



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

**CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE TRES ESPECIES DE BAMBÚ APTAS PARA  
LA CONSTRUCCIÓN EN GUATEMALA**

**Norma Elizabeth Calo Rosales**

Asesorada por el Ing. Fredy Alexander Contreras Castañaza

Guatemala, enero de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE TRES ESPECIES DE BAMBÚ  
APTAS PARA LA CONSTRUCCIÓN EN GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**NORMA ELIZABETH CALO ROSALES**

ASESORADA POR EL ING. FREDY ALEXANDER CONTRERAS CASTAÑAZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA CIVIL**

GUATEMALA, ENERO DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
EXAMINADOR	Ing. Alan Geovani Cosillo Pinto
EXAMINADOR	Ing. Luis Estuardo Saravia Ramírez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **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:

### **CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE TRES ESPECIES DE BAMBÚ APTAS PARA LA CONSTRUCCIÓN EN GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 3 de mayo de 2016.

**Norma Elizabeth Calo Rosales**

Guatemala, 27 de Septiembre de 2017



Ingeniero

José Gabriel Ordoñez Morales

Jefe de Área de Materiales de Construcción

Escuela de Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Ordoñez

Reciba un cordial saludo. Por este medio le informo que después de analizar, revisar y corregir el trabajo de graduación titulado: **“CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE TRES ESPECIES DE BAMBÚ APTAS PARA LA CONSTRUCCIÓN EN GUATEMALA”**, desarrollado por la estudiante universitaria Norma Elizabeth Calo Rosales, quien se identifica con carné No. 201122830, manifiesto que en mi calidad de asesor, me permito recomendar su aprobación y que continúen los trámites respectivos.

Atentamente:

Ing. Fredy Alexander Contreras Castañaza

Asesor.

Fredy Alexander Contreras Castañaza  
-Ingeniero Civil- Cel: 10754



**USAC**  
**TRICENTENARIA**  
 Universidad de San Carlos de Guatemala  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



Guatemala,  
 27 de octubre de 2017

Ingeniero  
 Hugo Leonel Montenegro Franco  
 Director Escuela Ingeniería Civil  
 Facultad de Ingeniería  
 Universidad de San Carlos


Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE TRES ESPECIES DE BAMBÚ APTAS PARA LA CONSTRUCCIÓN EN GUATEMALA** desarrollado por la estudiante de Ingeniería Civil Norma Elizabeth Calo Rosales quien contó con la asesoría del Ing. Fredy Alexander Contreras Castañaza

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

  
 Ing. Civil José Gabriel Ordóñez Morales  
 Coordinador del Área de Materiales y  
 Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA  
 AREA DE MATERIALES Y  
 CONSTRUCCIONES CIVILES

**USAC**

/mrrm.



*Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua*

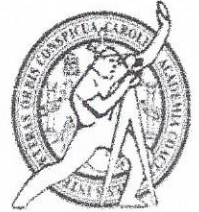




**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Fredy Alexander Contreras Castañaza y Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales al trabajo de graduación de la estudiante Norma Elizabeth Calo Rosales **CHARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE TRES ESPECIES DE BAMBÚ APTAS PARA LA CONSTRUCCIÓN EN GUATEMALA** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, enero 2018

/mmm.



*Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua*



El Decano 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 Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE TRES ESPECIES DE BAMBÚ APTAS PARA LA CONSTRUCCIÓN EN GUATEMALA**, presentado por la estudiante universitaria: **Norma Elizabeth Calo Rosales**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, enero de 2018

/gdech







**Mi familia en general**

Tíos, abuelos y primos por ser parte de mi vida, por creer en mí y motivarme a seguir y terminar mi carrera.

**Mis amigos**

Por brindarme su amistad y cariño sincero. Por ayudarme a superar cada uno de los obstáculos que se me han presentado a lo largo de mi vida.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

Por darme la oportunidad de ingresar y pertenecer a ella.

**Facultad de Ingeniería**

Por formarme académicamente como profesional.

**Mis amigos de la  
Facultad**

Luisa Jiménez, Milca Espinoza, Robin Maldonado, José Ventura, Gabriela Marroquín, Héctor Santisteban, Karen Herrera, Nery Moreno, Luis Padilla y a todos los compañeros que no nombré, por su apoyo y por compartir conmigo momentos valiosos durante la carrera.

**Ingrid Suriano**

Por toda su ayuda incondicional en la realización del presente trabajo y su valiosa amistad a lo largo nuestra formación profesional.

**Mi asesor**

Ing. Fredy Contreras por su valiosa y desinteresada colaboración en la asesoría de este trabajo.

**Sección de Tecnología  
de la Madera, CII, Usac**

A todo el personal por darme todo su apoyo principalmente a Jesiel Enríquez, por su ayuda en la realización de cada una de las probetas y los distintos ensayos.

**Sección de Metales, CII,  
Usac**

Por su importante colaboración en la realización de los ensayos mecánicos.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XVII
GLOSARIO .....	XIX
RESUMEN.....	XXIII
OBJETIVOS.....	XXV
INTRODUCCIÓN .....	XXVII
1. ASPECTOS GENERALES DEL BAMBÚ .....	1
1.1. Conceptos básicos .....	1
1.1.1. Clasificación taxonómica .....	2
1.1.2. Condiciones de cultivo .....	5
1.1.3. Corte.....	6
1.1.4. Secado y almacenamiento .....	7
1.1.5. Tipos de tratamiento preventivo.....	9
1.2. Descripción y morfología de las especies por utilizar .....	15
1.2.1. <i>Dendrocalamus asper</i> .....	19
1.2.2. <i>Guadua angustifolia</i> .....	21
1.2.3. <i>Gigantochloa verticillata willdenow</i> .....	23
1.3. Regiones disponibles de las especies estudiadas en Guatemala.....	24
2. UTILIZACIÓN DEL BAMBÚ PARA LA CONSTRUCCIÓN EN GUATEMALA .....	27
2.1. Antecedentes.....	27



2.1.1.	Estudios que se han hecho sobre las características físicas y propiedades mecánicas del bambú en Guatemala .....	31
2.2.	Situación actual del bambú como material de construcción en Guatemala.....	36
2.3.	Entidades gubernamentales e instituciones públicas y privadas que promueven el bambú en Guatemala.....	38
2.3.1.	Cantidad de hectáreas cultivadas de bambú.....	40
2.4.	Especies apropiadas para la construcción .....	40
2.4.1.	Niveles de consumo .....	41
2.5.	Manejo correcto del bambú.....	42
2.6.	Condiciones de uso.....	43
2.7.	Ejemplos de construcciones con bambú en Guatemala.....	48
2.7.1.	Hotel y playa <i>Sand Bay</i> en Puerto Barrios .....	49
2.7.2.	Hotel y restaurante Bambú en Santiago Atitlán.....	49
2.7.3.	<i>Ram Tzul</i> .....	50
2.7.4.	<i>Tortugal River Lodge</i> .....	51
2.7.5.	<i>Pacific Pearls Lodge</i> .....	52
2.7.6.	Centro educativo del bambú, en Escuintla .....	52
2.7.7.	Escuela del bambú en Santa Rosa .....	53
2.7.8.	Proyecto habitacional social de seiscientas casas en San Marcos.....	54
3.	CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DEL BAMBÚ APTO PARA LA CONSTRUCCIÓN.....	55
3.1.	Definición de las características físicas.....	55
3.1.1.	Contenido de humedad .....	55
3.1.2.	Contracción .....	55
3.1.3.	Densidad seca.....	56

