-56.

- Equipo necesario:

Equipo de extracción *soxhlet*, dedales de porosidad media, balanza analítica sensible a 0,1 mg, horno eléctrico, desecador y pinzas de metal.

- Reactivos y muestra:

- Reactivos: alcohol etílico al 95 %, etanol absoluto, n-Hexano al 95 %.
- Muestra: partículas secas previamente molidas y taradas por un tamiz No.60

- Procedimiento:

- Tomar una muestra inicial (aproximadamente de 7,5 g) de fibra de caña de Castilla tamizada.
- Colocar la muestra en un dedal y luego colocar el dedal en el sistema de extracción *soxhlet* (con condensador de reflujo), manteniendo una relación de $\frac{3}{4}$ de solvente con respecto al balón.
- Primero, realizar la extracción con n-Hexano durante 12 horas. Luego realizar la extracción con Etanol durante 12 horas.
- Secar el contenido del dedal durante 48 horas a temperatura ambiente.
- Transferir el material a una caja de Petri previamente tarada y pesar.
- Proceder a secar en un horno eléctrico a 80 °C durante 4 horas.
- Tomar la muestra y transferir a una desecadora durante 15 min. Luego pesar.
- Secar hasta obtener un peso constante.

- Registrar los resultados obtenidos en la hoja de toma de datos.

Los extraíbles son sustancias que no son parte de la especie vegetal maderera en si, por lo que el material que queda luego de aplicársele el proceso a la materia prima es una muestra libre de extraíbles.

NOTA: aplicar el procedimiento a tres muestras trabajadas al mismo tiempo.

3.6.1.3. Determinación de lignina

Se determinó el porcentaje de Lignina siguiendo lo indicado en la norma ANSI/ASTM D 1106-56.

- Equipo necesario:

Sistema a reflujo de balón de fondo plano con condensador, mangueras, plancha de calentamiento con agitación para ebullición, cronómetro, pipetas, perillas de succión, bomba de vacío, balanza analítica sensible a 0,1 mg., horno eléctrico y desecadora.

- Reactivos y muestra:

- Reactivos: Hidróxido de sodio puro, ácido sulfúrico al 72 %,
- Muestra: La muestra se obtiene del material libre de extraíbles.

- Procedimiento:

- Colocar en un Becker de 10 mL 1 g de materia libre de extraíbles. Agregar 15 mL de ácido sulfúrico al 72 %.

- Agitar durante 2 horas en baño de maría a 20 °C (plancha de agitación).
- Transferir a un matraz de 1000 mL con 560 mL de agua destilada, para obtener una solución de ácido al 3 %.
- Hervir a reflujo en un balón con condensador, por 4 horas.
- Decantar hasta dejar una diferencia mínima entre las dos fases formadas.
- Filtrar la solución obtenida con papel filtro previamente tarado.
- Lavar con agua caliente y secar a una temperatura de 80 °C hasta obtener un peso constante.
- Registrar los resultados obtenidos en la hoja de toma de datos.

NOTA: aplicar el procedimiento a tres muestras trabajadas al mismo tiempo.

3.6.1.4. Determinación de celulosa

Se determinó el porcentaje de Celulosa siguiendo lo indicado en la norma ANSI/ASTM D 1103-60.

- Equipo necesario:

Beackers, cronómetro, pipetas, perillas de succión, varilla de agitación, balde para baño María, balones aforados, bomba de vacío, balanza analítica, horno y desecadora.

- Reactivos y muestra:
 - Reactivos: Hidróxido de sodio y ácido acético
 - Muestra: Muestra obtenida del material libre de extraíbles

- Procedimiento:
 - Obtener una muestra de 1 g libre de extraíbles y transferir a un *beacker* de 100 mL.
 - Agregare 10 mL de NaOH al 17 %, agitar y dejar reposar por 2 min. Agitar nuevamente y dejar reposar por 3 min.
 - Agregar 5 mL de NaOH al 17 %, agitar y dejar reposar por 5 min.
 - Repetir el paso No.3
 - Agregar nuevamente 5 mL de NaOH al 17 %, agitar y dejar reposar por 30 min en baño de maría a 20 °C.
 - Agregar 30 mL de agua destilada, agitar y dejar reposar por 1 hora.
 - Luego filtrar al vacío con papel filtro previamente tarada lavando con una solución preparada de 33 mL de agua destilada y 25 mL de la solución de NaOH al 17 %.
 - Lavar con 30 mL de agua destilada y dejar de aplicar vacío.
 - Agregar 15 mL de una solución de ácido acético al 10 % y dejar reposar por 3 min.
 - Aplicar vacío. Luego lavar con 50 mL de agua destilada a vacío.
 - Colocar en una caja Petri y llevar la muestra a un secador a 80 °C por 4 horas.
 - Transferir a una desecadora y dejar reposar por 15 min.
 - Pesar y secar hasta un peso constante.
 - Registrar los resultados obtenidos en la hoja de toma de datos.

NOTA: aplicar el procedimiento a tres muestras trabajadas al mismo tiempo.

3.6.1.5. Determinación de taninos

Se determinó el porcentaje de Celulosa siguiendo el proceso que se describe a continuación.

- Equipo necesario:

Beackers, bureta, probeta, *Erlenmeyers*, planchas con agitación, termómetros, balanza analítica, horno y desecadora.

- Reactivos y muestra:

- Reactivos: Sulfito de sodio, sodio sulfito anhidro al 4 % en solución acuosa. Índigo de carmín, Permanganato de potasio en solución 0,1N Titrisol.
- Muestra: Partículas secas, reducidos por molino y tamizados por un tamiz No. 60.

- Procedimiento:

- Preparar una solución al 4 % de sulfito de sodio.
- Colocar una muestra de 4 g (seca y tamizada) en un beacker de 100 mL.
- Agregar la solución de sulfito de sodio hasta obtener una relación entre 3:1 en volumen.
- Calentar la mezcla durante 45 min a una temperatura constante de 70 °C, con agitación constante.
- Filtrar y llevar la muestra a un *beacker* de 50 mL. Luego evaporar en un secador, secando hasta obtener un peso constante.

- Luego tomar 0,5 g del extracto obtenido y colocar en un *Erlenmeyer* de 250 mL, luego agregar 50 mL de agua destilada y agitar hasta disolver.
- Colocar la muestra en una plancha de calentamiento y llevar a ebullición por 4 horas, agregando agua constantemente para mantener el volumen.
- Tomar 12,5 mL de la solución anterior, adicionar 10 mL de indicador índigo de carmín y 375 mL de agua destilada.
- Titular la solución con permanganato de potasio 0,1N hasta observar un cambio de color amarillo.
- Preparar un blanco con agua, adicionando todos los reactivos en las mismas condiciones.
- Registrar los resultados en la hoja de toma de datos.

NOTA: aplicar el procedimiento a tres muestras trabajadas al mismo tiempo.

3.6.2. Evaluación de las propiedades Mecánicas

La evaluación de las Propiedades Mecánicas se realizó siguiendo lo estipulado en las normas ASTM D. Las pruebas se realizaron en el Laboratorio Multipropósito en la Sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. A continuación, se describe la metodología experimental.

3.6.2.1. Ensayo de flexión

Se determinó el esfuerzo máximo de flexión siguiendo lo descrito en la norma ASTM D 1037-91. El ensayo fue realizado en la Sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería. Para esto se utilizaron

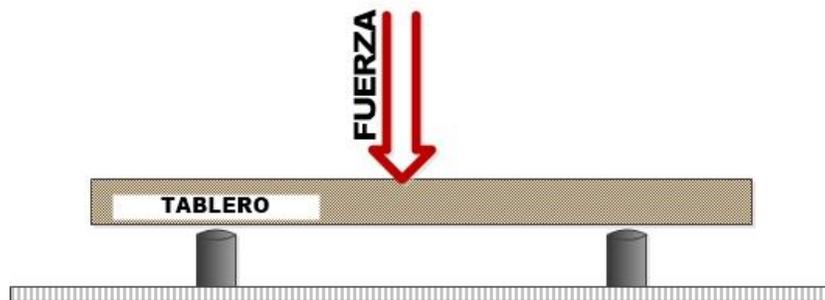
tableros de 32 x 32 cm (ancho x largo). La prueba fue realizada para un grupo de tableros de formulación de 50/50 % en peso, y para otro grupo de 40/60 % en peso.

- Descripción del ensayo de flexión

La evaluación de la propiedad de flexión es en la aplicación de una fuerza a un tablero que se ubica sobre dos apoyos que consisten en dos barras cilíndricas ubicadas a 25 cm una de otra de forma paralela.

La cara de los tableros se coloca de forma perpendicular a la dirección de la fuerza que se les aplica, tal y como se observa en la siguiente figura:

Figura 6. Esquema del ensayo de flexión



Fuente: elaboración propia, empleando Paint.

La fuerza es aplicada a través de un cilindro de embolo conectado a una bomba hidráulica manual que contiene un medidor análogo de fuerza. Dicha fuerza es aplicada de forma continua hasta el fallo del tablero. Los resultados se registran en la hoja de toma de datos.

3.6.2.2. Ensayo de tensión

Se realizó la prueba de tensión siguiendo lo descrito en la norma ASTM D 1037-91. El ensayo fue realizado en la Sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería. Para esto se utilizaron probetas de 32x10 cm (largo x ancho). La prueba fue realizada para un grupo de muestras de formulación de 50/50 % en peso, y para otro grupo de 40/60 % en peso.

- Descripción del ensayo de tensión

La evaluación de la tensión paralela a la superficie consiste en sujetar fijamente un extremo de las muestras (probetas) a la mesa de trabajo. El otro extremo es sujetado entre dos barras de madera que se conectan a una serie de cables utilizados para transmitir la carga aplicada a la probeta.

Se aplica una serie de pesos a la muestra para producir tensión en su superficie hasta el fallo. Los resultados de carga máxima obtenidos se registran en la hoja de toma de datos.

Figura 7. **Equipo para prueba de tensión**



Fuente: elaboración propia, Sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

3.6.2.3. Ensayo de dureza Janka

Se realizó la prueba de Dureza Janka siguiendo lo descrito en la norma ASTM D. El ensayo fue realizado en la Sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería. Para esto se utilizaron probetas de 10 x 10 cm (largo x ancho). La prueba fue realizada para un grupo de muestras de formulación de 50/50 % en peso, y para otro grupo de 40/60 % en peso.

- Descripción del ensayo de dureza Janka

La prueba consiste en colocar las caras de las probetas de forma perpendicular a la dirección de la fuerza aplicada recibida. Sobre los tableros

muestra se coloca una esfera de acero de 12 mm de diámetro, a la cual se le aplica la carga mediante un cilindro con émbolo conectado a una barra de acero cilíndrico y a la vez éste conectado a una bomba hidráulica manual.

Se aplica fuerza hasta el hundimiento de media esfera en la superficie de las probetas, midiendo la carga necesaria para esto. Los resultados obtenidos se registran en la hoja de toma de datos.

Figura 8. **Sistema de ensayo de dureza Janka**



Fuente: elaboración propia, Sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

3.6.2.4. Punto de ruptura

El ensayo de Punto de Ruptura fue realizado en la Sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería. Para esto se utilizaron tableros de 32 x 32 cm (largo x ancho). La prueba fue realizada para un grupo de

muestras de formulación de 50/50 % en peso, y para otro grupo de 40/60 % en peso.

Este ensayo se realiza en conjunto con el ensayo de Flexión, tomándose como el punto de ruptura el dato de la carga a la que el tablero llega al fallo (carga máxima). Los resultados se registran en la hoja de toma de datos.

3.6.3. Evaluación de las propiedades fisicoquímicas

La evaluación de las Propiedades Fisicoquímicas se realizó siguiendo lo estipulado en la normativa ASTM D y Una Norma Española (UNE). Las pruebas se realizaron en el Laboratorio Multipropósito en la Sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. A continuación, se describe la metodología experimental.

3.6.3.1. Punto de ignición

La evaluación del punto de ignición se llevó de la siguiente forma:

Se toman muestras de 1 gramo aproximadamente, del tablero aglomerado, luego estas muestras se colocan dentro de un crisol y se calientan sobre una plancha eléctrica elevando la temperatura 5 °C por minuto. Se coloca una flama a la orilla del crisol y se eleva la temperatura hasta que se genera una llama por los gases emitidos por la muestra. La temperatura a la cual se genera la llama se toma como la temperatura de inflamación del tablero respectivo. Los resultados se registran en la hoja de toma de datos.

Este ensayo fue realizado para un conjunto de muestras con una formulación de 50/50 % en peso y para otro grupo de 40/60 % en peso.

3.6.3.2. Densidad

El ensayo de Densidad fue realizado en la Sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería. Para esto se utilizaron tableros de 32 x 32 cm (largo x ancho). La prueba fue realizada para un grupo de muestras de formulación de 50/50 % en peso, y para otro grupo de 40/60 % en peso, siguiendo lo descrito en la normativa UNE 56 757.

- Descripción del ensayo de densidad

Primero se toman las piezas elaboradas y se dejan secar. Luego se toman los tableros y se toma un volumen promedio determinado por método estereométrico ayudándose de una cinta métrica y un vernier. Luego se tara la balanza analítica y se mide el peso de cada una de las piezas. Los resultados obtenidos se registran en la hoja de toma de datos.

3.6.3.3. Ensayo de humedad

El ensayo de determinación de Humedad fue realizado en la Sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería. Para esto se utilizaron muestras de peso igual a 1 gramo. La prueba fue realizada para un grupo de muestras de formulación de 50/50 % en peso, y para otro grupo de 40/60 % en peso.

- Descripción de la determinación de la humedad

Primero se tara la balanza analítica. Luego se toman de muestras de 1 gramo aproximadamente de cada tablero y se identifican correctamente.

Se procede a la limpieza y tara de la balanza de humedad. Se toma cada una de las muestras y se colocan en la balanza analítica, para luego determinar el porcentaje de humedad de cada pieza.

La balanza de humedad determina el peso inicial de las muestras, luego realiza el secado, hasta un peso final constante. Los resultados obtenidos se registran en la hoja de toma de datos.

3.6.3.4. Ensayo de absorción de agua

El ensayo de Absorción de Agua fue realizado en la Sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería. Para esto se utilizaron probetas de 10 x 10 cm (ancho x largo). La prueba fue realizada para un grupo de muestras de formulación de 50/50 % en peso, y para otro grupo de 40/60 % en peso. Se tomó como guía lo descrito en la normativa ASTM D 1037-91.

- Descripción de la determinación de absorción de agua

Para este ensayo se utilizan recipientes de *duroport*, que inicialmente se pesan y se rotulan de acuerdo con cada una de las probetas correspondientes a los tableros de prueba.

Luego cada una de las probetas se coloca dentro de los recipientes respectivos y se pesan, anotando el peso inicial en la hoja de toma de datos. Luego se agrega agua hasta cubrir por completo cada una de las piezas. Se deben dejar pasar 24 horas.

Pasado el tiempo estipulado, se retira el agua por completo del recipiente hasta dejar solamente la pieza de tablero aglomerado. Se pesa las piezas junto con los recipientes y se toman estos como pesos finales.

Los resultados obtenidos se registran en la hoja de toma de datos, y luego se determinan los porcentajes de absorción.

3.6.3.5. Ensayo de contracción volumétrica

Este ensayo no se pudo llevar a cabo debido a la higroscopía de las piezas que se tomaron como muestra. Las piezas no lograron mantener su estructura debido al exceso de agua absorbido y el desprendimiento de las partículas del aglomerado. El análisis se realiza en la sección de discusión de resultados.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Los datos experimentales obtenidos durante las diferentes fases (caracterización química, determinación de espesores de tableros, evaluación de propiedades mecánicas y evaluación de propiedades fisicoquímicas) de la presente investigación fueron registrados en hojas de toma de datos (tablas de datos).

3.7.1. Ordenamiento de la información

Los resultados de los espesores y de los diferentes ensayos realizados se ordenan en tablas para posteriormente realizar los cálculos necesarios y los análisis correspondientes para cumplir con lo requerido por los objetivos (ver apéndices).