3.1.4.	Densidad húmeda.....	56
3.1.5.	Dureza .....	56
3.1.6.	Absorción.....	57
3.1.7.	Peso específico seco .....	57
3.1.8.	Peso específico húmedo .....	57
3.2.	Definición de propiedades mecánicas .....	57
3.2.1.	Resistencia a tensión paralela a la fibra .....	58
3.2.2.	Resistencia a tensión perpendicular a la fibra .....	58
3.2.3.	Resistencia a compresión paralela a la fibra .....	59
3.2.4.	Resistencia a corte .....	59
3.2.5.	Resistencia a flexión.....	60
4.	METODOLOGÍA DE ENSAYO.....	61
4.1.	Muestreo.....	61
4.1.1.	Preparación de material.....	61
4.2.	Métodos de ensayo .....	64
4.2.1.	<i>Determination of physical and mechanical properties of bamboo INBAR (ISO 22157) .....</i>	64
4.2.2.	<i>Laboratory Manual on testing Methods for determination of physical and mechanical properties INBAR (ISO/TC 165 N315).....</i>	65
4.2.3.	Norma ASTM D-143 .....	66
4.3.	Procedimientos de ensayos para determinar características físicas .....	66
4.3.1.	Contenido de humedad .....	66
4.3.2.	Ensayos complementarios de características físicas según norma ASTM D-143.....	69
4.3.2.1.	Contracción.....	69
4.3.2.2.	Densidad seca .....	70

4.3.2.3.	Densidad húmeda .....	72
4.3.2.4.	Dureza.....	72
4.3.2.5.	Absorción .....	74
4.3.2.6.	Peso específico seco .....	77
4.3.2.7.	Peso específico húmedo .....	78
4.4.	Procedimientos de ensayos y equipo mecánico para determinar propiedades mecánicas .....	78
4.4.1.	Ensayo para la resistencia a tensión paralela a la fibra .....	78
4.4.2.	Ensayo para la resistencia a tensión perpendicular a la fibra.....	81
4.4.3.	Ensayo para la resistencia a compresión paralela a la fibra.....	84
4.4.3.1.	Con un nudo.....	88
4.4.3.2.	Con dos nudos .....	88
4.4.3.3.	Sin nudo .....	89
4.4.4.	Ensayo para la resistencia a corte paralelo a la fibra .....	90
4.4.5.	Ensayo para la resistencia a flexión .....	93
5.	RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO.....	99
5.1.	Cálculos de las características físicas de cada una de las especies estudiadas.....	99
5.1.1.	Contenido de humedad .....	99
5.1.2.	Contracción .....	104
5.1.3.	Densidad seca.....	106
5.1.4.	Densidad húmeda .....	108
5.1.5.	Dureza.....	110
5.1.6.	Absorción .....	112

5.1.7.	Peso específico seco.....	114
5.1.8.	Peso específico húmedo .....	116
5.2.	Cálculos de esfuerzos de propiedades mecánicas de cada una de las especies estudiadas.....	118
5.2.1.	Esfuerzo último de tensión paralela a la fibra .....	118
5.2.2.	Esfuerzo máximo de compresión paralela a la fibra.....	121
5.2.2.1.	Con un nudo .....	121
5.2.2.2.	Sin nudo .....	123
5.2.2.3.	Con dos nudos.....	125
5.2.3.	Modulo de elasticidad (E) .....	127
5.2.4.	Módulo de ruptura.....	131
5.2.5.	Flecha máxima .....	133
5.2.6.	Esfuerzo máximo de corte paralelo a la fibra.....	135
5.3.	Tablas de resultados .....	139
5.4.	Análisis estadístico inferencial.....	145
5.5.	Comparación de las características entre las tres especies utilizadas.....	149
5.6.	Análisis e interpretación de resultados .....	150
5.6.1.	Análisis de características físicas .....	150
5.6.2.	Análisis de las propiedades mecánicas .....	160
	CONCLUSIONES .....	175
	RECOMENDACIONES.....	179
	BIBLIOGRAFÍA.....	181
	APÉNDICES .....	185





## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Clasificación taxonómica de la especie <i>G. Angustifolia</i> .....	3
2.	Corte de bambú en luna menguante .....	6
3.	Secado natural al aire libre.....	7
4.	Secado a fuego abierto y fuego directo en posición vertical .....	8
5.	Método de preservación por remojo.....	10
6.	Método por ahumado .....	11
7.	Perforaciones del bambú para mejorar la penetración del preservador .....	12
8.	Tratamiento preservador del bambú con el método de <i>boucherie</i> .....	13
9.	Preservación por los extremos mediante absorción de las hojas.....	14
10.	Estructura del bambú .....	15
11.	Rizomas paquimorfos y leptomorfos .....	16
12.	magen de la especie <i>D. Asper</i> .....	20
13.	Imagen de la especie <i>G. Angustifolia</i> .....	21
14.	Hoja caulinar triangular y renuevo de la <i>G. Angustifolia</i> .....	22
15.	Imagen de la especie <i>G. Verticillata W.</i> .....	23
16.	Mapa de precipitación promedio anual del periodo de 1960 a 2013 ....	25
17.	Pintura de pieza del clásico tardío .....	27
18.	Deformación en el culmo.....	45
19.	Perforaciones .....	46
20.	Instalaciones hotel <i>Sand Bay</i> .....	49
21.	Imágenes del hotel y restaurante Bambú.....	50
22.	Restaurante construido con bambú.....	50

23.	Habitaciones construidas con bambú .....	51
24.	Muebles y techo de bambú .....	52
25.	Centro educativo del bambú .....	53
26.	Construcción de la escuela del bambú .....	53
27.	Proyecto habitacional en San Marcos.....	54
28.	Material en el lugar de secado .....	62
29.	Número de especímenes por ensayo .....	63
30.	Probetas de ensayo para contenido de humedad .....	67
31.	Equipo para contenido de humedad .....	67
32.	Medición de los especímenes.....	71
33.	Aplicación de carga en la prueba de dureza .....	73
34.	Diferentes tipos de falla en las probetas de dureza .....	74
35.	Probetas de ensayo de la especie <i>G. Angustifolia</i> para el ensayo de absorción .....	75
36.	Probetas totalmente saturados .....	76
37.	Acomodamiento de las probetas dentro del desecador .....	76
38.	Especímenes de ensayo para el ensayo de tensión.....	79
39.	Acomodamiento de la probeta dentro de la máquina de ensayos .....	80
40.	Probetas para el ensayo de resistencia a tensión perpendicular a la fibra.....	81
41.	Dispositivos de carga.....	82
42.	Acomodamiento del sistema dentro de la máquina de ensayos .....	83
43.	Falla por corte .....	83
44.	Medición del diámetro externo de las probetas. ....	85
45.	Indicador de carga .....	86
46.	Colocación del espécimen en la maquina universal .....	87
47.	Especímenes con un nudo de la especie <i>G. Angustifolia</i> .....	88
48.	Falla por aplastamiento y corte de probetas con dos nudos.....	89
49.	Fallas en las probetas después de la aplicación de carga.....	89

50.	Dispositivo para ensayo de corte paralelo a la fibra .....	90
51.	Probetas para ensayo con nudo y sin nudo .....	91
52.	Falla en la probeta de ensayo de corte .....	92
53.	Lados por tomar en cuenta para el área paralelo al corte .....	93
54.	Dispositivos de apoyo y de carga.....	94
55.	Sistema para el ensayo de flexión .....	95
56.	Deformación en probeta del ensayo de flexión .....	96
57.	Fallas en las probetas de tensión paralela a la fibra .....	118
58.	Diagrama de esfuerzo frente a deformación de la especie <i>D. Asper</i> .	129
59.	Diagrama de esfuerzo frente a deformación de la especie <i>G. Angustifolia</i> .....	130
60.	Diagrama de esfuerzo frente a deformación de la especie <i>G. Verticillata</i> .....	130
61.	Diagrama de comparación de resultados del ensayo de contenido de humedad verde .....	151
62.	Diagrama de comparación de resultados del ensayo de contenido de humedad seco.....	152
63.	Diagrama de comparación de resultados del ensayo de peso específico verde .....	153
64.	Diagrama de comparación de resultados del ensayo de peso específico seco .....	154
65.	Diagrama de comparación de resultados del ensayo de densidad verde.....	155
66.	Diagrama de comparación de resultados del ensayo de densidad seco.....	156
67.	Diagrama de comparación de resultados del ensayo de contracción volumétrica.....	157
68.	Diagrama de comparación de resultados del ensayo de absorción ...	158
69.	Diagrama de comparación de resultados del ensayo de dureza.....	159

70.	Diagrama de comparación de resultados del ensayo de tensión perpendicular a la fibra .....	161
71.	Diagrama de comparación de resultados del ensayo de compresión con un nudo .....	162
72.	Diagrama de comparación de resultados del ensayo de compresión sin nudo .....	163
73.	Diagrama de comparación de resultados del ensayo de compresión con dos nudos .....	164
74.	Diagrama de comparación de resultados del ensayo de corte paralelo a la fibra sin nudo.....	165
75.	Diagrama de comparación de resultados del ensayo de corte paralelo a la fibra con nudo.....	166
76.	Diagrama de comparación de resultados del módulo de elasticidad ..	167
77.	Diagrama de comparación de resultados del módulo de ruptura.....	168
78.	Diagrama de comparación de resultados de flecha máxima .....	169
79.	Diagrama de diferencia significativa entre los resultados de los ensayos de las características físicas de las tres especies .....	170
80.	Diagrama de diferencia significativa entre los resultados de los ensayos de las propiedades mecánicas de las tres especies.....	172

## TABLAS

I.	Taxonomía del bambú .....	2
II.	Clasificación taxonómica de la especie <i>D. Asper</i> .....	4
III.	Clasificación taxonómica de la especie <i>G. Verticillata</i> .....	5
IV.	Esfuerzos admisibles.....	48
V.	Modulo de elasticidad .....	48
VI.	Resultados del ensayo de contenido de humedad en estado verde de la especie <i>D. Asper</i> .....	100

VII.	Resultados del ensayo de contenido de humedad en estado verde de la especie <i>G. Angustifolia</i> .....	101
VIII.	Resultados del ensayo de contenido de humedad en estado verde de la especie <i>G. Verticillata</i> .....	101
IX.	Resultados del ensayo de contenido de humedad en estado seco de la especie <i>D. Asper</i> .....	102
X.	Resultados del ensayo de contenido de humedad en estado seco de la especie <i>G. Angustifolia</i> .....	103
XI.	Resultados del ensayo de contenido de humedad en estado verde de la especie <i>G. Verticillata</i> .....	103
XII.	Resultados del ensayo de porcentaje de contracción de la especie <i>D. Asper</i> .....	104
XIII.	Resultados del ensayo de porcentaje de contracción de la especie <i>G. Angustifolia</i> .....	105
XIV.	Resultados del ensayo de porcentaje de contracción de la especie <i>G. Verticillata</i> .....	105
XV.	Resultados del ensayo de densidad en estado seco de la especie <i>D. Asper</i> .....	106
XVI.	Resultados del ensayo de densidad en estado seco de la especie <i>G. Angustifolia</i> .....	107
XVII.	Resultados del ensayo de densidad en estado seco de la especie <i>G. Verticillata</i> .....	107
XVIII.	Resultados del ensayo de densidad en estado verde de la especie <i>D. Asper</i> .....	108
XIX.	Resultados del ensayo de densidad en estado verde de la especie <i>G. Angustifolia</i> .....	109
XX.	Resultados del ensayo de densidad en estado verde de la especie <i>G. Verticillata</i> .....	109
XXI.	Resultados del ensayo de dureza de la especie <i>D. Asper</i> .....	110



XXII.	Resultados del ensayo de dureza de la especie <i>G. Angustifolia</i> .....	111
XXIII.	Resultados del ensayo de dureza de la especie <i>G. Verticillata</i> .....	111
XXIV.	Resultados del ensayo de porcentaje de absorción de la especie <i>D. Asper</i> .....	112
XXV.	Resultados del ensayo de porcentaje de absorción de la especie <i>G. Angustifolia</i> .....	113
XXVI.	Resultados del ensayo de porcentaje de absorción de la especie <i>G. Verticillata</i> .....	113
XXVII.	Resultados del ensayo de peso específico seco de la especie <i>D. Asper</i> .....	114
XXVIII.	Resultados del ensayo de peso específico seco de la especie <i>G. Angustifolia</i> .....	115
XXIX.	Resultados del ensayo de peso específico seco de la especie <i>G. Verticillata</i> .....	115
XXX.	Resultados del ensayo de peso específico verde de la especie <i>D. Asper</i> .....	116
XXXI.	Resultados del ensayo de peso específico verde de la especie <i>G. Angustifolia</i> .....	117
XXXII.	Resultados del ensayo de peso específico verde de la especie <i>G. Verticillata</i> .....	117
XXXIII.	perpendicular a la fibra de la especie <i>D. Asper</i> .....	119
XXXIV.	Datos y resultados del ensayo de tensión perpendicular a la fibra de la especie <i>G. Angustifolia</i> .....	120
XXXV.	Datos y resultados del ensayo de tensión perpendicular a la fibra de la especie <i>G. Verticillata</i> .....	120
XXXVI.	Datos y resultados del ensayo de compresión paralela a la fibra con un nudo de la especie <i>D. Asper</i> .....	121
XXXVII.	Datos y resultados del ensayo de compresión paralela a la fibra con un nudo de la especie <i>G. Angustifolia</i> .....	122