3.7.2. Procesamiento de la información

Los datos experimentales se utilizaron para realizar los cálculos respectivos para determinar los resultados requeridos, esto a través de relaciones matemáticas descritas en las normativas ASTM D y UNE.

Estos resultados se reportan en tablas y gráficas para su análisis y comparación.

3.7.2.1. Determinación del porcentaje de cenizas

La calcinación eliminó de la materia prima los elementos volátiles, por lo que los residuos que se obtuvieron al final de la oxidación a alta temperatura se determina como la cantidad de cenizas presentes en la muestra, por lo que el porcentaje de cenizas fue el peso final obtenido, por lo que el cálculo, según la norma ASTM D 1102-56, es como se muestra a continuación:

$$\% \text{Cenizas} = (P. B. - P. T.) * 100 \quad \text{Ecuación No. 1}$$

Donde:

P.B. = Peso bruto

P.T.=Peso Tara

3.7.2.2. Determinación del porcentaje de extraíbles

Los extraíbles son sustancias solubles en solventes neutros, por lo que estos se lograron extraer de la muestra de materia prima mediante el equipo de extracción soxhlet y los solventes utilizados. El residuo obtenido al final del ensayo fue la muestra libre de extraíbles, por lo que % Extraíbles se determinó, según la norma ANSI/ASTM D 1105-56, como se muestra a continuación:

$$\% \text{ Extraíbles} = \frac{(PMI-PM)}{PMI} * 100 \quad \text{Ecuación No.2}$$

PMI=Peso de la muestra inicial (g)

PM=Peso de la muestra libre de extraíbles (g)

3.7.2.3. Determinación del porcentaje de lignina

Para este ensayo fue necesario trabajar con una muestra libre de extraíbles. La lignina fue el residuo que quedo al final del tratamiento de la muestra con los ácidos utilizados, y según la norma ANI/ASTM D 1106-56, se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ Lignina} = \left(\frac{PB-PT}{PI} \right) * 100 \quad \text{Ecuación No.3}$$

Donde:

PB = Peso bruto (g)

PT = Peso Tara (g)

PI = Peso inicial de la muestra (g)

3.7.2.4. Determinación del porcentaje de celulosa

La celulosa es una estructura que resiste al ataque alcalino, por lo que el remanente del ensayo realizado se determina como la cantidad de celulosa en la muestra, y según la norma ANSI/ASTM D 1103-60, el porcentaje se calcula como se muestra a continuación:

$$\% \text{ Celulosa} = \frac{[(PB-(PT+PL)*PML)]}{PMT} * 100 \quad \text{Ecuación No.4}$$

Donde:

PB = Peso bruto de la muestra (g)

PT = Peso tara del papel filtro (g)

PL = Peso de Lignina en 1 g de madera (tomado del ensayo de lignina)

PML = Peso de caña libre de extraíbles (base de 7,5 aproximadamente)

PMT = Peso de caña antes de la extracción (7,5 aproximadamente)

3.7.2.5. Determinación del porcentaje de taninos

Los taninos se solubilizaron en la solución acuosa con el sulfito de sodio, por lo que, según la norma ANSI/ASTM D, el porcentaje de este compuesto se determina como se muestra a continuación:

$$\% \text{Taninos} = \frac{0,1N(\text{mlo} - \text{mlb}) \left(\frac{\text{Pfg}}{\#e} \right) \left(\frac{1\text{eq}}{1\,000\text{ meq}} \right)}{4\text{g}} * 100 \quad \text{Ecuación No.5}$$

$$\text{Pfg} = \frac{4,2\text{g taninos}(2e)(6,25\text{mL})}{0,1N(\text{mlo} - \text{mlb})50\text{mL}} \quad \text{Ecuación No. 5.1}$$

Donde:

mlo = mililitros utilizados de permanganato de potasio

mlb = mililitros del blanco obtenidos

Pfg = Peso formula en gramos del tanino

#e = Número de electrones intercambiados (2e)

3.7.2.6. Determinación de la flexión

El esfuerzo máximo de flexión o módulo de ruptura fue la carga máxima soportada por la probeta al momento del fallo, en función de la fuerza aplicada,

distancia entre los soportes, ancho efectivo y espesor de la probeta. La relación matemática utilizada para el cálculo, según la norma ASTM D 1037-91, es:

$$MR = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P_{\text{máx}} \cdot d}{a \cdot E^2}\right) \quad \text{Ecuación No. 6}$$

Donde:

MR = Módulo de ruptura (kg_F/cm^2)

$P_{\text{máx}}$ = Carga máxima al momento de la ruptura (kg_F)

d = Distancia entre soportes (cm)

a = ancho efectivo de la probeta (cm)

E^2 = Espesor de la probeta (cm^2)

3.7.2.7. Determinación de la tensión

La evaluación de la tensión paralela a la superficie fue la resistencia de la probeta al fallo debido al esfuerzo aplicado sobre ella. La evaluación de la tensión se da como el Esfuerzo Máximo a la Tracción Perpendicular, que está en función de la carga máxima soportada por la muestra y su área superficial. De acuerdo con la norma ASTM D 1037-91, la relación matemática se define como:

$$ET = \frac{P_{\text{máx}}}{A} \quad \text{Ecuación No.7}$$

Donde:

ET = Esfuerzo máximo a la tracción perpendicular (kg_F/cm^2)

$P_{\text{máx}}$ = Carga máxima soportada (kg_F)

A = Área de la superficie de la probeta (cm^2)

3.7.2.8. Determinación de la dureza (Dureza Janka)

La dureza Janka se define como la carga necesaria para hacer penetrar una esfera de acero en la probeta del tablero aglomerado utilizado para el ensayo. La dureza está en función de la carga aplicada a la esfera y de su área superficial, la relación matemática se define como se muestra a continuación:

$$\text{Dureza} = \frac{F}{S} \quad \text{Ecuación No.8}$$

Donde:

Dureza = Dureza Janka (kg_F/mm^2)

S = Área superficial de la esfera que penetra (mm^2)

3.7.2.9. Determinación de la densidad

La densidad es el coeficiente de la masa en relación con el volumen del tablero aglomerado, denominado probeta, en condiciones de humedad en equilibrio. La norma UNE 56 757 define la relación matemática de la densidad como se muestra a continuación:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Ecuación No.9}$$

Donde:

ρ = Densidad del tablero (g/cm^3)

m = Masa de la probeta en condiciones de equilibrio (g)

V = Volumen de la probeta (cm^3)

3.7.2.10. Absorción de agua

La absorción de agua es la capacidad de absorción del tablero al ser expuesto a una cierta humedad. La Absorción de humedad está en función de los pesos inicial y final de la probeta. Según la norma ASTM D 1037-91, la relación matemática que define a la absorción de humedad es como se muestra a continuación:

$$A = \left(\frac{P_f - P_i}{P_i} \right) * 100 \quad \text{Ecuación No. 10}$$

Donde:

A = Absorción de humedad (%)

P_f = Peso final de la probeta al final del periodo de sumersión (g)

P_i = Peso inicial de la probeta en condiciones de equilibrio con el ambiente

3.7.3. Programas que utilizar para el análisis de datos

Para el análisis de datos, tanto del estadístico como de los resultados principales, se utilizó el programa Microsoft Excel por su capacidad en el manejo de datos numéricos y de análisis estadísticos, y el cual forma parte del paquete de Microsoft Office Professional 2016, 64 bits.

3.8. Análisis estadístico

El diseño experimental utilizado fue un diseño factorial al azar con una variación de dos formulaciones y tres diferentes espesores por cada uno. Para comparar los datos experimentales obtenidos se utilizaron dos criterios, el valor promedio entre las dos formulaciones (que prácticamente es una medida de una localización) y el grado de variabilidad entre las corridas por cada espesor (o

dispersión). Además de estos criterios se realizó un análisis de varianza (ANOVA).

3.8.1. Determinación del número de corridas por espesor

El número de corridas necesarias para cada espesor obtenido se determinó con la finalidad de disminuir el error en el análisis de los datos, a través de la siguiente relación matemática:

$$n = \bar{p} * (1 - \bar{p}) * \left(\frac{Z_{\alpha/2}}{E}\right)^2 \quad \text{Ecuación No.11 (Miller, 2002)}$$

Donde:

\bar{p} = probabilidad de éxito (50 %)

$Z_{\alpha/2} = Z_{0,025} = 1,96$ (Teniéndose un nivel de confianza del 95 %)

E= error permitido (0,57)

$$n = (0,5)(0,5) * \left(\frac{1,96}{0,57}\right)^2 = 2,96 \approx 3$$

Con esto se determinó que el número necesario de tableros por cada espesor obtenido fue de 3 muestras o corridas para llevarse a cabo la fase experimental de la elaboración de tableros.

NÚMERO DE TABLEROS:

tableros = (# formulaciones) (# espesores) (# repeticiones)

#tableros = (2)(3)(3) = 18 tableros

3.8.2. Media aritmética

El valor promedio para utilizarse será la media aritmética (o de forma abreviada, la media) que es el cociente entre la suma de los valores medidos y el número de valores medidos.

La media, \bar{x} , de n valores medidos viene dado por:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad \text{Ecuación No.12 (Miller,2002)}$$

Donde:

\bar{X} = Media aritmética

X_i = Valor de cada dato de cada corrida

n = Número de tratamientos

3.8.3. Desviación estándar

La variabilidad es una medida de la diferencia entre el valor medido más alto y el más bajo. Una medida de más utilidad es la desviación estándar, s, el cual utiliza todos los valores.

La desviación estándar, s, de n valores medidos viene dada por:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}{(n - 1)}} \quad \text{Ecuación No.13 (Miller, 2002)}$$

Donde:

s = Desviación estándar

X_i = Valor de cada dato de cada corrida

\bar{X} = Media aritmética

n = Número de tratamientos

3.8.4. Análisis de varianza

“El análisis de varianza (abreviado con frecuencia como ANOVA) es una técnica estadística que se utiliza para separar y estimar las diferentes causas de variación”²⁴.

Un ANOVA de un factor compara las diferencias significativas entre medias aritméticas cuando están presentes más de dos muestras. Las fórmulas utilizadas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla V. Relaciones matemáticas de ANOVA de un factor

fuelle de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad
Entre muestras	$\sum_i T_i^2/n - T^2/N$ (Ecuación 15)	$h - 1$
Dentro de muestras	Por diferencia	Por diferencia
Total	$\sum_i \sum_j x_{ij}^2 - T^2/N$ (Ecuación 17)	$N - 1$

Donde:
 $N=nh$ = Número total de los valores medidos.
 T_i =Suma de los valores medidos en la i -ésima muestra.
 T =Suma de todas las medidas, gran total.
 Estadístico de contraste:

$$F = \frac{\text{Cuadrado medio entre muestras}}{\text{Cuadrado medio dentro de muestras}}$$

 Valor crítico:

$$F_{h-1, N-h}$$

Fuente: elaboración propia, con información de MILLER, James N., MILLER, Jane C. *Estadística y Quimiometría para Química Analítica.*, empleando Microsoft Word.

²⁴ MILLER, James N., MILLER, Jane C. *Estadística y Quimiometría para Química Analítica.* p. 58.

En la práctica los cálculos se hacen en una computadora. Excel tiene una opción que realiza el ANOVA de un factor, y si la probabilidad $> 0,05$ se acepta la hipótesis nula (H_0).

Las hipótesis nulas (H_0) y las hipótesis alternativas (H_a) se plantean con un 95 % de confianza y 5 % de significancia.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \dots = \mu_i$$

$$H_a: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \dots \neq \mu_i$$

4. RESULTADOS

4.1. Composición química de la caña de Castilla

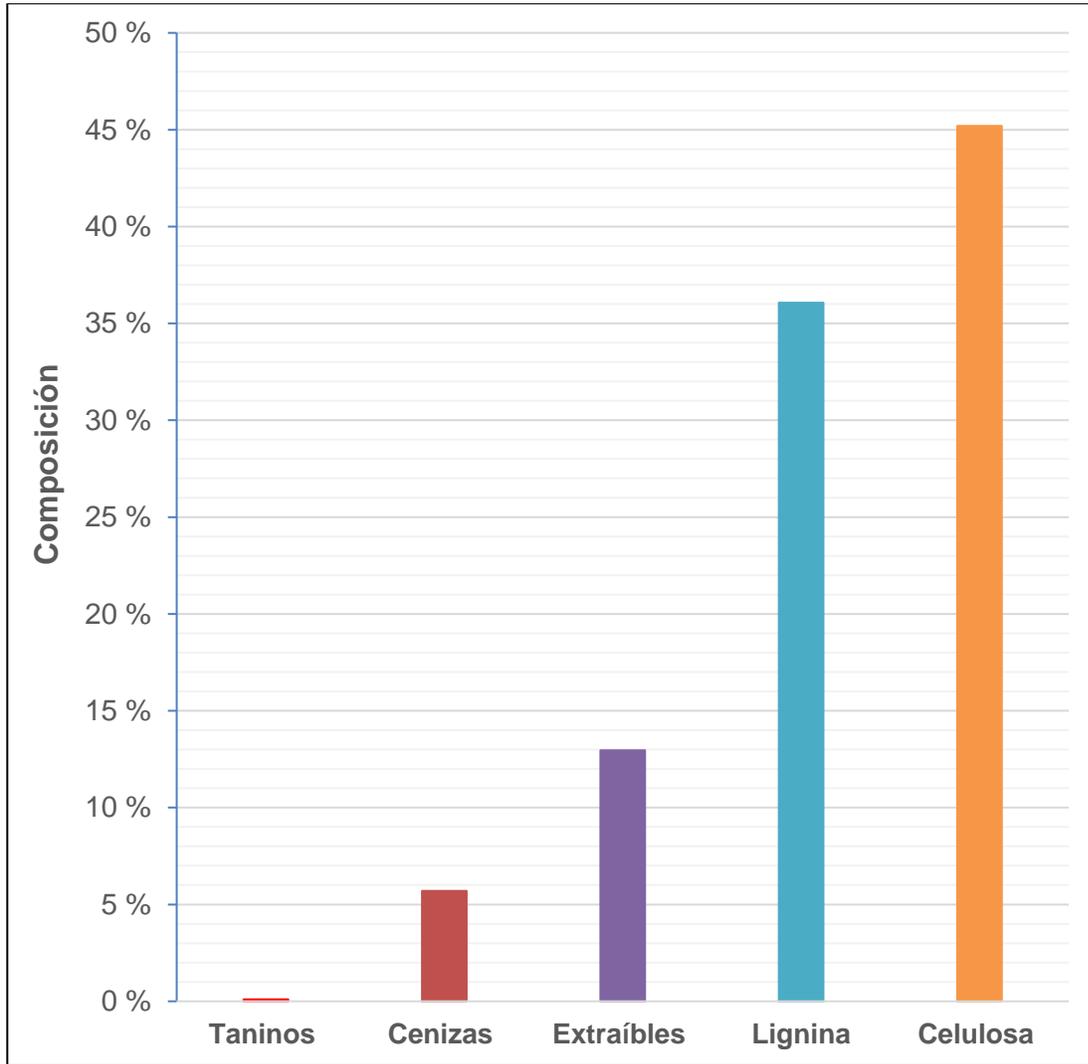
Este apartado se refiere a la caracterización química de la materia prima utilizada, la caña de Castilla, realizándose la cuantificación de cenizas, extraíbles, taninos, lignina y celulosa presentes.

Tabla VI. **Composición química de la caña de Castilla**
(*Arundo Donax L.*)

SUSTANCIA	Composición Promedio (%)	Desviación estándar
Taninos	0,10	0,01
Cenizas	5,70	0,13
Extraíbles	12,96	0,04
Lignina	36,07	0,90
Celulosa	45,20	0,94

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Figura 9. **Caracterización de la composición química de la caña de Castilla (*Arundo Donax L.*)**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.2. Formulación de tableros

La tabla XXII muestra las composiciones y espesores obtenidos, en función de la cantidad de masas utilizadas de caña de Castilla y alcohol Polivinílico en la elaboración de los tableros.