XXXVIII.	Datos y resultados del ensayo de compresión paralela a la fibra con un nudo de la especie <i>G. Verticillata</i> .....	122
XXXIX.	Datos y resultados del ensayo de compresión paralela a la fibra sin nudos de la especie <i>D. Asper</i> .....	123
XL.	Datos y resultados del ensayo de compresión paralela a la fibra sin nudos de la especie <i>G. Angustifolia</i> .....	124
XLI.	Datos y resultados del ensayo de compresión paralela a la fibra sin nudos de la especie <i>G. Verticillata</i> .....	124
XLII.	Datos y resultados del ensayo de compresión paralela a la fibra con dos nudos de la especie <i>D. Asper</i> .....	125
XLIII.	Datos y resultados del ensayo de compresión paralela a la fibra con dos nudos de la especie <i>G. Angustifolia</i> .....	126
XLIV.	Datos y resultados del ensayo de compresión paralela a la fibra con dos nudos de la especie <i>G. Verticillata</i> .....	126
XLV.	Deformación unitaria, esfuerzo y módulo de elasticidad de la especie <i>D. Asper</i> .....	127
XLVI.	Deformación unitaria, esfuerzo y módulo de elasticidad de la especie <i>G. Angustifolia</i> .....	128
XLVII.	Deformación unitaria, esfuerzo y módulo de elasticidad de la especie <i>G. Verticillata</i> .....	128
XLVIII.	Datos y resultados del módulo de ruptura de la especie <i>D. Asper</i> .....	131
XLIX.	Datos y resultados del módulo de ruptura de la especie <i>G. Angustifolia</i> .....	132
L.	Datos y resultados del módulo de ruptura de la especie <i>G. Verticillata</i> .....	132
LI.	Datos y resultados de la deformación máxima de la especie <i>D. Asper</i> .....	133
LII.	Datos y resultados de la deformación máxima de la especie <i>G. Angustifolia</i> .....	134

LIII.	Datos y resultados de la deformación máxima de la especie <i>G. Verticillata</i> .....	134
LIV.	Datos y resultados del ensayo de corte paralelo a la fibra sin nudo de la especie <i>D. Asper</i> .....	135
LV.	Datos y resultados del ensayo de corte paralelo a la fibra sin nudo de la especie <i>G. Angustifolia</i> .....	136
LVI.	Datos y resultados del ensayo de corte paralelo a la fibra sin nudo de la especie <i>G. Verticillata</i> .....	136
LVII.	Datos y resultados del ensayo de corte paralelo a la fibra con nudo de la especie <i>D. Asper</i> .....	137
LVIII.	Datos y resultados del ensayo de corte paralelo a la fibra con nudo de la especie <i>G. Angustifolia</i> .....	138
LIX.	Datos y resultados del ensayo de corte paralelo a la fibra con nudo de la especie <i>G. Verticillata</i> .....	138
LX.	Resultados de los ensayos de las características físicas de la especie <i>D. Asper</i> .....	139
LXI.	Resultados de los ensayos de las características físicas de la especie <i>G. Angustifolia</i> .....	140
LXII.	Resultados de los ensayos de las características físicas de la especie <i>G. Verticillata</i> .....	141
LXIII.	Resultados de los ensayos de las propiedades mecánicas de la especie <i>D. Asper</i> .....	142
LXIV.	Resultados de los ensayos de las propiedades mecánicas de la especie <i>G. Angustifolia</i> .....	143
LXV.	Resultados de los ensayos de las propiedades mecánicas de la especie <i>G. Verticillata</i> .....	144
LXVI.	Resultados del análisis estadístico de los ensayos de las características físicas y propiedades mecánicas de la especie <i>D. Asper</i> .....	145

LXVII.	Resultados del análisis estadístico de los ensayos de las características físicas y propiedades mecánicas de la especie <i>G. Angustifolia</i> .....	146
LXVIII.	Resultados del análisis estadístico de los ensayos de las características físicas y propiedades mecánicas de la especie <i>G. Verticillata</i> 147	
LXIX.	Resultados del análisis estadístico con mediana .....	148
LXX.	Resumen de los resultados de los ensayos realizados a las tres especies .....	149



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Área
b	Base
P	Carga
cm	Centímetros
Cm <sup>4</sup>	Centímetros a la cuarta
Cm <sup>2</sup>	Centímetros cuadrados
Cm <sup>3</sup>	Centímetros cúbicos
CH	Contenido de humedad
cm/cm	Centímetros sobre centímetros
δ	Deformación
ε	Deformación unitaria
Ø	Diámetro
σ	Esfuerzo
T	Esfuerzo a corte
e	Espesor
t	Espesor
F	Fuerza
°C	Grados Celsius
g	Gramos
g/cm <sup>3</sup>	Gramos sobre centímetros cúbicos
I	Inercia
Kg	Kilogramos
Kg/cm <sup>2</sup>	Kilogramos sobre centímetro cuadrado

<b>Kg/m<sup>3</sup></b>	Kilogramos sobre centímetro cúbico
<b>L</b>	Longitud
<b>Me</b>	Mediana
<b>Mpa</b>	Megapascales
<b>m</b>	Metro
<b>mm</b>	Milímetro
<b>mL</b>	Mililitro
<b>E</b>	Módulo de elasticidad
<b>Mr</b>	Módulo de ruptura
<b>S</b>	Módulo de sección
<b>M</b>	Momento
<b>N</b>	Newton
<b>N/m<sup>3</sup></b>	Newton sobre metro cúbico
<b>π</b>	Pi
<b>P.S.F</b>	Punto de saturación de la fibra
<b>%</b>	Porcentaje
<b>M</b>	Momento
<b>s</b>	Segundos
<b>Σ</b>	Sumatoria

## GLOSARIO

<b>Ácido bórico</b>	Compuesto químico, ligeramente ácido. Es usado como antiséptico, insecticida, retardante de la llama y precursor de otros compuestos químicos.
<b>Almidón</b>	Elemento que constituye la principal reserva energética de los vegetales.
<b>Apical</b>	Extremo superior.
<b>Caulinar</b>	Compuesto por rizomas y por tallos. Los rizomas, que corresponden a tallos modificados que nacen alternadamente desde subnodos ubicados en los tallos.
<b>Culmo</b>	Tallo de las gramíneas ( <i>Poaceae</i> ) toma el nombre de caña. Se divide claramente en nudos y entrenudos. Los nudos son muy próximos entre sí cuando están próximos a la base y están distanciados a medida que se aleja de la tierra.
<b>Dicotómicas</b>	Método de clasificación en el que el área de un objeto se divide, desmembra o disecta en dos partes exactamente iguales.
<b>Envés</b>	Cara inferior de la hoja, opuesta al haz.



<b>Espiguilla</b>	Inflorescencia elemental de las gramíneas, constituida por un eje muy breve llamado raquilla.
<b>Floración gregaria</b>	Floración con ciclos de 15, 30, 60 y hasta 120 años.
<b>Formón</b>	Herramienta manual de corte libre utilizada en carpintería para realizar cortes, muescas, rebajes y trabajos artesanos artísticos sobre la madera.
<b>Gramínea</b>	Familia a la que pertenece el bambú. Son plantas Monocotiledónea de tallo cilíndrico, nudoso y generalmente hueco con hojas alternas que abrazan el tallo.
<b>Haz</b>	Cara superior de la hoja.
<b>Herbáceo</b>	Que tiene naturaleza o características de las hierbas.
<b>Inferencia</b>	Puede definirse como aquellos métodos que hacen posible la estimación de características de una población basándose solo en los resultados de una muestra, y con ella sacar conclusiones.
<b>Inflorescencia</b>	Conjunto de flores que nacen agrupadas de un mismo tallo.
<b>Líquenes</b>	Grupo de organismos constituidos por un alga y un hongo que viven en asociación simbiótica.

<b>Morfología</b>	Parte de la biología que trata de la forma de los seres orgánicos
<b>Nudo</b>	Parte del bambú en forma de tabiques transversales rígidos concentrados dentro de su superficie dispuesta como diafragmas.
<b>Rizomas</b>	Tallo subterráneo con varias yemas que crecen de forma horizontal emitiendo raíces y brotes herbáceos de sus nudos.
<b>Savia</b>	Fluido o líquido transportado por los tejidos de conducción de las plantas, del cual toman las células las sustancias para su nutrición.
<b>Sazonamiento</b>	Punto de madurez de una planta para su cosecha.
<b>Taxonomía</b>	Ciencia que trata de los principios, métodos y fines de clasificación generalmente científica, se aplica dentro de la biología para la ordenación jerarquizada.
<b>Vaina</b>	Ensanchamiento de la hoja que envuelve el tallo.
<b>Xilófagos</b>	Organismos que se alimentan de la celulosa y lignina de la madera.



## RESUMEN

En este trabajo de graduación se hace una recopilación bibliográfica de los conceptos básicos del bambú, antecedentes de estudios realizados, especies apropiadas para la construcción, regiones donde se encuentran disponibles, etcétera. La información se ha obtenido de diferentes fuentes y manuales de la Misión Técnica Agrícola de la república de China y del Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola (ICTA), quienes proporcionaron el material para llevar a cabo esta investigación.

Se describe cada una de las características físicas y propiedades mecánicas que debe cumplir el bambú para ser utilizado como elemento constructivo, también los procedimientos de ensayos para determinar dichas características y propiedades de las tres especies de bambú. Estas se llevaron a cabo en el Laboratorio de Tecnología de la Madera, Sección de Metales y Sección de Estructuras de la Facultad de Ingeniería, estas fueron las siguientes:

- Contenido de humedad verde y seco
- Peso específico verde y seco
- Densidad verde y seco
- Contracción volumétrica
- Absorción
- Dureza
- Tensión perpendicular a la fibra
- Compresión con nudo, sin nudo y con dos nudos
- Corte sin nudo y con nudo
- Flexión

Con el fin de analizar el comportamiento y la diferencia que va presentando el material conforme a su altura, se cortan cuatro probetas para cada sección del culmo: base, media y apical, sumando doce probetas por especie, y 36 probetas para cada uno de los ensayos, siendo un total de 576 probetas y mismo número de ensayos. Con los datos obtenidos de cada uno de los ensayos enlistados se realiza un análisis estadístico, para evaluar los resultados, presentando tablas de resúmenes con la información de cada una de las especies.

Por último, se realizan diagramas de comparación de resultados entre las especies para cada uno de los ensayos, para verificar la especie predominante en cada prueba, para adquirir la que presente mejores características y llene los requisitos de resistencia según el elemento constructivo en el que se desea utilizar. Así mismo, se realizan pruebas de Tukey para comparar las medias de cada ensayo para verificar si existen diferencias significativas en los resultados.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Realizar una caracterización física y mecánica de tres especies de bambú aptas para la construcción en Guatemala.

### **Específicos**

1. Describir las características y particularidades de las especies de bambú más utilizadas en la construcción.
2. Identificar las regiones donde hay disponibilidad de las especies de bambú estudiadas que demuestran aptitudes para la construcción.
3. Dar a conocer los procedimientos de ensayo y equipo necesario para determinar las características físicas y propiedades mecánicas del bambú.
4. Determinar las características físicas de cada una de las tres especies de bambú aptas para la construcción.
5. Determinar las propiedades mecánicas de cada una de las tres especies de bambú aptas para la construcción.

6. Determinar si existe diferencia significativa entre cada una de las tres especies, determinadas según sus características físicas y propiedades mecánicas y las solicitudes de carga a la que se somete.

## INTRODUCCIÓN

El bambú es una de las plantas más sorprendentes de la naturaleza, por lo todo lo que se obtiene de él: alimento, ropa, papel, artesanías, muebles y material para construcción, en esta ultima resulta ser una buena alternativa al buscar materiales que puedan trabajar conjuntamente con la madera, el metal y otros. Tiene la ventaja de ser económico, de rápido crecimiento a diferencia de la madera que alcanza su desarrollo entre quince y hasta cien años de acuerdo a su especie, el bambú adquiere su máxima resistencia entre cuatro a seis años, lo que lo hace altamente ecológico.

En Guatemala existen aproximadamente diecisiete especies de bambú y se conoce muy poco sobre sus características físicas y propiedades mecánicas, esta falta de información impide que se pueda normalizar su uso en el país. En este trabajo de graduación se pretende aumentar su uso en la construcción, realizando una caracterización física y mecánica de las especies *Dendrocalamus Asper*, *Guadua Angustifolia* y *Gigantochloa Verticillata Willdenow*, para determinar sus aptitudes como elementos constructivos. Se eligieron por su alto consumo y disponibilidad en Guatemala.

Esta caracterización se realiza por medio de pruebas o ensayos, para la cual se elaboraron probetas que fueron ensayadas de acuerdo con las especificaciones de las normas utilizadas para determinar las principales características físicas así como las propiedades mecánicas de cada una de las especie.