Tabla VII. **Formulación y variación de espesor de tableros elaborados**

FORMULACIÓN (% p/p)	Composición (Lb)		ESPESOR PROMEDIO (cm)	Desviación estándar
	Caña de Castilla	Alcohol Polivinílico		
50/50	0,5	0,25	1,054	0,004
	1	0,5	1,880	0,004
	1,5	0,75	2,866	0,001
40/60	0,5	0,3	1,104	0,006
	1	0,6	1,981	0,003
	1,5	0,9	2,996	0,003

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

4.3. Propiedades fisicoquímicas

En este apartado se presenta la variación de las propiedades de Punto de ignición, Densidad, % Humedad y %Absorción de agua en función de la variación de la composición de la materia prima y del aglutinante (formulación), así como del espesor de cada tablero elaborado.

4.3.1. Punto de Ignición

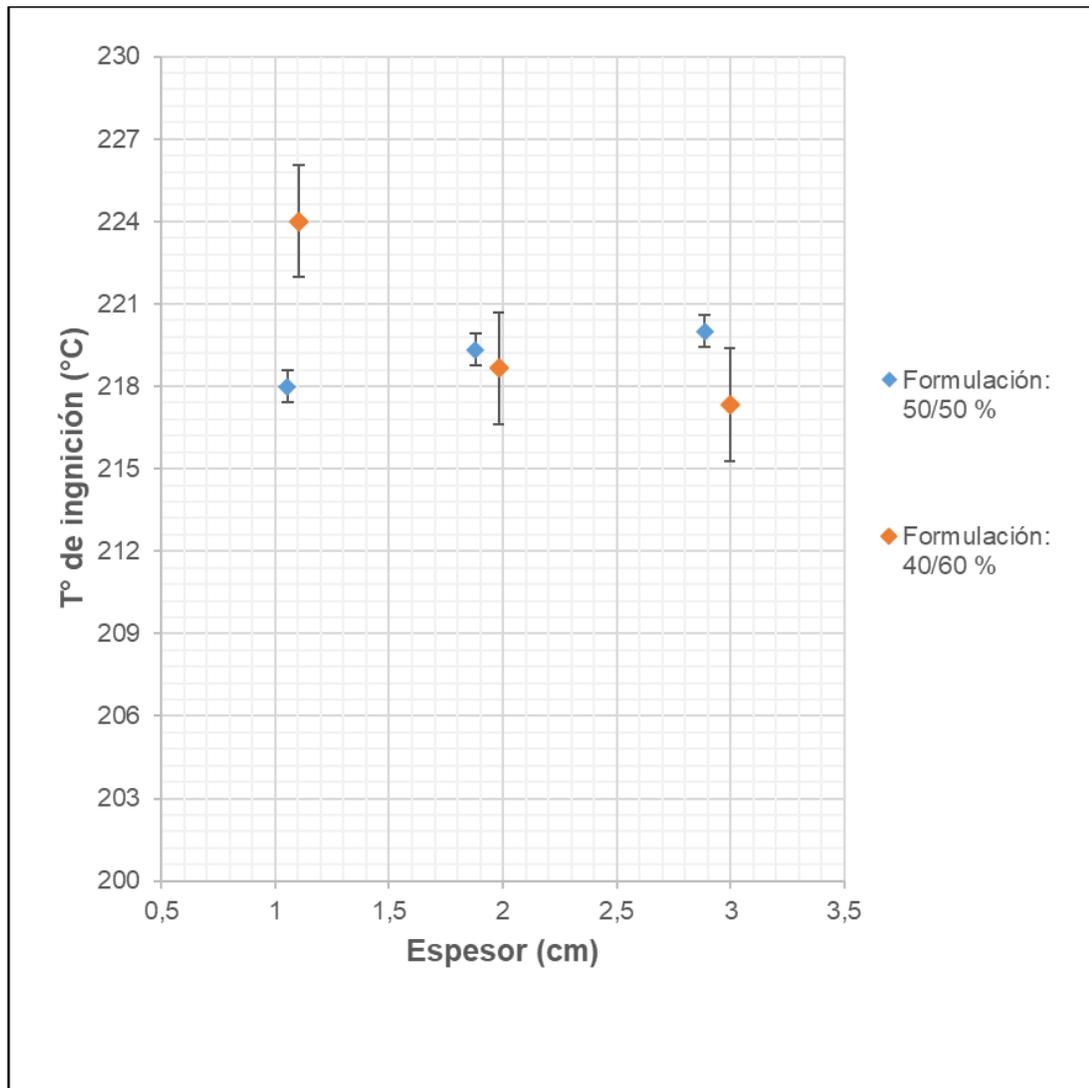
A continuación, se presenta la variación del punto de ignición de los tableros al variar la formulación, así como el espesor de cada uno de estos. Además, también se muestra de manera gráfica las variaciones obtenidas.

Tabla VIII. **Valores del punto de ignición al variar la formulación y espesor de los tableros elaborados**

FORMULACIÓN % p/p	Espesor (cm)	Temperatura de Ignición promedio (°C)	Desviación estándar
50/50	1,054	218	2
	1,88	219	4
	2,866	220	2
40/60	1,104	224	1
	1,981	219	2
	2,996	217	2

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Figura 10. **Caracterización del punto de ignición al variar la formulación y el espesor de los tableros elaborados**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.3.2. Densidad

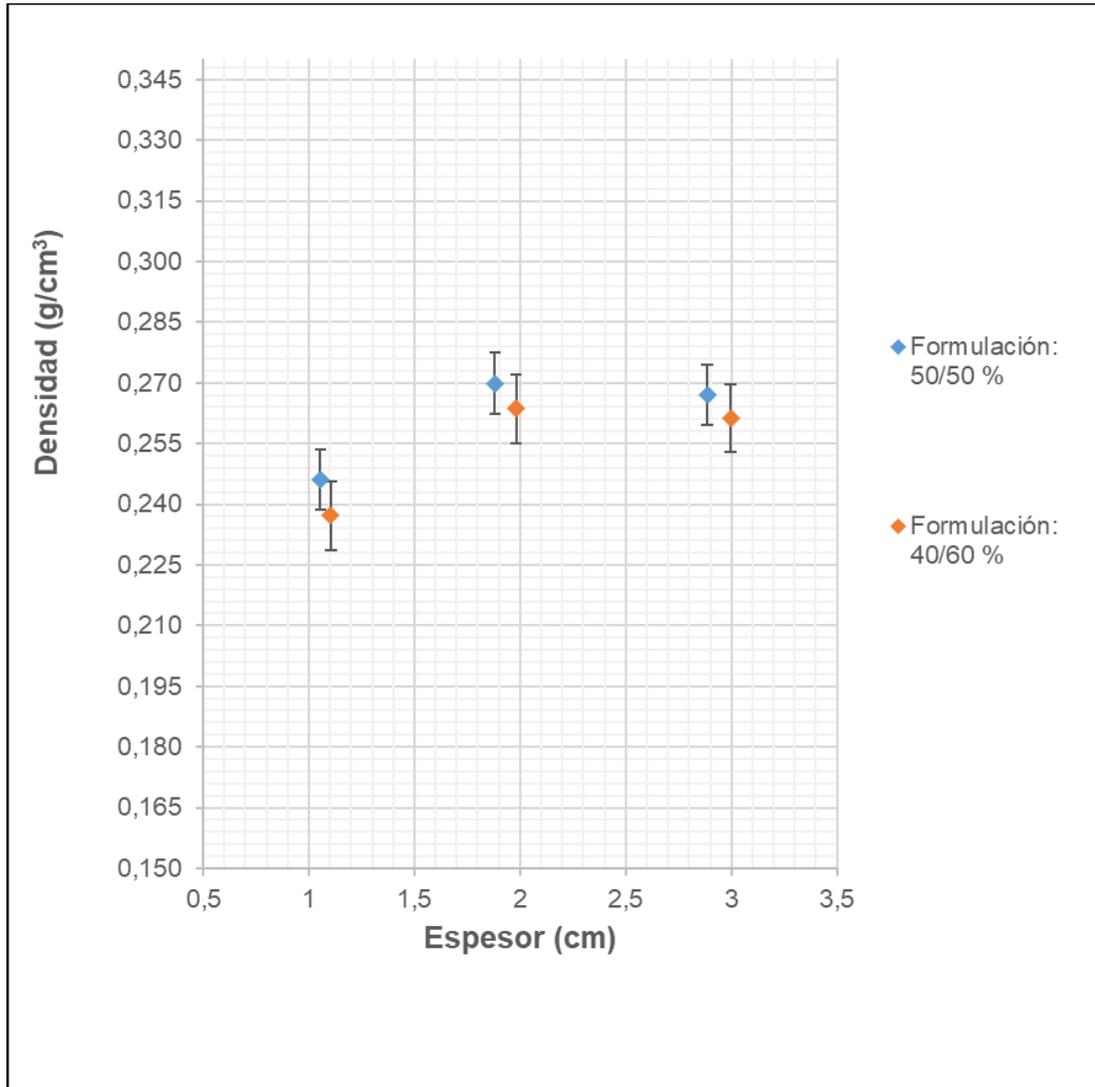
Se presenta la variación de la densidad de los tableros al variar la formulación, así como el espesor de cada uno de estos. Además, también se muestra de manera gráfica las variaciones obtenidas.

Tabla IX. **Valores de la densidad al variar la formulación y el espesor de los tableros elaborados**

FORMULACIÓN %p/p	Espesor (cm)	ρ promedio (g/cm³)	Desviación estándar
50/50	1,054	0,2460	0,0018
	1,880	0,2699	0,0004
	2.866	0,2670	0,0003
40/60	1,104	0,2371	0,0018
	1,981	0,2636	0,0007
	2,996	0,2613	0,0004

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Figura 11. **Caracterización de la densidad al variar la formulación y el espesor de los tableros elaborados**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.3.3. Humedad

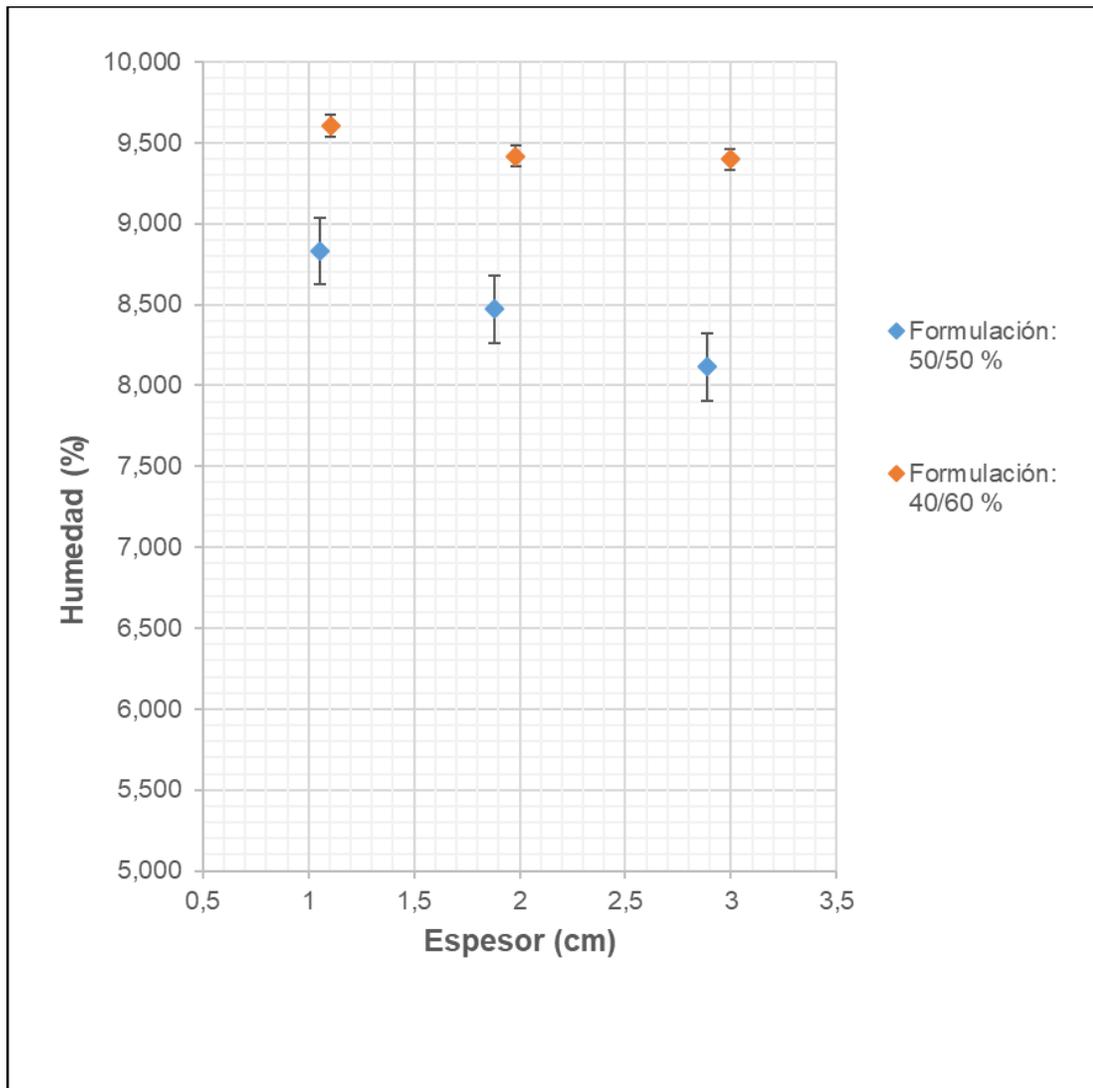
Se presenta la variación del %Humedad de los tableros al variar la formulación, así como el espesor de cada uno de estos. Además, también se muestra de manera gráfica las variaciones obtenidas.

Tabla X. **Valores de % de humedad al variar la formulación y espesor de los tableros elaborados**

FORMULACIÓN % p/p	Espesor (cm)	Humedad promedio (%)	Desviación estándar
50/50	1,054	8,829	0,454
	1,880	8,470	0,454
	2,866	8,113	0,045
40/60	1,104	9,605	0,253
	1,981	9,418	0,048
	2,996	9,398	0,242

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Figura 12. **Caracterización del porcentaje de Humedad al variar la formulación y el espesor de los tableros elaborados**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.3.4. Absorción de agua

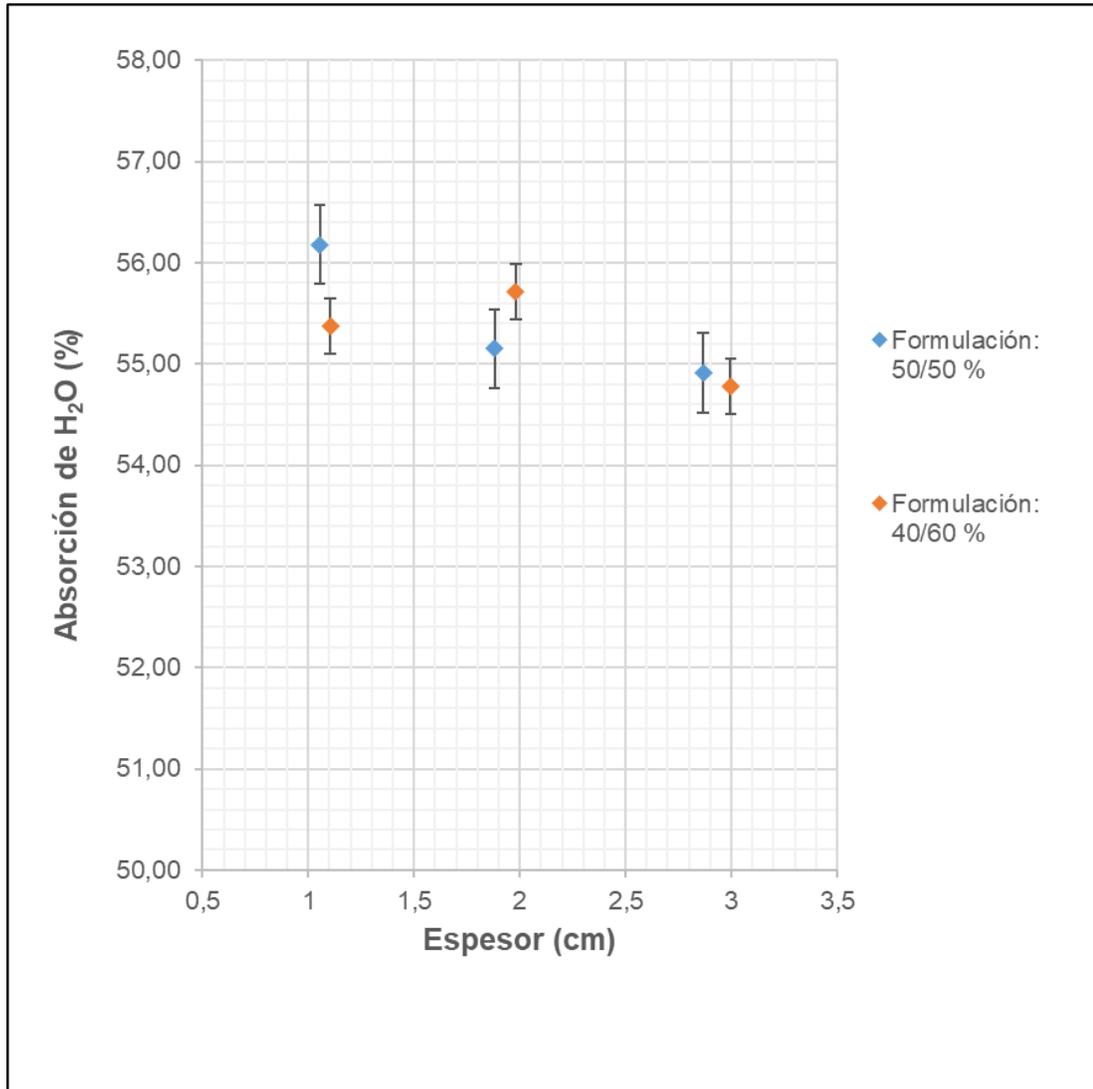
Se presenta la variación del %Absorción de agua de los tableros al variar la formulación, así como el espesor de cada uno de estos. Además, también se muestra de manera gráfica las variaciones obtenidas.

Tabla XI. **Valores del % de absorción de agua al variar la formulación y espesor de los tableros elaborados**

FORMULACIÓN % p/p	Espesor (cm)	Absorción promedio (%)	Desviación estándar
50/50	1,054	56,18	0,64
	1,880	55,15	0,65
	2,866	54,91	0,59
40/60	1,104	55,37	0,59
	1,981	55,71	0,64
	2,996	54,78	0,55

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Figura 13. **Caracterización del porcentaje de Absorción de Agua al variar la formulación y el espesor de los tableros**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.3.5. Contracción volumétrica

La prueba de Contracción Volumétrica no se pudo llevar a cabo debido al desprendimiento total de las partículas de caña de Castilla de las probetas de los tableros, lo que imposibilitó la medición de este parámetro.

4.4. Propiedades mecánicas

En este apartado se presenta la variación de las propiedades de Flexión, Tensión, Dureza Janka y Punto de Ruptura en función de la variación de la composición de la materia prima y del aglutinante (formulación), así como del espesor de cada tablero elaborado.

4.4.1. Flexión

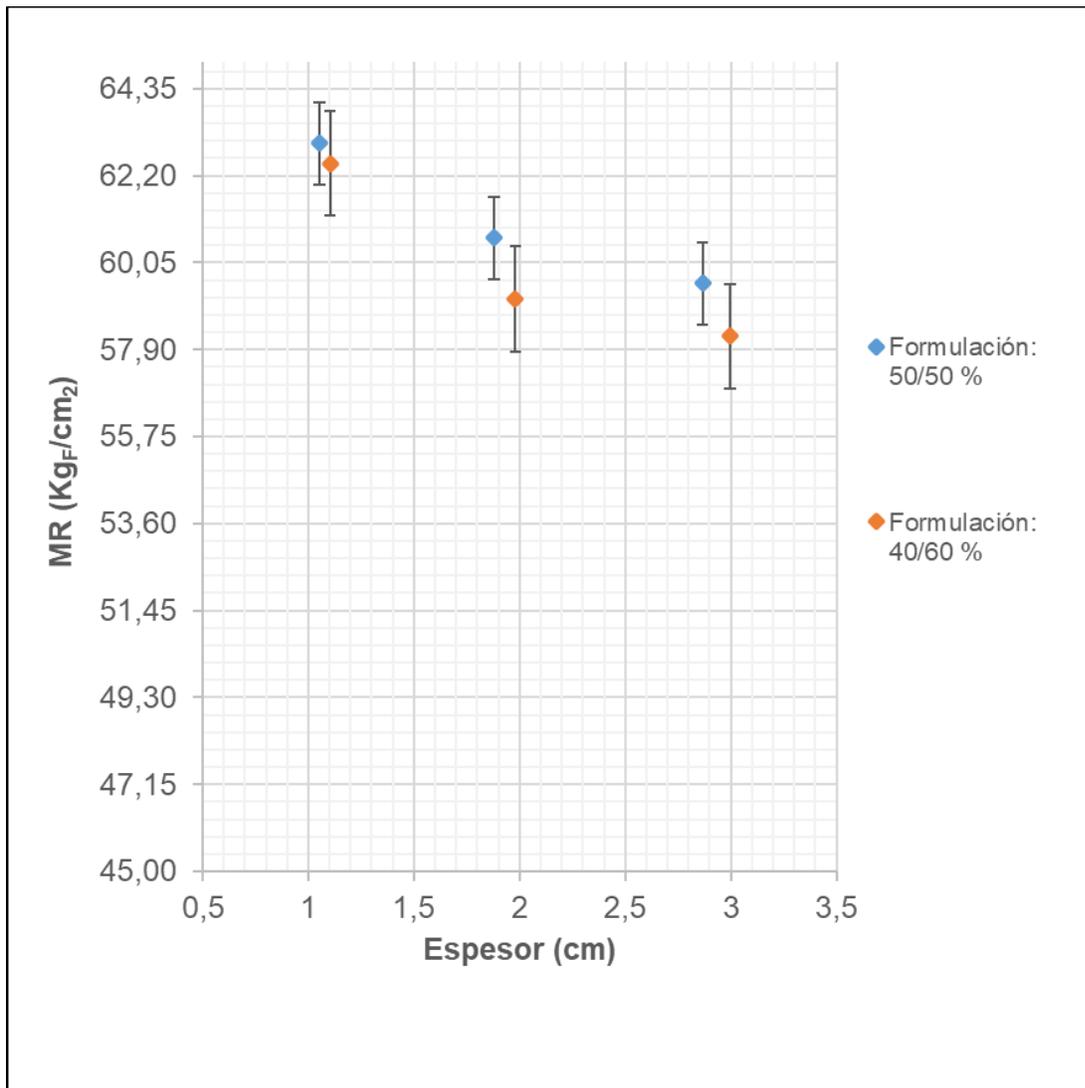
A continuación, se presenta la variación de la Flexión de los tableros al variar la formulación, así como el espesor de cada uno de estos. Además, también se muestra de manera gráfica las variaciones obtenidas.

Tabla XII. **Valores de la flexión (MR) al variar la formulación y espesor de los tableros elaborados**

FORMULACIÓN % p/p	Espesor (cm)	MR promedio (kgf/cm²)	Desviación estándar
50/50	1,054	63,00	1,38
	1,88	60,67	0,87
	2,866	59,54	0,32
40/60	1,104	62,50	1,26
	1,981	59,15	1,03
	2,996	58,23	0,34

Fuente: Elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Figura 14. **Caracterización de la propiedad de flexión al variar la formulación y el espesor de los tableros elaborados**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.4.2. Tensión

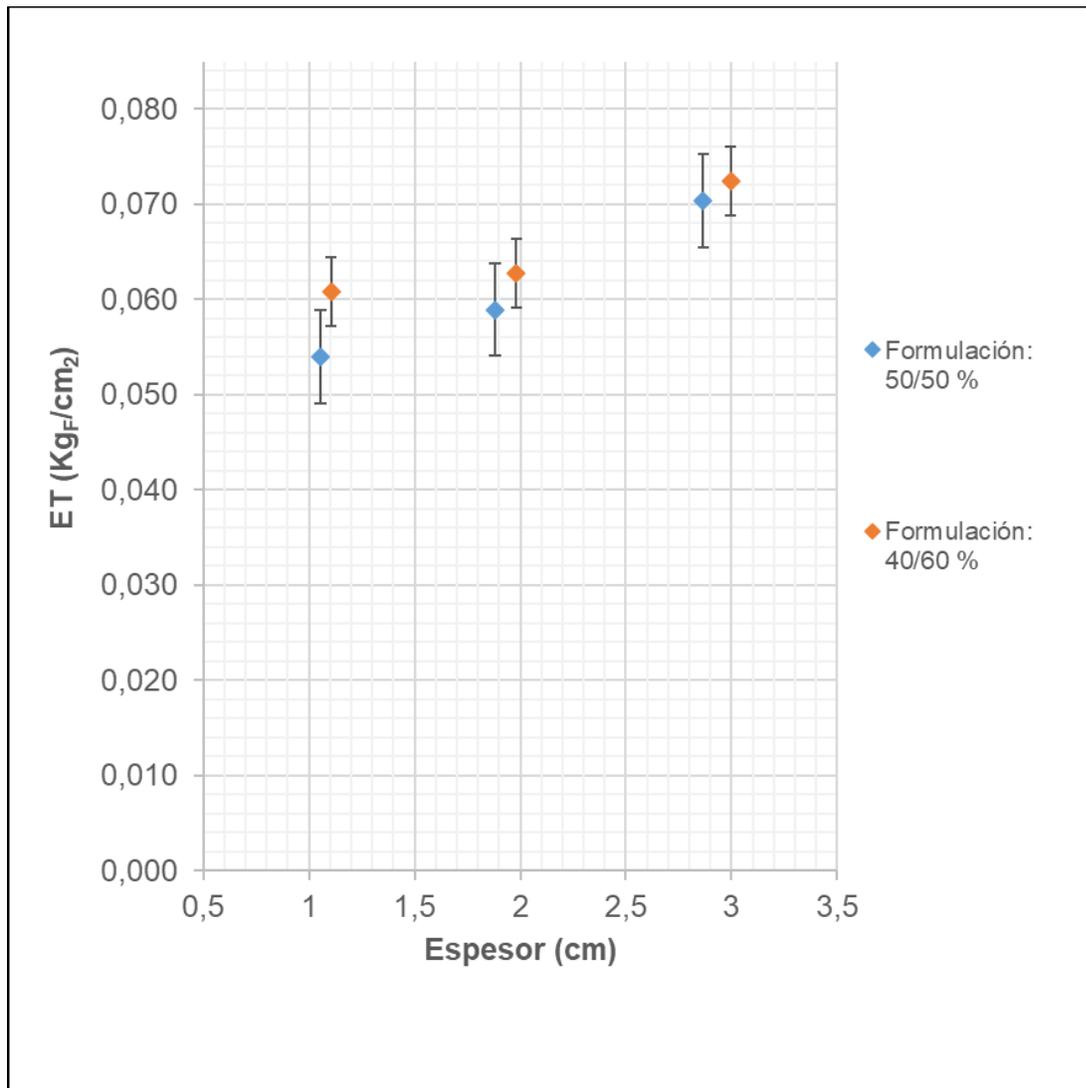
A continuación, se presenta la variación la Tensión de los tableros al variar la formulación, así como el espesor de cada uno de estos. Además, también se muestra de manera gráfica las variaciones obtenidas.

Tabla XIII. **Valores de tensión (ET) al variar la formulación y espesor de los tableros elaborados**

FORMULACIÓN % p/p	Espesor (cm)	ET (kgf/cm²)	Desviación estándar
50/50	1,054	0,054	0,001
	1,88	0,059	0,000
	2,866	0,070	0,002
40/60	1,104	0,061	0,001
	1,981	0,063	0,000
	2,996	0,072	0,002

Fuente: Elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Figura 15. **Caracterización de la Tensión al variar la formulación y el espesor de los tableros elaborados**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.4.3. Dureza

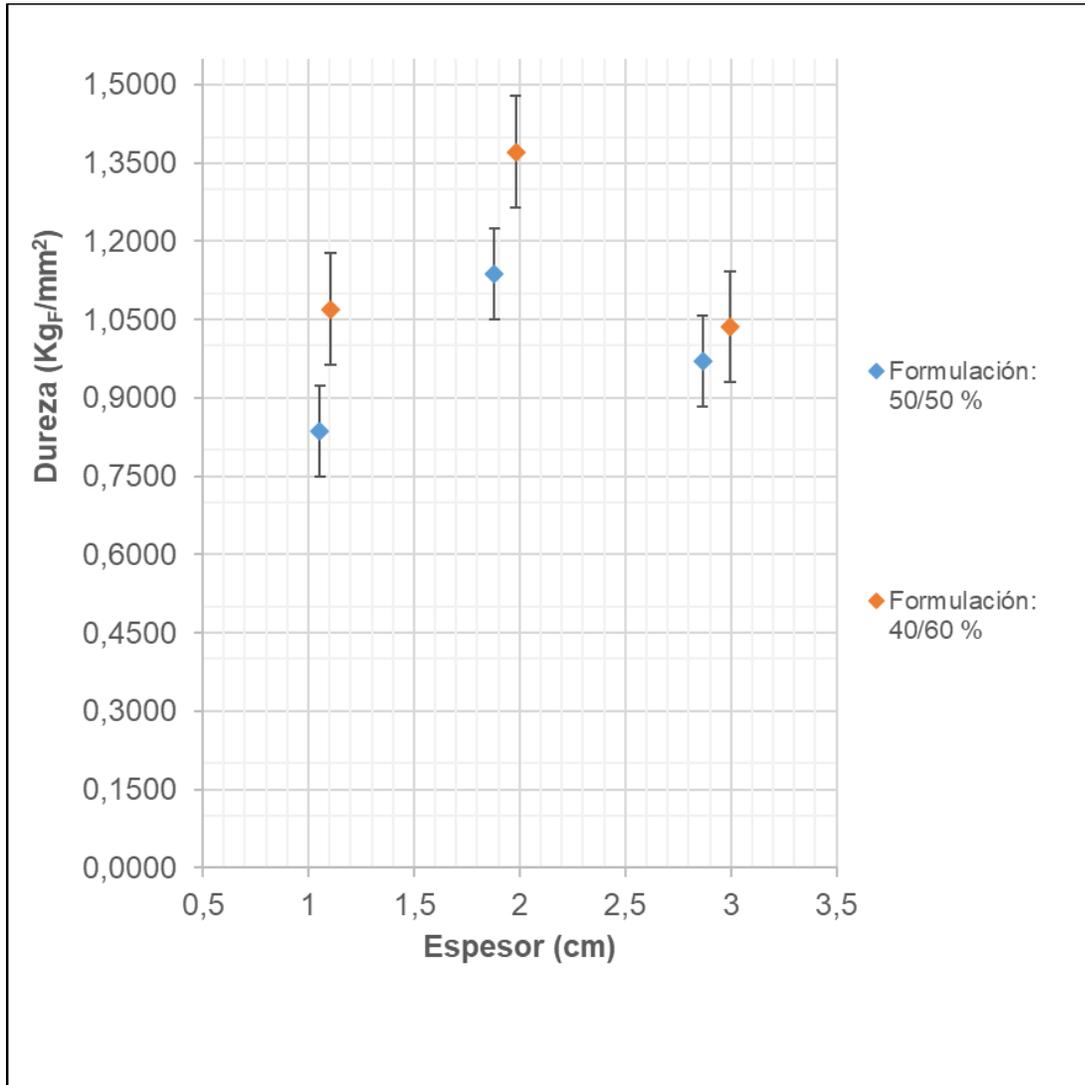
A continuación, se presenta la variación la Dureza Janka de los tableros al variar la formulación, así como el espesor de cada uno de estos. Además, también se muestra de manera gráfica las variaciones obtenidas.