# 1. ASPECTOS GENERALES DEL BAMBÚ

## 1.1. Conceptos básicos

El bambú es una planta de aspecto arbóreo, que pertenece a la familia Graminácea y a la subfamilia *Bambusoideae*. De estas se derivan aproximadamente unas 1439 especies y 116 géneros en el mundo. El bambú es conocido por ser una planta que puede ser manejada con facilidad, y de rápido crecimiento. También posee una buena resistencia y mayor durabilidad, es por ello que el uso en la construcción es cada vez mayor por sus grandes beneficios y ventajas que posee.

Es uno de los recursos renovables que posee muchas ventajas sobre la madera, sobretodo en el área de la construcción y artesanía. Posee un crecimiento rápido comparado con un árbol maderable; sus propiedades físico-mecánicas lo califican como una excelente opción. Es conocido como el acero vegetal.

Otra característica importante es que el bambú mitiga la creciente deforestación siendo un sustituto de la madera y, a la vez, un recurso renovable que se auto regenera y recupera las áreas degradadas, siempre y cuando exista una debida planificación. Es un procesador de bióxido de carbono de doce toneladas por hectárea aproximadamente, es mucho más eficiente que la mayoría de árboles de bosques tropicales, además de producir cuatro veces más oxígeno que la mayoría de plantas y mejora el proceso de fijación de nitrógeno en el suelo.

### 1.1.1. Clasificación taxonómica

Se entiende por taxonomía a la ciencia que describe, nombra y clasifica los organismos, utilizando la flor como la unidad básica para la identificación. La clasificación y nomenclatura del bambú es grande, por la cantidad de especies que se han descubierto hasta el momento. En América, la tribu *Bambusodae* reúne bambúes leñosos y corresponden al 87 % de las especies aproximadamente.

Taxonómicamente los bambúes pertenecen a la familia *Poacea* y a la subfamilia *Bambusoideae*. Estas se dividen en dos grandes tribus: Los bambúes *herbáceos* y *Olyrodae* y los bambúes leñosos o *Bambuseae*. La primera tribu en América tiene un total de veinte géneros y unas 130 especies aproximadamente.

Tabla I. Taxonomía del bambú

RANGO	TAXONOMÍA
Reino	<i>Plantae</i>
División	<i>Magnoliophyta</i>
Clase	<i>Liliopsida</i>
Orden	<i>Cyperales</i>
Familia	<i>Poacea/gramínea</i>
Sub-Familia	<i>Bambusoideae</i>
Tribu	<i>Bambuseae</i>

Fuente: LONDOÑO, Ximena. *Distribución, Morfología, taxonomía, silvicultura y usos de los bambúes del nuevo mundo*. <http://www.hof-landlust.de/scb/taller.html>. Consulta: mayo de 2016.

A continuación se presenta la clasificación taxonómica de las tres especies referidas:

Figura 1. **Clasificación taxonómica de la especie *G. Angustifolia***

<b>RANGO</b>	<b>TAXONOMÍA</b>
<b>Reino</b>	Plantae
<b>División</b>	Magnoliophyta
<b>Clase</b>	Lilopsidas/Monocotiledónea
<b>Orden</b>	Cyperales/Glumiflorales
<b>Familia</b>	Gramineae o Ppaceae
<b>Subfamilia</b>	Bambusoidae
<b>Supertribu</b>	Bambusodae
<b>Tribu</b>	Bambuseae
<b>Subtribu</b>	Guaduinae
<b>Género</b>	Guadua
<b>Especie</b>	Angustifolia

Fuente: TENECHE, Gustavo. *Taxonomía*. <http://guaduarybambu.es.tl/Estudio-10.htm>. Consulta: 26 de mayo de 2016.

Tabla II. Clasificación taxonómica de la especie *D. Asper*

RANGO	TAXONOMÍA
Reino	<i>Plantae</i>
División	<i>Magnoliophyta</i>
Clase	<i>Liliopsida</i>
Orden	<i>Cyperales</i>
Familia	<i>Poacea</i>
Sub-familia	<i>Bambusoideae</i>
Tribu	<i>Olyrodae</i>
Género	<i>Dendrocalamus</i>
Especie	<i>Asper Schult, &amp; Schultes. f.</i>
Nombre común	<i>Bambú verde o tarro</i>

Fuente: LONDOÑO, Ximena. *Distribución, morfología, taxonomía, silvicultura y usos de los bambúes del nuevo mundo*. <http://www.hof-landlust.de/scb/taller.html>. Consulta: mayo de 2016.

Tabla III. **Clasificación taxonómica de la especie *G. Verticillata***

RANGO	TAXONOMÍA
<b>Reino</b>	<i>Plantae</i>
<b>División</b>	<i>Spermatofita</i>
<b>Clase</b>	<i>Liliopsida/Monocotiledónea</i>
<b>Orden</b>	<i>Cyperales/Glumiflorales</i>
<b>Familia</b>	<i>Poaceae</i>
<b>Subfamilia</b>	<i>Bambusoideae</i>
<b>Tribu</b>	<i>Bambuseae</i>
<b>Subtribu</b>	<i>Gigantuinae</i>
<b>Género</b>	<i>Gigantochloa</i>
<b>Especie</b>	<i>Verticillata (Willd.) Munro, apus</i>

Fuente: CALDERÓN Cordón, Nilda Lucrecia. *Evaluación del desarrollo de plántulas de bambú a partir de brotes procedentes de yemas primarias y secundarias de las especies Gigantochloa apus y G. verticillata, Patulul, Suchitepéquez. p 2.*

### 1.1.2. **Condiciones de cultivo**

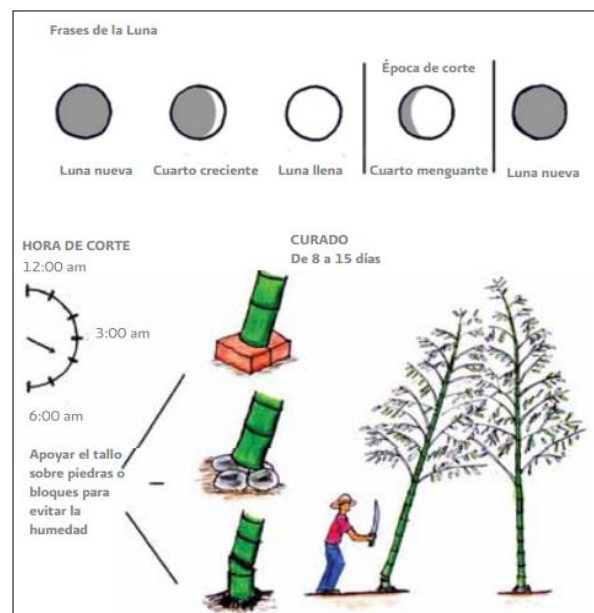
El cultivo del bambú se puede propagar de dos maneras: sexual y asexual. Los métodos dependen del tipo de especie. La propagación del bambú ocurre a través de rizomas, semillas, ramas laterales enterradas. Se propaga de forma sexual, es decir, por semilla. Este proceso es un poco más complicado debido que se pone a germinar en tablones y luego que tenga una altura ideal de unos 10 centímetros se trasplanta a bolsas de polietileno, que después serán trasplantados al campo después de un año.