Tabla XIV. **Valores de dureza Janka al variar la formulación y espesor de los tableros elaborados**

FORMULACIÓN % p/p	Espesor (cm)	Dureza (Kg/mm²)	Desviación estándar
50/50	1,054	0,8363	0,0579
	1,88	1,1374	0,0579
	2,866	0,9701	0,0579
40/60	1,104	1,0705	0,0579
	1,981	1,3715	0,0579
	2,996	1,0370	0,0579

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Figura 16. **Caracterización de la Dureza al variar la formulación y el espesor de los tableros elaborados**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.4.4. Punto de ruptura

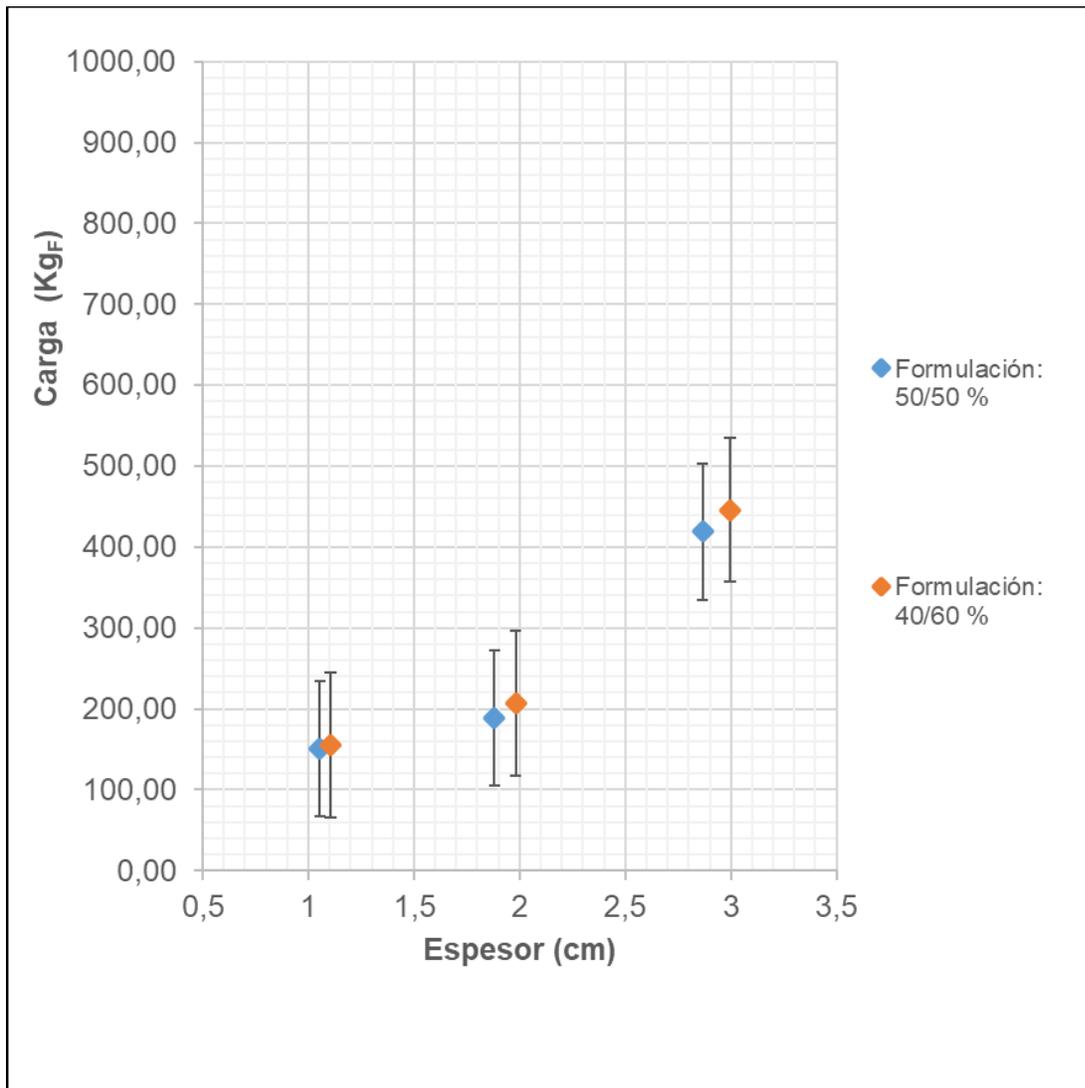
A continuación, se presenta la variación del Punto de Ruptura de los tableros al variar la formulación, así como el espesor de cada uno de estos. Además, también se muestra de manera gráfica las variaciones obtenidas.

Tabla XV. **Valores de Punto de Ruptura al variar la formulación y espesor de los tableros elaborados**

FORMULACIÓN % p/p	Espesor (cm)	P_{máx} Promedio (kg)	Desviación estándar
50/50	1,054	150,44	1,31
	1,88	189,00	13,09
	2,866	418,82	11,42
40/60	1,104	155,73	1,31
	1,981	207,14	17,17
	2,996	446,03	2,62

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Figura 17. **Caracterización del Punto de Ruptura al variar la formulación y el espesor de los tableros elaborados**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La elaboración de los tableros se realizó a partir de caña de Castilla caracterizando su composición química. En los resultados, presentados en la tabla VI y figura No.9, se observa que la caña posee un porcentaje de celulosa con un valor de 45,20 %, y de lignina con un porcentaje de 36,07 %, lo cual indica que este material posee una estructura y una aglomeración considerablemente favorables.

Los aglomerados de fibras de caña de Castilla, como materia prima, y alcohol polivinílico, como aglomerante, fueron elaborados a dos formulaciones distintas, 50 y 60 % en peso de alcohol polivinílico, a tres distintos pesos de caña que está relacionada directamente con el espesor, realizándose tres muestras por cada tablero fabricado. Estos fueron compactados en moldes de 32 X 32 cm.

A las piezas elaboradas se les evaluó el efecto que causa la variación de la cantidad de fibras de caña de Castilla agregada, así como la cantidad de aglutinante agregado, manteniéndose una presión constante de compactación, (10 toneladas) por 10 minutos y realizándose el proceso a temperatura ambiente.

La tabla VII muestra las composiciones y los espesores obtenidos a partir de los distintos pesos de caña de Castilla que se definieron en un inicio: 0,5, 1 y 1,5 lb. Los espesores promedios a una formulación de 50/50 % p/p fueron de 1,054, 1,880 y 2,866 cm. Para la formulación de 40/60 % p/p fueron de 1,104, 1,981 y 2,996 cm. Se observa un ligero aumento en el valor de los espesores de la segunda formulación, lo cual fue debido a que manteniendo las mismas cantidades de caña se agregó una mayor cantidad de aglomerante.

Los resultados de las pruebas fisicoquímicas (punto de ignición, densidad, humedad, absorción de agua) y de las pruebas mecánicas (flexión, tensión, dureza Janka y punto de ruptura) se presentan en tablas, y la tendencia de estas se muestra en gráficas del parámetro evaluado en función de la variación del espesor y de la formulación.

La prueba fisicoquímica de contracción volumétrica no se logró llevar a cabo debido a que las partículas de caña de Castilla se desprendieron y no fue posible finalizar dicho ensayo. La causa de esto fue que el experimento requería de una sumersión de las piezas fabricadas en agua por 24 horas, y al ser el aglutinante (alcohol polivinílico) un compuesto muy soluble en agua y por la alta absorción de humedad presentada por las fibras de la caña, las piezas se disolvieron.

Los resultados de la prueba de punto de ignición se muestran en la tabla No. VIII en donde se observa que las temperaturas de ignición de las piezas fabricadas se encuentran entre 217 °C y 224 °C. En la figura No. 10 se observa que el punto de ignición de los tableros para la formulación de 50/50 % p/p aumenta con el tamaño del espesor, pero para la formulación de 40/60 % p/p la temperatura disminuye con el aumento del espesor. También se observa que se proyecta una tendencia horizontal a una temperatura de ignición en un intervalo de 218 a 221 °C.

En la tabla No. 21 del apéndice 8 se muestra que estadísticamente para la formulación de 50/50 % p/p los valores del punto de ignición no poseen una diferencia significativa al variar el espesor, pero para la formulación de 40/60 % p/p si existe una diferencia significativa. También se observa que no hay diferencia significativa en los valores del punto de ignición al variar la formulación.

En la tabla IX se presentan los resultados de la densidad de las piezas elaboradas, obteniéndose valores entre 0,2460 g/cm³ a 0,2699 g/cm³ para la formulación de 50/50 %, y de 0,2371 g/cm³ a 0,2636 g/cm³ para la composición de 40/60 %, valores menores a la unidad, con lo que se establece que las piezas elaboradas son aglomerados ligeros. En la figura No. 11 se observa que la densidad de los tableros crece conforme el valor del espesor de los tableros aumenta para ambas formulaciones. Se muestra que se proyecta una tendencia horizontal a una densidad de 0,25 g/cm³ aproximadamente.

En la tabla No. 22 del apéndice 8 se muestra que estadísticamente tanto para la formulación de 50/50 % p/p como para la formulación de 40/60 % p/p los valores de la Densidad poseen una diferencia significativa al variar el espesor. También se observa que hay una diferencia significativa cuando se varía la formulación.

Los resultados de la prueba de humedad se muestran en la tabla X, observándose valores promedios de humedad de 8,113 a 8,829 % para la formulación de 50/50 %, y de 9,398 a 9,605 % para la composición de 40/60 %. Se aprecia que el porcentaje de humedad es mayor en las muestras que contienen un mayor contenido del aglutinante utilizado. Esta diferencia de contenido de humedad se debe a que el aglutinante utilizado tiene una alta afinidad con el agua. En la figura No. 12 se logra apreciar la diferencia de las humedades que existe entre las dos distintas formulaciones, observándose un comportamiento constante entre los valores presentados.

En la tabla No. 23 del apéndice 8 se muestra que estadísticamente no existe una diferencia significativa en los valores de humedad cuando se varía el espesor del tablero, observándose la aceptación de la hipótesis nula, sin embargo, si

existe una variación significativa cuando se varía la formulación de las piezas fabricadas.

La tabla XI muestra los resultados obtenidos del ensayo de Absorción de Agua, con valores promedios entre 54,91 a 56,18 % p/p para la formulación de 50/50 % p/p, y de 54,78 a 55,71 % para 40/60 % p/p. Se observa que el mayor valor se obtuvo para la primera composición. Se logra apreciar que los tableros tienen una tendencia a absorber grandes cantidades de humedad, llegando estos a un porcentaje mayor al 50 %. Este comportamiento se debe, primero, a que el aglutinante tiene gran tendencia a disolverse en agua, y segundo, las fibras de caña de Castilla tienen a absorber agua en la superficie de sus partículas. La figura No. 13 nos muestra que los tableros tienden a un valor aproximado de 55 %, aproximadamente, en lo relacionado a la absorción de agua.

Estadísticamente se observa que no existe una diferencia significativa en los valores obtenidos de absorción de agua cuando se varía el espesor o cuando se varía la formulación de las piezas elaboradas, lo cual se puede apreciar en el análisis presentado en la tabla No. 24 del apéndice 8.

En la tabla XII se presentan los resultados del módulo de ruptura (MR) o flexión estática de los tableros elaborados y se observa que los valores promedios se encuentran entre 59,54 a 63,00 kg_F/cm² para la composición de 50/50 % p/p, y entre 58,23 a 62,50 kg_F/cm² para la segunda formulación de 40/60 % p/p.

El módulo de ruptura (MR) relaciona el esfuerzo máximo aplicado con respecto al espesor del tablero. En la figura No. 14 se observa, para los tableros a una formulación de 50/50 %, que el MR disminuye cuando el espesor de las piezas elaboradas aumenta. Lo mismo ocurre con el comportamiento de los tableros de formulación 40/60 %. Este comportamiento nos indica que con el

aumento de espesor se requiere un mayor esfuerzo para llevar al tablero hacia su punto de falla. Esta tendencia se debe a que se tiene una mayor cantidad de fibras entrelazadas.

Al realizarse el análisis estadístico se observa, en la tabla No.25 del apéndice 8, que no existe una diferencia significativa en los valores del módulo de ruptura cuando se varía el espesor o cuando se varía la formulación.

La tabla XIII nos muestra los resultados del ensayo de Tensión, teniéndose que los valores se encuentran entre 0,054 a 0,070 kg_F/cm^2 para la composición de 50/50 %, y de 0,061 a 0,072 kg_F/cm^2 para la formulación de 40/60 %. En la figura No. 15 se observa que para la formulación el esfuerzo de tensión aumenta con el espesor. Los puntos que representan la segunda formulación tienden al mismo comportamiento, siendo los valores máximos 0,70 y 0,72 kg_F/cm^2 respectivamente. Con el aumento de espesor existe una mayor cantidad de fibras de caña entrelazadas por lo que se debe aplicar una mayor fuerza de tracción perpendicular para que la muestra tomada alcance el fallo.

En la tabla No.26 del apéndice 8, se observa que, a través del análisis estadístico realizado, existe una diferencia significativa en los valores de tensión al variarse el espesor de los tableros. También se muestra que existe diferencia significativa al variarse la formulación.

En la tabla XIV se muestran los resultados de la Dureza Janka. El ensayo consistió en evaluar la fuerza necesaria para lograr penetrar la mitad de una esfera de acero sobre la superficie de los tableros elaborados. Los valores máximos obtenidos fueron: 1,1374 kg_F/mm^2 para la formulación de 50/50 % p/p para el espesor de 1,88 cm, y 1,3715 kg_F/mm^2 para la formulación de 40/60 % p/p para el espesor de 1,981 cm.

En la figura No. 16 se observa que, para ambas formulaciones, 50/50 y 40/60 % p/p, el máximo valor de dureza se obtuvo en los espesores intermedios, siendo el comportamiento en que los valores aumentan y luego disminuyen. Esto es debido a que en los espesores más pequeños se tienen una menor cantidad de fibras entrelazadas y no se tiene la suficiente resistencia para oponerse a la penetración, y en los tableros de mayor espesor se tiene una mayor porosidad en su estructura, por lo que es más fácil de penetrar.

Según el análisis estadístico realizado, como se observa en la tabla No.27 del apéndice 8, la dureza de los tableros posee una diferencia significativa al variarse el espesor y la formulación.

En la tabla XV se muestran los resultados de Punto de Ruptura. Este ensayo se realizó en conjunto con el ensayo de Flexión, tomándose como punto de ruptura la carga máxima que se aplicó a las muestras tomadas para llevarlas al fallo. Se observa que para la formulación de 50/50 % la presión de carga del punto de ruptura se encuentra entre 150,4 y 418,82 kg_F, y para la formulación de 40/60 % los valores de punto de ruptura se encuentran entre los valores promedio de 155,73 y 446,03 kg_F. Existe un ligero aumento en los valores de carga de la segunda formulación, y esto es debido a la mayor cantidad de aglomerante añadido, lo que incrementó ligeramente la resistencia a la ruptura.

En la figura No. 17 se observa el comportamiento de los valores de punto de ruptura. Se muestra que tanto para la formulación de 50/50 % como para la composición de 40/60 %, existe un aumento en el punto de ruptura a medida que el espesor del tablero aumenta, visualizándose una mayor diferencia entre el segundo y tercer espesor promedio.

En la tabla No.28 del apéndice 8 se observa el análisis estadístico de los valores de punto de ruptura. Se muestra que existe una diferencia significativa en los valores obtenidos al variarse tanto la formulación como el espesor de los tableros.

CONCLUSIONES

1. Se determinó que la caña de Castilla es una buena fuente de celulosa debido a que en la caracterización de la composición química de sus fibras se obtuvo un alto porcentaje de esta con un valor de 45,2 %.
2. Los espesores obtenidos en la formulación y elaboración de los tableros aglomerados fueron, para la formulación de 50/50 % p/p: 1,054 cm, 1,880 cm, y 2,866 cm, y para la composición de 40/60 % p/p: 1,104, 1,981 y 2,996 cm. El aumento en el espesor fue debido al aumento de aglutinante agregado, manteniéndose la misma cantidad de caña.
3. Se determinó que los efectos de la variación del espesor no tienen efecto significativo sobre las propiedades fisicoquímicas. Además, se estableció que los mejores resultados se obtuvieron a la formulación de 50/50 % p/p, siendo las propiedades, punto de ignición entre 218 – 220 °C, densidad entre 0,2460 – 0,2699 g/cm³ y porcentaje de humedad entre 8,113 – 8,829 %.
4. Se determinó que los efectos de la variación de la formulación si tienen un efecto significativo sobre las propiedades fisicoquímicas de los tableros elaborados de caña de Castilla y alcohol polivinílico, obteniéndose mejores resultados a una formulación 50/50 % p/p que a 40/60 % p/p.

5. Se determinó que los tableros no pueden ser utilizados en áreas con altas humedades debido a que con la prueba de contracción volumétrica se observó una desintegración total de las fibras de estas al ponerlas en contacto directo con agua.
6. Se determinó que los efectos de la variación del espesor si tienen un efecto significativo sobre las propiedades mecánicas. Además, se estableció que los mejores resultados se obtuvieron a la formulación de 40/60 % p/p, siendo los resultados de flexión entre 58,23 – 62,50 kg_F/cm², tensión entre 0,061 – 0,072 kg_F/cm², dureza entre 1,0370 – 1,3715 kg_F/mm² y punto de ruptura entre 155,73 – 446,03 kg_F.
7. Se determinó que los efectos de la variación de la formulación si tienen un efecto significativo sobre las propiedades mecánicas de los tableros elaborados de caña de Castilla y alcohol polivinílico, obteniéndose mejores resultados a una formulación 40/60 % p/p que a 50/50 % p/p.

RECOMENDACIONES

1. Fabricar los tableros con formulaciones distintas a 50/50 % y 40/60 %, para darle una mayor trazabilidad a las propiedades mecánicas y así verificar la formulación ideal para el aprovechamiento de la caña de Castilla como materia prima en la elaboración de material de valor.
2. Realizar la fabricación de los tableros aglomerados de caña de Castilla alcohol polivinílico realizando el proceso de compresión a distintas presiones, con la finalidad de obtener tableros con menor porosidad y verificar si existe una mejora significativa en sus propiedades mecánicas.
3. Realizar la fabricación de los tableros aglomerados de caña de Castilla y alcohol polivinílico realizando el proceso de compresión en caliente, y comparar los resultados obtenidos con el proceso de compresión a temperatura ambiente.
4. Fabricar tableros de caña de Castilla haciendo uso de un aglutinante con propiedades fisicoquímicas distintas a las del alcohol polivinílico, se recomienda un aglutinante hidrofóbico principalmente.
5. Verificar que cuando se lleve a cabo el proceso de reducción del tamaño de las fibras de caña de Castilla, se retiren los anillos que forman parte del cuerpo de esta.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACOSTA RODRÍGUEZ, Cecilia Carolina, FIGUEROA LÓPEZ, Yanira Mayarit. *Estudio demostrativo del proceso artesanal de aglomerado a base de estopa de coco como materia prima*. Trabajo de investigación experimental. Facultad de Ciencias y Artes Francisco Gavidia, Universidad Dr. Matías Delgado de El Salvador, 2014. 133 p.
2. ARJONA S., Carlos O. *Primera aproximación a la cuantificación de la madera ilegal en Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Forestal. Facultad de Ciencias y Humanidades, Universidad del Valle de Guatemala, 2003. 87 p.
3. American Society for Testing and Materials. *Standard methods of evaluating properties of wood-base fiber and particle panelmaterials. Designation D 1037 – 91. Annual book of ASTM standards*. Philadelphia, Pennsylvania: ASTM, 1991. 30 p.
4. CAMPOS WELLMANN, Christian Alberto. *Determinación de propiedades físicas y mecánicas de la madera de Pinus maximinoides H.E. Moore*. Tesis de grado. Facultad de ciencias Ambientales y Agrícolas, Universidad Rafael Landívar, 2015. 227 p.
5. CHUMO ZAMBRANO, Nixon Leonardo; GONZÁLES VELÁSQUEZ, José Luis. *Ecotableros a base de residuos agroindustriales de cascarilla de arroz y bagazo de caña de azúcar en el cantón Tosagua*,

Manabí. Trabajo de graduación de Ing. en Medio Ambiente. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, 2017. 71 p.

6. COYOY PAZ, Ana Gabriela. *Formulación de un material fibroreforzado a base de la mezcla de la cáscara de coco y polímero reciclado*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2015. 125 p.
7. DELTORO TORRÓ, Vicente; JIMÉNEZ RUIZ, Jesús; VILÁN FRAGUEIRO, Xosé Manuel. *Bases para el manejo y control de Arundo Donax L. (Caña común)*. Colección Manuales Técnicos de Biodiversidad 4. Valencia. Conselleria d'Infraestructures, Territori i Medi Ambient. 2012. 69 p.
8. ESTÉVEZ BOLÍVAR, Pedro Antonio. *Desarrollo, caracterización y optimización de resinas base Urea-Formol (UF), como adhesivos para tableros aglomerados con baja emisión de Formaldehído*. Tesis doctoral. Departamento de Química, Universidad de Burgos, 2012. 188 p.
9. FLORES YEPES, José Antonio. *Fabricación y análisis de tableros de aglomerado de caña común (Arundo Donax L.)*. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Forestal, Universidad Miguel Hernández de Elche, 2005. 173 p.
10. FONSECA MALDONADO, Mario Roberto. *Determinación de la composición química de la madera de pino Candelillo (Pinus maximinoi H.E. Moore) procedente de la finca Río Frío, Tactic, Alta*

Verapaz. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2006. 154 p.

11. Food and Agriculture Organization of the United Nation. *Evaluación de los Recursos Forestales mundiales 2015, compendio de datos. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. USA: FAO, 2015. 113 p.
12. Food and Agriculture Organization of the United Nation. *Polyvinyl alcohol (PVA)*. USA: FAO, 2004. 8 p.
13. GARCÍA GARRIDO, Santiago. *Plantas de biomasa: centrales termoeléctricas de biomasa*. Edición única. España: Renovetec Editorial, 2015. 457 p.
14. GARCÍA ORTUÑO, Teresa. *Caracterización de la caña común (Arundo Donax L.) para uso como material de construcción*. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería, Universidad Miguel Hernández, 2003. 276 p.
15. GONZÁLES BEJARANO, Sergio., SILVA DELGADO, Elisabet. *Arundo Donax L: Material de Construcción*. Proyecto final de grado. Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona, Universidad Politècnica de Catalunya, 2012.
16. GONZÁLES GUDIÉL, Silda Verónica. *Evaluación de la elaboración de tableros de partículas del aserrío de la madera de palo blanco (Cybistax donell-smithi Seibert) de los primeros raleos utilizando diferentes tipos de aglomerantes*. Trabajo de graduación de Ing.

Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2013. 153 p.

17. HERNÁNDEZ TORRES, David Augusto. *Utilización de materias primas alternas (Tusa de maíz y residuos de la industria maderera) para la obtención de tableros aglomerados, mediante el uso de formaldehído como aglutinante*. Facultad de Ingeniería, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, 2015. 65 p.
18. Instituto Nacional de Bosques y Consejo Nacional de Áreas Protegidas. *Registros 1998-2001*. Guatemala: INAB-CONAP 2001.
19. Instituto Nacional de Bosques. *Mapa de Cobertura Forestal de Guatemala 2010*. Guatemala: INAB 2012. 114 p.
20. LINO VILLANUEVA, Gladys. *Arundo Donax L. como gramínea perenne para la producción de biomasa en ambiente Mediterráneo*. Universidad de Barcelona, 2016. 171 p.
21. MACIÁ MATEU, Antonio. *Tableros de Posidonia oceánica y partículas de madera de pino gallego, Estudio de propiedades mecánicas compresión paralela al tablero*. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante, 2016.
22. McCABE, Warren L., SMITH, Julian C. *Operaciones unitarias en ingeniería Química*. 7a. ed. México: McGraw-Hill, 2007. 1 009 p.

23. MILLER, James N., MILLER, Jane C. *Estadística y Quimiometría para Química Analítica*. 4a ed. Madrid: Pearson Education S.A., 2002. 296 p.
24. MONTERROSO WRIGHT, Brenda María. *Evaluación de propiedades físico-mecánicas de los tableros de aglomerados elaborados con cascarilla de café (coffea arabica) y colofonia, por el efecto de la carga de compactación y tiempo de prensado*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2013. 144 p.
25. MORALES CISNEROS, Klever Santiago. *Estudio del proceso de doblado de material compuesto por láminas de Triplex y fibras de densidad media como material alternativo a la madera sólida y su incidencia en tiempos de producción de muebles*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Universidad Técnica de Ambato, 2015. 184 p.
26. Norma UNE 56 757. *Tableros de partículas de prensado plano y de fibras de densidad media, revestidos con placas estratificadas de materiales termoestables con superficie decorativa. Métodos de ensayo*.
27. Norma UNE 56.710. *Tableros de partículas. Ensayos. Determinación de la humedad*.
28. PAZ FONG, Francisco José. *Determinación de la composición química de la madera obtenida del primer clareo en árboles de Melina (Gmelina Arborea Roxb.) de una plantación proveniente del*

departamento de Izabal. Trabajo de graduación de Ingeniería Química, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2008. 122 p.

29. PIÑEROS CASTRO, Yineth. *Aprovechamiento de biomasa lignocelulósica, algunas experiencias de investigación en Colombia*. Colombia: UTadeo, 2014. 328 p.
30. SANTA CRUZ ORELLANA, Tania Sharaim. *Evaluación de la utilización de epicarpio de maní (Arachis Hypogae, C. Linneo) con un ligante polimérico en la aplicación de especímenes de prueba-paneles menores*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2012. 171 p.
31. VIGNOTE PEÑA, Santiago; MARTÍNEZ ROJAS, Isaac. *Tecnología de la madera*. 3a ed. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2006. 275 p.

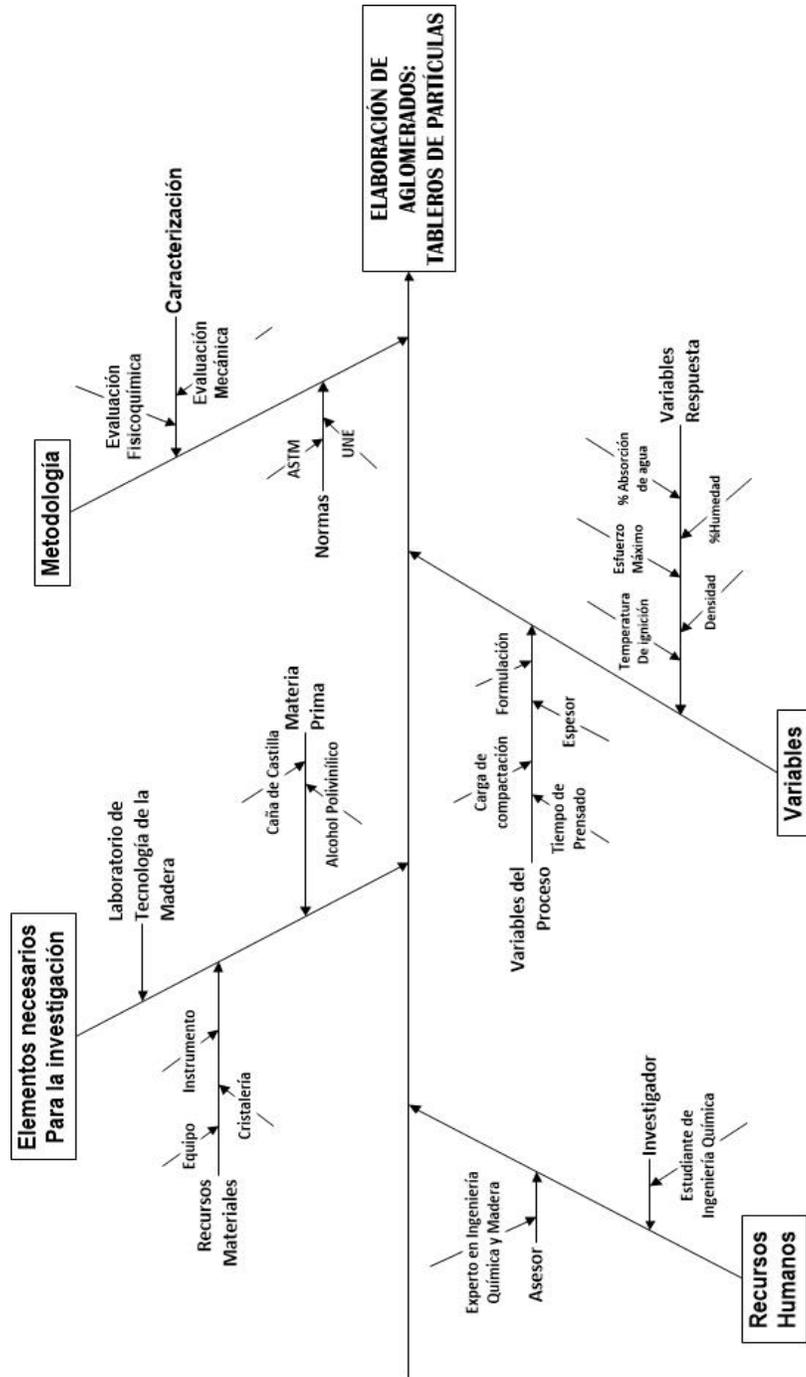
APÉNDICES

Apéndice 1. Requisitos académicos

CURSOS (INGENIERÍA QUÍMICA)			
REQUISITOS		PRE-REQUISITOS	
CÓDIGO	NOMBRE	CÓDIGO	NOMBRE
005	Técnicas de estudio y de investigación	---	---
732	Estadística 1	107	Matemática intermedia
		005	Técnicas de estudio y de investigación
452	Ciencia de los materiales	152	Física 2
370	Química Ambiental	028	Ecología
		380	Fisicoquímica 1
386	Laboratorio de Fisicoquímica 1	380	Fisicoquímica 1
388	Laboratorio de Fisicoquímica 2	386	Laboratorio de Fisicoquímica 1
429	Operaciones Unitarias Complementarias (IQ-6)	416	Transferencia de Masa (IQ-4)
434	Procesos Químicos Industriales	396	Termodinámica 4
		418	Transferencia de masa en Unidades continuas (IQ-5)

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio.

Apéndice 3. Datos originales de la caracterización de la composición química de la caña de castilla

El primer paso llevado a cabo en el presente estudio fue el de la caracterización química de la materia prima, en este caso, caña de Castilla.

Tabla 1. **Determinación de Cenizas**

Rep.	Peso Tara (g)	Peso Bruto (g)	Peso Muestra inicial (g)	%Cenizas	%Cenizas Promedio
1	13,0575	13,0937	1,0408	5,7200	5,70
2	12,1238	12,1584	1,0049	5,5600	
3	12,3344	12,3716	1,0450	5,8200	

Tabla 2. **Determinación de Extraíbles**

Rep.	Peso Dedal (g)	Peso Muestra inicial (g)	Peso Dedal + P.M. (g)	P.M. (g)	%Extraíbles	%Extraíbles Promedio
1	6,2569	7,4820	12,9190	6,6621	12,9583	12,96
2	6,0170	7,4812	12,6813	6,6643	12,9194	
3	3,9844	7,5073	10,6659	6,6815	13,0000	

Tabla 3. **Determinación de Taninos**

Rep.	Muestra (g)	mL de H2O destilada agregados	Alícuota (mL)	mlb (mL)	mlo (mL)	Pfg (g)	%Tanino	%Tanino Promedio
1	0,4998	50	6,25	5,25	5,38	80,77	0,10920	0,10
2	0,4997	50	6,25	5,28	5,40	87,50	0,10080	
3	0,4999	50	6,25	5,33	5,44	95,45	0,09240	

Continuación apéndice 3.