La preparación del terreno juega un papel muy importante al momento de sembrar el bambú. Existen dos métodos para la preparación que son el de limpieza total y el de fajas paralelas, así mismo una mezcla de ambas que se le conoce como áreas específicas.

### 1.1.3. Corte

Los culmos de bambú deben cortarse por encima del primer nudo del tallo, a nivel del suelo. Se recomienda hacer el corte después de los tres a siete años, según la especie. Así mismo, dejar por lo menos un 25 % de su tallo en pie. Debe cortarse en época seca, en luna en su estado cuarto menguante y por la madrugada para evitar la humedad y concentración de almidón.

Figura 2. Corte de bambú en luna menguante



Fuente: ORDÓÑEZ, Candelaria. et al. *Manual para la construcción sustentable con bambú.* p

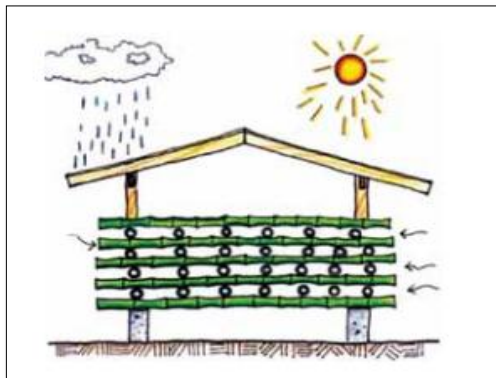
#### 1.1.4. Secado y almacenamiento

El secado y almacenamiento de los tallos de bambú es importante, para que no pierdan sus propiedades físicas y mecánicas. Un tallo que tiene humedad se contrae y se dilata. Se recomienda reducir al máximo el porcentaje de humedad hasta llegar alrededor de un 15 %. Esto hace que los organismos que provocan pudrición y manchas en el tallo desaparezcan o se reduzcan.

- Secado al aire libre

Es el más utilizado porque es el más simple y rentable. Después de haber cortado los tallos del bambú, se deben almacenar las piezas sin quitar las hojas. Debe ser un área cubierta, bien ventilada, la tierra debe estar lo más seca posible. Se deben colocar los tallos de forma horizontal, en capas paralelas o perpendiculares. La primera capa debe estar separada del nivel de piso por lo menos unos 30 centímetros si es posible, para evitar la humedad del suelo.

Figura 3. Secado natural al aire libre



Fuente: ORDOÓÑEZ, Candelaria. et al. *Manual para la construcción sustentable con bambú*. p

25.



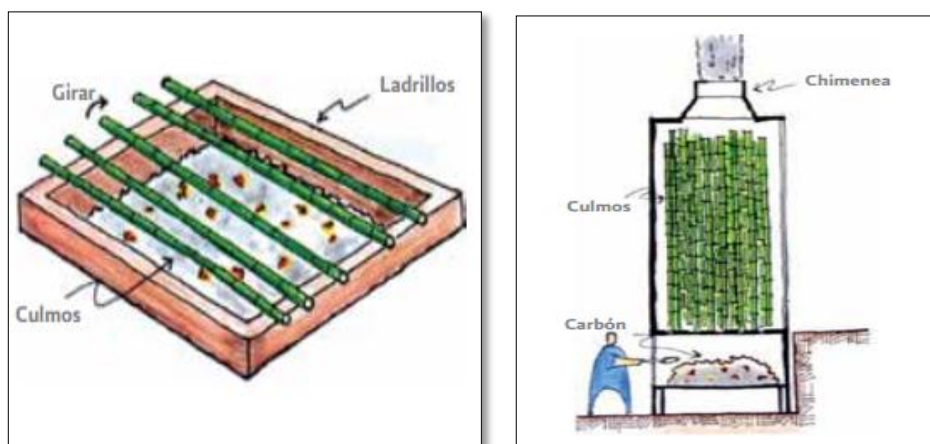
- Secado en estufa

Los culmos se colocan verticalmente en un horno sellado sobre una fuente de calor que puede ser una quema controlada de material o guadua secos, dura alrededor de tres semanas, trabajando día y noche. Al terminar el proceso los culmos pierden entre 50 % y 60 % de su peso inicial.

- Secado al horno

El secado del bambú en fuego, al horno, o de forma artificial, se realiza con cámaras de metal o de ladrillo de concreto, equipadas para tener control en la temperatura, humedad y la velocidad del aire. Por supuesto, el costo para este método es más elevado, pero permite reducir el tiempo de secado, y secar grandes cantidades de tallos de bambú. Sin embargo, puede generar rajaduras debido a la contracción del tallo.

Figura 4. **Secado a fuego abierto y fuego directo en posición vertical**



Fuente: ORDÓÑEZ, Candelaria. et al. *Manual para la construcción sustentable con bambú*. p 26-27.

- Almacenamiento en el interior de una bodega

Las cañas de bambú o partes de construcciones se deben guardar en los interiores de las galerías donde tiene que haber una buena ventilación.

- Almacenaje en agua

Este tipo de almacenaje es por un corto tiempo y consiste en sumergir los culmos de bambú dentro de un río, después de unos días se tiene que trasladar a un lugar definitivo.

#### **1.1.5. Tipos de tratamiento preventivo**

Al igual que muchas plantas, el bambú es invadido por varios organismos como hongos e insectos que atacan sin medida. El bambú que se vaya a utilizar para la construcción debe de tratarse después del corte, de manera que no se deteriore o se pudra, y así prolongar la vida útil de este material. La vida útil del bambú puede llegar hasta los cuarenta años, pero si no se le da un tratamiento preventivo, la duración de este material puede reducirse hasta en una cuarta parte. Algunos tratamientos que se pueden dar a los culmos de bambú son:

- Curado

En el curado, los culmos del bambú deben cortarse en la base y se dejan de una a tres semanas en almacenamiento con sus ramas y hojas. En este tiempo, la cantidad de almidón que está concentrado en el culmo llega a reducirse. Con esto se reduce la cantidad de insectos que perforan el tallo, pero no es eficaz para otros tipos de insectos y hongos.

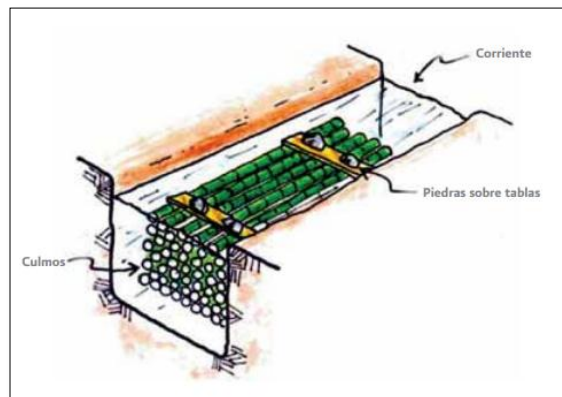
- Encalado

Este procedimiento se recomienda cuando el bambú se utiliza para construcciones ornamentales, debido a que la cal absorbe humedad y reduce el riesgo del ataque de hongos, aunque este compuesto alcalino puede afectar las propiedades del bambú. Consiste en pintar los culmos de bambú con cal apagada. Este método puede prolongar la vida útil del material y, a la vez, reducir la absorción de agua.