Tabla 4. **Determinación de lignina**

Rep.	Peso Bruto (g)	Peso Tara (g)	Peso muestra inicial (g)	%Lignina	%Lignina Promedio
1	1,0700	0,8030	1,0002	36,6947	36,07
2	1,0743	0,8239	0,9999	35,0425	
3	1,0737	0,8090	1,0001	36,4674	

Tabla 5. **Determinación de celulosa**

Rep.	Peso Bruto (g)	Peso Tara (g)	P.L. (g)	P.M.L (g)	P.M.T (g)	%Celulosa	%Celulosa Promedio
1	1,4539	0,8063	0,2670	6,6621	7,4820	44,8893	45,20
2	1,4607	0,8145	0,2504	6,6643	7,4812	46,2581	
3	1,4503	0,8098	0,2647	6,6815	7,5073	44,4462	

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Apéndice 4. **Análisis granulométrico de las fibras de la materia prima utilizada: caña de Castilla (*Arundo Donax L.*)**

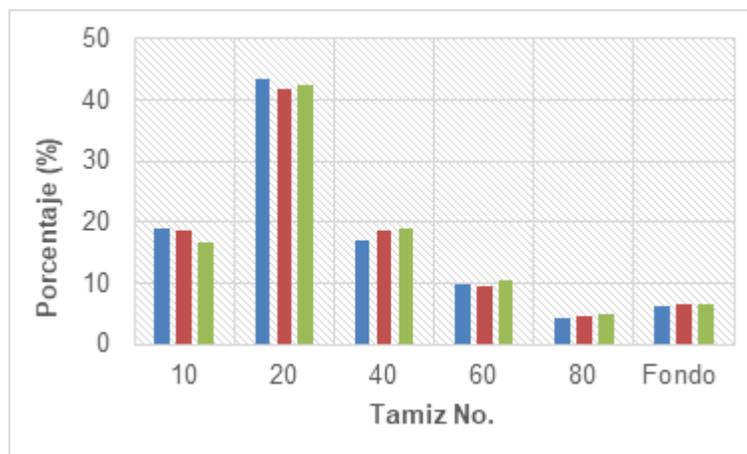
En conjunto con el análisis de la composición química se realizó un estudio granulométrico a las fibras de caña de Castilla, para lo cual se necesitó de un tamizador y una balanza analítica (Boeco Germany, d=0.01 mg)

Tabla 6. **Determinación de la granulometría**

Tamiz No.	Repeticiones (g)			Por 100 (%)		
	1	2	3	1	2	3
10	22,3595	22,0801	19,5292	18,85	18,72	16,67
20	51,6345	49,4727	49,8612	43,54	41,94	42,55
40	20,3409	22,1559	22,0860	17,15	18,78	18,85
60	11,7062	11,3676	12,0748	9,87	9,64	10,31
80	5,1766	5,2620	5,8073	4,37	4,46	4,96
Fondo	7,3750	7,6194	7,8150	6,22	6,46	6,67
Total	118,5927	117,9577	117,1735	100,00	100,00	100,00

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 1. **Granulometría**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Apéndice 5. **Dimensionamiento de tableros aglomerados de caña de Castilla elaborados**

Para determinar el espesor de cada uno de los tableros elaborados, se procedió a medir el espesor de cada uno de los lados, midiendo los extremos y el punto intermedio, luego se calculó el promedio de los valores de cada punto para determinar el espesor promedio de cada tablero.

Se realizaron tres muestras de cada tablero elaborado y para determinar el espesor promedio general se tomaron los valores obtenidos por cada muestra.

Tabla 7. **Tableros de formulación 50/50 %, espesor No.1**

Formulación (% p/p):		50/50 (0,5 Lb caña / 0,25 Lb aglomerante)													
Lados (cm)		32 x 32													
Rep.	Espesor medido en diferentes puntos (plg)												Espesor Promedio (plg)	Espesor Promedio (cm)	Área cm ²
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	0,414	0,413	0,408	0,411	0,414	0,413	0,417	0,409	0,411	0,416	0,419	0,411	0,413	1,049	1 024
2	0,13	0,422	0,417	0,414	0,421	0,416	0,418	0,419	0,418	0,410	0,415	0,414	0,416	1,058	1 024
3	0,15	0,413	0,409	0,411	0,414	0,416	0,422	0,410	0,418	0,417	0,422	0,419	0,416	1,055	1 024

Tabla 8. **Tableros de formulación 50/50 %, espesor No. 2**

Formulación (% p/p):		50/50 (1 Lb caña / 0,5 Lb aglomerante)													
Lados (cm)		32 x 32													
Rep.	Espesor medido en diferentes puntos (plg)												Espesor Promedio (plg)	Espesor Promedio (cm)	Área cm ²
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	0,749	0,735	0,745	0,739	0,748	0,750	0,744	0,739	0,738	0,734	0,741	0,739	0,742	1,884	1 024
2	0,745	0,739	0,742	0,736	0,735	0,742	0,742	0,736	0,734	0,738	0,745	0,743	0,740	1,879	1 024
3	0,747	0,741	0,738	0,732	0,737	0,741	0,736	0,737	0,741	0,736	0,735	0,741	0,739	1,876	1 024

Continuación apéndice 5.

Tabla 9. Tableros de formulación 50/50 %, espesor No.3

Formulación (% p/p):		50/50 (1,5 Lb caña / 0,75 Lb aglomerante)													
Lados (cm)		32 x 32													
Rep.	Espesor medido en diferentes puntos (plg)												Espesor Promedio (plg)	Espesor Promedio (cm)	Área cm ²
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	1,131	1,126	1,129	1,127	1,128	1,131	1,129	1,131	1,126	1,123	1,131	1,122	1,128	2,865	1 024
2	1,132	1,127	1,126	1,127	1,132	1,128	1,124	1,135	1,128	1,133	1,128	1,125	1,129	2,867	1 024
3	1,135	1,123	1,127	1,128	1,131	1,126	1,127	1,129	1,123	1,128	1,131	1,135	1,129	2,867	1 024

Tabla 10. Tableros de formulación 40/60%, espesor No.1

Formulación (% p/p):		40/60 (0,5 Lb caña / 0,3 Lb aglomerante)													
Rep.	Espesor medido en diferentes puntos (plg)												Espesor Promedio (plg)	Espesor Promedio (cm)	Área (cm ²)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	0,436	0,427	0,429	0,427	0,438	0,439	0,444	0,432	0,441	0,424	0,436	0,431	0,434	1,102	1 024
2	0,433	0,441	0,430	0,432	0,430	0,444	0,435	0,422	0,436	0,430	0,431	0,427	0,433	1,099	1 024
3	0,438	0,440	0,432	0,439	0,435	0,440	0,439	0,432	0,442	0,445	0,432	0,435	0,437	1,111	1 024

Tabla 11. Tableros de formulación 40/60 %, espesor No.2

Formulación (% p/p):		40/60 (1 Lb caña / 0,6 Lb aglomerante)													
Rep.	Espesor medido en diferentes puntos (plg)												Espesor Promedio (plg)	Espesor Promedio (cm)	Área (cm ²)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	0,789	0,78	0,774	0,779	0,776	0,785	0,788	0,781	0,777	0,783	0,783	0,774	0,781	1,983	1 024
2	0,785	0,779	0,771	0,781	0,783	0,779	0,782	0,778	0,776	0,781	0,782	0,783	0,780	1,981	1 024
3	0,784	0,775	0,775	0,788	0,775	0,78	0,779	0,783	0,782	0,772	0,779	0,771	0,779	1,978	1 024

Continuación apéndice 5.

Tabla 12. **Tableros de formulación 40/60 %, espesor No.3**

Formulación (% p/p):		40/60 (1,5 Lb caña / 0,9 Lb aglomerante)												Espesor Promedio (plg)	Espesor Promedio (cm)	Área (cm ²)
Rep.	Espesor medido en diferentes puntos (plg)															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
1	1,184	1,187	1,179	1,174	1,178	1,174	1,173	1,185	1,187	1,184	1,179	1,182	1,181	2,998	1 024	
2	1,177	1,169	1,182	1,183	1,179	1,174	1,176	1,186	1,175	1,185	1,182	1,179	1,179	2,994	1 024	
3	1,179	1,177	1,185	1,176	1,173	1,178	1,184	1,183	1,179	1,178	1,176	1,175	1,179	2,994	1 024	

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Apéndice 6. **Datos originales de los valores obtenidos de los ensayos de propiedades mecánicas**

A continuación, se muestra la data primaria de los ensayos de las propiedades mecánicas, variando dos formulaciones y tres espesores por cada una de las concentraciones.

Tabla 13. **Flexión**

FORMULACIÓN (% p/p)	Espesor (cm)	REP.	E ² (cm ²)	a (cm)	d (cm)	P _{máx} (Lb)	P _{máx} (kg _F)	MR (kg/cm ²)
50/50	1,054	1	1,1109	32,00	25	130	58,97	62,20
		2		32,00	25	130	58,97	62,20
		3		32,00	25	135	61,23	64,60
	1,88	1	3,5344	32,00	25	400	181,44	60,16
		2		32,00	25	410	185,97	61,67
		3		32,00	25	400	181,44	60,16
	2,866	1	8,214	32,00	25	915	415,04	59,21
		2		32,00	25	925	419,57	59,86
		3		32,00	25	920	417,31	59,54
40/60	1,104	1	1,2188	32,00	25	140	63,50	61,05
		2		32,00	25	145	65,77	63,23
		3		32,00	25	145	65,77	63,23
	1,981	1	3,9244	32,00	25	435	197,31	58,93
		2		32,00	25	445	201,85	60,28
		3		32,00	25	430	195,04	58,25
	2,996	1	8,976	32,00	25	980	444,52	58,04
		2		32,00	25	990	449,06	58,63
		3		32,00	25	980	444,52	58,04

Continuación apéndice 6.

Tabla 14. **Tensión**

FORMULACIÓN (% p/p)	Espesor (cm)	REPETICIÓN	Largo (cm)	Ancho (cm)	Área (cm²)	P_{máx} (kg_F)	ET (kg_F/cm²)
50/50	1,054	1	10	31,5	315	17,18	0,055
		2	10	32,0	320	17,24	0,054
		3	10	32,0	320	17,12	0,054
	1,880	1	10	32,0	320	18,86	0,059
		2	10	32,0	320	19,00	0,059
		3	10	32,0	320	18,70	0,058
	2,866	1	10	31,5	315	22,54	0,072
		2	10	32,0	320	21,98	0,069
		3	10	31,5	315	22,35	0,071
40/60	1,104	1	10	32,0	320	19,26	0,060
		2	10	31,5	315	19,23	0,061
		3	10	31,5	315	19,32	0,061
	1,981	1	10	32,0	320	20,06	0,063
		2	10	32,0	320	19,98	0,062
		3	10	32,0	320	20,20	0,063
	2,996	1	10	32,0	320	23,14	0,072
		2	10	32,0	320	22,66	0,071
		3	10	31,5	315	23,36	0,074

Continuación apéndice 6.

Tabla 15. Dureza Janka

FORMULACIÓN (% p/p)	Espesor (cm)	REP.	Ancho cm	Largo cm	D esfera (mm)	Fuerza aplicada		As esfera (mm ²)	Dureza (Kg _f /mm ²)
						Lb _f	Kg _f		
50/50	1,054	1	10,0	9,5	12	400	181,6	226,19	0,8028
		2	10,0	10,0	12	450	204,3	226,19	0,9032
		3	9,5	10,0	12	400	181,6	226,19	0,8028
	1,880	1	10,0	10,0	12	550	249,7	226,19	1,1039
		2	10,0	9,5	12	600	272,4	226,19	1,2043
		3	10,0	10,0	12	550	249,7	226,19	1,1039
	2,866	1	9,5	9,5	12	500	227,0	226,19	1,0036
		2	9,5	10,0	12	450	204,3	226,19	0,9032
		3	10,0	10,0	12	500	227,0	226,19	1,0036
40/60	1.104	1	10,0	9,5	12	500	227,0	226,19	1,0036
		2	10,0	10,0	12	550	249,7	226,19	1,1039
		3	9,5	10,0	12	550	249,7	226,19	1,1039
	1,981	1	10,0	9,5	12	650	295,1	226,19	1,3046
		2	10,0	9,5	12	700	317,8	226,19	1,4050
		3	10,0	10,0	12	700	317,8	226,19	1,4050
	2,996	1	10,0	9,5	12	550	249,7	226,19	1,1039
		2	10,0	9,5	12	500	227,0	226,19	1,0036
		3	10,0	10,0	12	500	227,0	226,19	1,0036

Continuación apéndice 6.

Tabla 16. **Punto de Ruptura**

FORMULACIÓN	Espesor (cm)	Repetición	P _{máx} (Lb)
50/50	1,054	1	330
		2	330
		3	335
	1,88	1	400
		2	450
		3	400
	2,866	1	900
		2	920
		3	950
40/60	1,104	1	340
		2	345
		3	345
	1,981	1	500
		2	440
		3	430
	2,996	1	980
		2	990
		3	980

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Apéndice 7. Datos originales de los valores obtenidos de los ensayos de propiedades fisicoquímicas

A continuación, se muestra la data primaria de los ensayos de las propiedades fisicoquímicas, variando dos formulaciones y tres espesores por cada una de las concentraciones.

Tabla 17. Punto de Ignición

FORMULACIÓN (% p/p)	Espesor (cm)	REP.	PESO (g)	T° dentro del crisol (°C)	T° fuera del crisol (°C)	T° plancha (°C)	CARACTERÍSTICA
50/50	1,054	1	1,02	216	148,9	350	quemado / carbonizado
		2	0,96	220	148,3	350	quemado / carbonizado
		3	0,98	218	146,6	350	quemado / carbonizado
	1,88	1	0,96	216	150,2	350	quemado / carbonizado
		2	1,01	218	147,3	350	quemado / carbonizado
		3	0,96	224	148,5	350	quemado / carbonizado
	2,866	1	0,95	222	150,2	350	quemado / carbonizado
		2	1,02	218	149,7	350	quemado / carbonizado
		3	1,01	220	148,4	350	quemado / carbonizado
40/60	1,104	1	1,03	223	143,2	350	quemado / carbonizado
		2	0,98	224	145,3	350	quemado / carbonizado
		3	1,02	225	140,1	350	quemado / carbonizado
	1,981	1	1,01	221	156,4	350	quemado / carbonizado
		2	0,96	218	143,5	350	quemado / carbonizado
		3	0,98	215	145,9	350	quemado / carbonizado
	2,996	1	1,01	215	146,6	350	quemado / carbonizado
		2	0,95	218	145,2	350	quemado / carbonizado
		3	0,97	219	147,1	350	quemado / carbonizado

Continuación apéndice 7.

Tabla 18. **Densidad**

FORMULACIÓN (% p/p)	Espesor (cm)	Espesor Promedio (cm)	REP.	Área (cm²)	Volumen (cm³)	Peso (g)	ρ (g/cm³)
50/50	1,049	1,054	1	1 024	1 074,176	266,16	0,2478
	1,058		2	1 024	1 083,392	264,58	0,2442
	1,055		3	1 024	1 080,32	265,90	0,2461
	1,884	1,88	1	1 024	1 929,216	520,15	0,2696
	1,879		2	1 024	1 924,096	518,91	0,2697
	1,876		3	1 024	1 921,024	519,46	0,2704
	2,865	2,866	1	1 024	2 933,76	782,27	0,2666
	2,867		2	1 024	2 935,808	784,64	0,2673
	2,867		3	1 024	2 935,808	783,91	0,2670
40/60	1,102	1,104	1	1 024	1 128,448	267,21	0,2368
	1,099		2	1 024	1 125,376	269,11	0,2391
	1,111		3	1 024	1 137,664	267,95	0,2355
	1,983	1,981	1	1 024	2 030,592	536,78	0,2643
	1,981		2	1 024	2 028,544	534,46	0,2635
	1,978		3	1 024	2 025,472	532,45	0,2629
	2,998	2,996	1	1 024	3 069,952	800,60	0,2608
	2,994		2	1 024	3 065,856	801,90	0,2616
	2,994		3	1 024	3 065,856	801,57	0,2615

Continuación apéndice 7.

Tabla 19. **Porcentaje de Humedad**

FORMULACIÓN (% p/p)	Espesor (cm)	REP	Peso inicial (g)	Peso final (g)	%Humedad
50/50	1,054	1	0,991	0,900	9,183
		2	1,014	0,933	8,988
		3	1,010	0,926	8,317
	1,88	1	1,015	0,943	8,923
		2	1,013	0,931	8,016
		3	1,027	0,940	8,471
	2,866	1	1,028	0,945	8,074
		2	0,975	0,896	8,103
		3	1,027	0,945	8,163
40/60	1,104	1	0,990	0,895	9,596
		2	0,962	0,872	9,356
		3	1,014	0,914	9,862
	1,981	1	1,008	0,913	9,425
		2	1,004	0,909	9,462
		3	0,993	0,900	9,366
	2,996	1	0,992	0,896	9,677
		2	0,992	0,900	9,274
		3	1,017	0,923	9,243

Continuación apéndice 7.

Tabla 20. **Absorción de agua**

FORMULACIÓN (% p/p)	Espesor (cm)	REP	Peso plato (g)	P _i + P _{plato} (g)	P _f + P _{Plato} (g)	P _f -P _i (g)	P _i (g)	A (%)
50/50	1,054	1	4,21	22,49	32,75	10,26	18,28	56,13
		2	4,19	22,45	32,83	10,38	18,26	56,85
		3	4,17	22,38	32,50	10,12	18,21	55,57
	1,88	1	4,18	39,42	58,62	19,20	35,24	54,48
		2	4,17	39,50	59,00	19,50	35,33	55,19
		3	4,23	39,30	58,86	19,56	35,07	55,77
	2,866	1	4,18	64,39	97,86	33,47	60,21	55,59
		2	4,15	65,04	98,32	33,28	60,89	54,66
		3	4,18	64,92	98,02	33,10	60,74	54,49
40/60	1,104	1	4,23	23,75	34,64	10,89	19,52	55,79
		2	4,14	23,52	34,12	10,60	19,38	54,70
		3	4,19	23,80	34,71	10,91	19,61	55,63
	1,981	1	4,18	46,69	70,09	23,40	42,51	55,05
		2	4,20	46,65	70,33	23,68	42,45	55,78
		3	4,18	45,98	69,52	23,54	41,80	56,32
	2,996	1	4,21	74,00	112,45	38,45	69,79	55,09
		2	4,18	73,68	111,98	38,30	69,50	55,11
		3	4,15	73,79	111,50	37,71	69,64	54,15

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel

Apéndice 8. Análisis de varianza de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas al variar la formulación y el espesor de los tableros

En esta sección se presenta el análisis de varianza de los valores de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de los ensayos realizados a los tableros elaborados con caña de Castilla (*Arundo Donax L.*) al variar la formulación y el espesor de estos.

1. Análisis de varianza de los efectos de los factores de variación sobre el Punto de Ignición

Se presenta el análisis de varianza sobre el Punto de Ignición de los efectos de la variación del espesor y de la formulación de los tableros elaborados.

Tabla 21. Análisis de varianza sobre el Punto de Ignición

Factor de variación	Origen de la Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Promedio de cuadrados	Valor F calculado	Valor Crítico F	Hipótesis Nula (Ho)
Espesor (50/50)	Entre grupos	6,2222	2	3,1111	0,3684	5,1432	ACEPTADA
	Dentro de los grupos	50,6667	6	8,4444			
Espesor (40/60)	Entre grupos	74,6667	2	37,3333	11,5862	5,1432	RECHAZADA
	Dentro de los grupos	19,3333	6	3,2222			
Formulación	Entre grupos	84,4444	5	16,8889	2,8952	3,1059	ACEPTADA
	Dentro de los grupos	70	12	5,8333			

Continuación apéndice 8.

2. Análisis de varianza del efecto de los factores de variación sobre la densidad

Se presenta el análisis de varianza sobre la Densidad de los efectos de la variación del espesor y de la formulación de los tableros elaborados.

Tabla 22. Análisis de varianza sobre la Densidad

Factor de variación	Origen de la Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Promedio de cuadrados	Valor F calculado	Valor Crítico F	Hipótesis Nula (Ho)
Espesor (50/50)	Entre grupos	0,0010	2	0,0005	43,8802	5,1432	RECHAZADA
	Dentro de los grupos	6,94E-06	6	1,15E-06			
Espesor (40/60)	Entre grupos	0,0013	2	0,0006	47,4471	5,1432	RECHAZADA
	Dentro de los grupos	8,12E-06	6	1,35E-06			
Formulación	Entre grupos	0,00227	5	0,000455	40,9807	3,1059	RECHAZADA
	Dentro de los grupos	8,03E-05	12	6,69E-06			

Continuación apéndice 8.

3. Análisis de varianza del efecto de los factores de variación sobre el Porcentaje de Humedad

Se presenta el análisis de varianza sobre el porcentaje de humedad de los efectos de la variación del espesor y de la formulación de los tableros elaborados.

Tabla 23. Análisis de varianza sobre el porcentaje de Humedad

Factor de variación	Origen de la Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Promedio de cuadrados	Valor F calculado	Valor Crítico F	Hipótesis Nula (Ho)
Espesor (50/50)	Entre grupos	0,7690	2	0,3845	2,7856	5,1432	ACEPTADA
	Dentro de los grupos	0,8282	6	0,1380			
Espesor (40/60)	Entre grupos	0,0781	2	0,0390	0,9366	5,1432	ACEPTADA
	Dentro de los grupos	0,2501	6	0,0417			
Formulación	Entre grupos	5,3701	5	1,0740	11,9529	3,1059	RECHAZADA
	Dentro de los grupos	1,0782	12	0,0898			

Continuación apéndice 8.

4. Análisis de varianza del efecto de los factores de variación sobre el porcentaje de Absorción de Agua

Se presenta el análisis de varianza sobre el porcentaje de absorción de agua de los efectos de la variación del espesor y de la formulación de los tableros elaborados.

Tabla 24. Análisis de varianza sobre el porcentaje de Absorción de Agua

Factor de variación	Origen de la Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Promedio de cuadrados	Valor F calculado	Valor Crítico F	Hipótesis Nula (Ho)
Espesor (50/50)	Entre grupos	2,7309	2	1,3655	3,4912	5,1432	ACEPTADA
	Dentro de los grupos	2,3467	6	0,3911			
Espesor (40/60)	Entre grupos	1,3310	2	0,6655	1,8863	5,1432	ACEPTADA
	Dentro de los grupos	2,1168	6	0,3528			
Formulación	Entre grupos	4,1318	5	0,8263	2,2216	3,1059	ACEPTADA
	Dentro de los grupos	4,4635	12	0,3719			

Continuación apéndice 8.

5. Análisis de varianza del efecto de los factores de variación sobre la Flexión

Se presenta el análisis de varianza sobre la flexión de los efectos de la variación del espesor y de la formulación de los tableros elaborados.

Tabla 25. Análisis de varianza sobre la Flexión

Factor de variación	Origen de la Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Promedio de cuadrados	Valor F calculado	Valor Crítico F	Hipótesis Nula (Ho)
Espesor (50/50)	Entre grupos	18,0408	2	9,0204	1,1142	5,1432	ACEPTADA
	Dentro de los grupos	48,5756	6	8,0959			
Espesor (40/60)	Entre grupos	35,3108	2	17,6554	1,8221	5,1432	ACEPTADA
	Dentro de los grupos	58,1365	6	9,6894			
Formulación	Entre grupos	58,293	5	11,6586	1,311	3,1059	ACEPTADA
	Dentro de los grupos	106,7122	12	8,8927			

Continuación apéndice 8.

6. Análisis de varianza del efecto de los factores de variación sobre la Tensión

Se presenta el análisis de varianza sobre la tensión de los efectos de la variación del espesor y de la formulación de los tableros elaborados.

Tabla 26. Análisis de varianza sobre las Tensión

Factor de variación	Origen de la Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Promedio de cuadrados	Valor F calculado	Valor Crítico F	Hipótesis Nula (Ho)
Espesor (50/50)	Entre grupos	0,00041	2	0,000205	21,045	5,1432	RECHAZADA
	Dentro de los grupos	5,68E-06	6	9,47E-07			
Espesor (40/60)	Entre grupos	0,000231154	2	0,0001	10,5137	2,1432	RECHAZADA
	Dentro de los grupos	6,57E-06	6	1,10E-06			
Formulación	Entre grupos	0,0007187	5	0,0001	14,7987	3,1059	RECHAZADA
	Dentro de los grupos	1,23E-05	12	1,02E-06			

Continuación apéndice 8.

7. Análisis de varianza del efecto de los factores de variación sobre la Dureza

Se presenta el análisis de varianza sobre la Dureza de los efectos de la variación del espesor y de la formulación de los tableros elaborados.

Tabla 27. Análisis de varianza sobre la Dureza

Factor de variación	Origen de la Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Promedio de cuadrados	Valor F calculado	Valor Crítico F	Hipótesis Nula (Ho)
Espesor (50/50)	Entre grupos	0,1365	2	0,0683	20,3333	5,1432	RECHAZADA
	Dentro de los grupos	0,0201	6	0,0034			
Espesor (40/60)	Entre grupos	0,2037	2	0,1018	30,3333	5,1432	RECHAZADA
	Dentro de los grupos	0,0201	6	0,0034			
Formulación	Entre grupos	0,4834	5	0,0967	28,8000	3,1059	RECHAZADA
	Dentro de los grupos	0,0402	12	0,0034			

Continuación apéndice 8.

8. Análisis de varianza del efecto de los factores de variación sobre el Punto de Ruptura

Se presenta el análisis de varianza sobre el punto de ruptura de los efectos de la variación del espesor y de la formulación de los tableros elaborados.

Tabla 28. Análisis de varianza sobre el Punto de Ruptura

Factor de variación	Origen de la Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Promedio de cuadrados	Valor F calculado	Valor Crítico F	Hipótesis Nula (Ho)
Espesor (50/50)	Entre grupos	126,2820	2	63,1646	62,4412	5,1432	RECHAZADA
	Dentro de los grupos	60,9511	6	10,1158			
Espesor (40/60)	Entre grupos	143,9857	2	71,9929	71,1684	5,1432	RECHAZADA
	Dentro de los grupos	60,6951	6	10,1158			
Formulación	Entre grupos	271,5978	5	54,3196	53,6974	3,1059	RECHAZADA
	Dentro de los grupos	12,1391	12	10,1158			

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Apéndice 9. **Etapa experimental del estudio**

A continuación, se presentan fotografías tomadas durante la etapa experimental del estudio

Figura 1. **Materia prima, fibras de caña de Castilla**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio Industrial de Extracciones Vegetales (LIEXVE).
CII/USAC.

Continuación apéndice 9.

Figura 2. **Proceso de tamizado de fibras de caña de Castilla**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio Industrial de Extracciones Vegetales (LIEXVE).
CII/USAC.

Figura 3. **Pesado de fibras de caña para análisis granulométrico**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio Industrial de Extracciones Vegetales (LIEXVE).
CII/USAC.

Continuación apéndice 9.

Figura 4. **Fibras de caña de Castilla tamizadas**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio Industrial de Extracciones Vegetales (LIEXVE).
CII/USAC.

Figura 5. **Ensayo de extraíbles**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio Industrial de Extracciones Vegetales (LIEXVE).
CII/USAC.

Continuación apéndice 9.

Figura 6. **Ensayo de Lignina**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio Industrial de Extracciones Vegetales (LIEXVE).
CII/USAC.

Figura 7. **Ensayo de Celulosa**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio Industrial de Extracciones Vegetales (LIEXVE).
CII/USAC.

Continuación apéndice 9.

Figura 8. **Ensayo de Cenizas**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio Industrial de Extracciones Vegetales (LIECVE).
CII/USAC.

Figura 9. **Ensayo de Taninos**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio Industrial de Extracciones Vegetales (LIECVE).
CII/USAC.

Continuación apéndice 9.

Figura 10. **Horno de secado**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio Industrial de Extracciones Vegetales (LIEXVE).
CII/USAC.

Figura 11. **Balanza analítica de pesado**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio Industrial de Extracciones Vegetales (LIEXVE).
CII/USAC.

Continuación apéndice 9.

Figura 12. **Desecadora**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio Industrial de Extracciones Vegetales (LIECVE).
CII/USAC.

Figura 13. **Equipo de secado al vacío**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio Industrial de Extracciones Vegetales (LIECVE).
CII/USAC.

Continuación apéndice 9.

Figura 14. **Molino industrial**



Fuente: elaboración propia, taller de Sección de Tecnología de la Madera. CII/USAC.

Figura 15. **Prensa Hidráulica**



Fuente: elaboración propia, taller de Sección de Tecnología de la Madera. CII/USAC.

Continuación apéndice 9.

Figura 16. **Molde de tableros**



Fuente: elaboración propia, taller de Sección de Tecnología de la Madera. CII/USAC.

Figura 17. **Balanza de humedad**



Fuente: elaboración propia, taller de Sección de Tecnología de la Madera. CII/USAC.

Continuación apéndice 9.

Figura 18. **Termómetro / Vernier**



Fuente: elaboración propia, taller de Sección de Tecnología de la Madera. CII/USAC.

Figura 19. **Proceso de mezclado**



Fuente: elaboración propia, taller de Sección de Tecnología de la Madera. CII/USAC.

Continuación apéndice 9.

Figura 20. **Tableros aglomerados fabricados**



Fuente: elaboración propia, taller de Sección de Tecnología de la Madera. CII/USAC.

Figura 21. **Ensayo de Flexión**



Fuente: elaboración propia, taller de Sección de Tecnología de la Madera. CII/USAC.

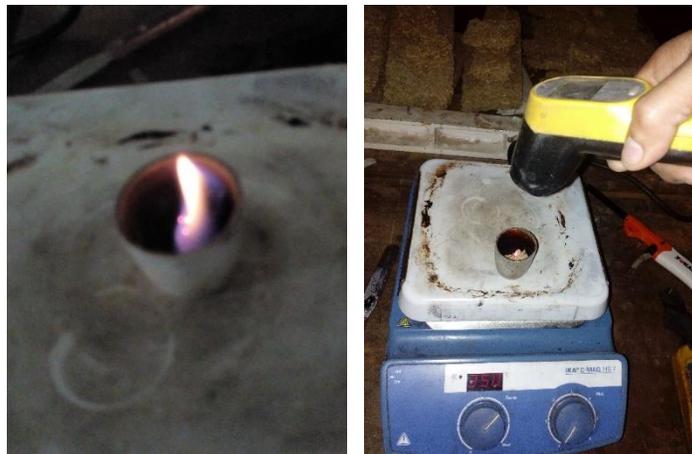
Continuación apéndice 9.

Figura 22. **Ensayo de Porcentaje de Humedad**



Fuente: elaboración propia, taller de Sección de Tecnología de la Madera. CII/USAC.

Figura 23. **Ensayo de Punto de Ignición**



Fuente: elaboración propia, taller de Sección de Tecnología de la Madera. CII/USAC

Continuación apéndice 9.

Figura 24. **Ensayo de Absorción de agua**



Fuente: elaboración propia, taller de Sección de Tecnología de la Madera. CII/USAC.

Figura 25. **Ensayo de Dureza**



Fuente: elaboración propia, taller de Sección de Tecnología de la Madera. CII/USAC.

Continuación apéndice 9.

Figura 26. **Ensayo de Tensión**



Fuente: elaboración propia, taller de Sección de Tecnología de la Madera. CII/USAC.