- Remojo

En este método los culmos recién cortados, son colocados en corrientes de agua, por ejemplo en ríos o estanques, por cuatro semanas aproximadamente, colocando piedras encima para evitar que floten. Después el bambú se seca a la sombra. Durante el remojo el agua corriente lava el almidón contenido en las paredes del bambú.

Figura 5. **Método de preservación por remojo**



Fuente: ORDÓÑEZ, Candelaria. et al. *Manual para la construcción sustentable con bambú*. p

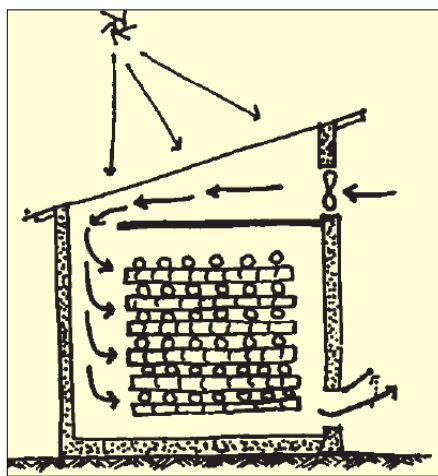
- Inmersión en agua de mar

Este método es muy utilizado en las islas o en las áreas costeras. Los culmos se colocan en el agua salada estancada durante varias semanas. Se deben colocar piedras a los bambúes para mantenerlos sumergidos en el agua. Este método incrementa la durabilidad contra termitas y hongos, pero puede tener efectos negativos sobre el culmo. Por ejemplo, la resistencia puede disminuir por estar mucho tiempo en el mar.

- Ahumado

Este método consiste en almacenar los culmos del bambú en lugares cerrados que estén expuestos al humo. El bambú se torna de un color oscuro, donde algunas substancias tóxicas se encuentran en el interior del culmo y contribuyen a que adquiera de alguna forma más resistencia.

Figura 6. **Método por ahumado**



Fuente: VALDEZ, David. *Manual para el cultivo de bambú experiencias en Guatemala*. p 5.

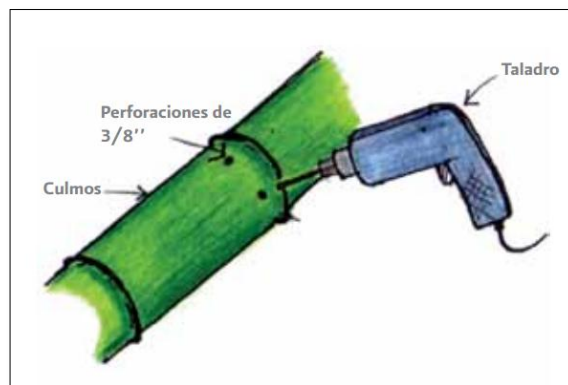
- Métodos químicos

Los métodos químicos son más efectivos que los mencionados anteriormente. El único problema es que no siempre pueden ser aplicables, y el costo se incrementa. Algunos métodos químicos se muestran a continuación:

- Método del tanque abierto:

Este método es muy recomendado por su facilidad, economía y alta efectividad. Los culmos se colocan en tanques con la solución preservadora por varios días y la solución penetra por difusión. Es necesario que los culmos tengan un alto contenido de humedad para lograr la difusión del preservador que generalmente es ácido bórico y bórax disueltos en agua.

Figura 7. **Perforaciones del bambú para mejorar la penetración del preservador**



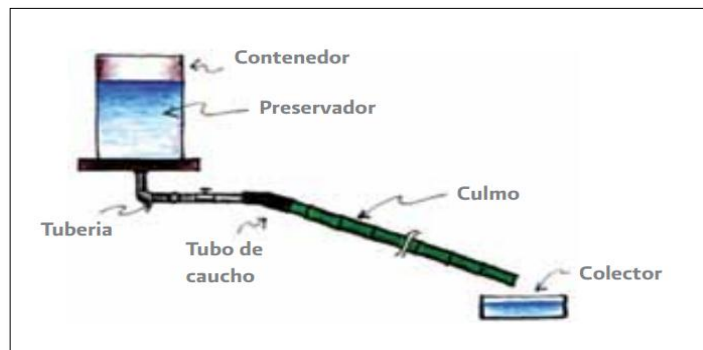
Fuente: ORDÓÑEZ, Candelaria. et al. *Manual para la construcción sustentable con bambú*. p

36.

- Método *boucherie*

Es el más efectivo, pero debe realizarse con bambú fresco o recién cortado. Fue ideado por el M. Auguste Boucherie, patentado en Francia en 1838. Consiste en forzar por gravedad o por presión la penetración del preservando, sustituyendo la sabia dentro del culmo. Se recomienda colocar el tanque en un nivel más alto que el bambú, para que el preservante baje por gravedad.

Figura 8. **Tratamiento preservador del bambú con el método de *boucherie***



Fuente: ORDÓÑEZ, Candelaria. et al. *Manual para la construcción sustentable con bambú*. p 38.

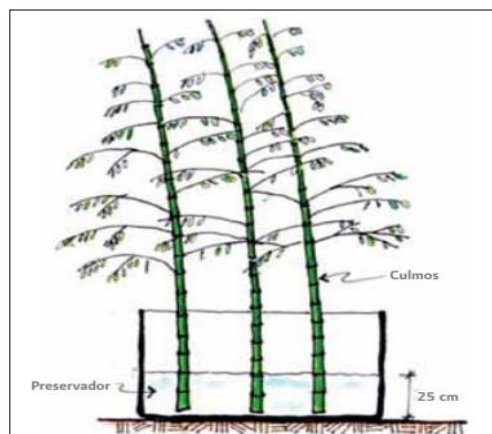
- Método *boucherie* modificado

Consiste en introducir por uno de los extremos del tallo el preservante. La presión ejercida se lleva a cabo por una bomba centrífuga, desplazando la sabia que contiene el tallo. Los líquidos recogidos en la sección de entrada y salida de los tallos se almacenan en otro tanque, para luego ser filtrados y mezclados con solución fresca.

- Tratamiento por los extremos

En este método consiste en colocar los tallos recién cortados, con sus ramas y hojas en tanques con el líquido preservador, como la absorción de las hojas continúa, los preservadores son succionados. Solo es aplicable a bambúes cortos y con contenido de humedad alto.

Figura 9. **Preservación por los extremos mediante absorción de las hojas**



Fuente: ORDÓÑEZ, Candelaria. et al. *Manual para la construcción sustentable con bambú*. p 35.

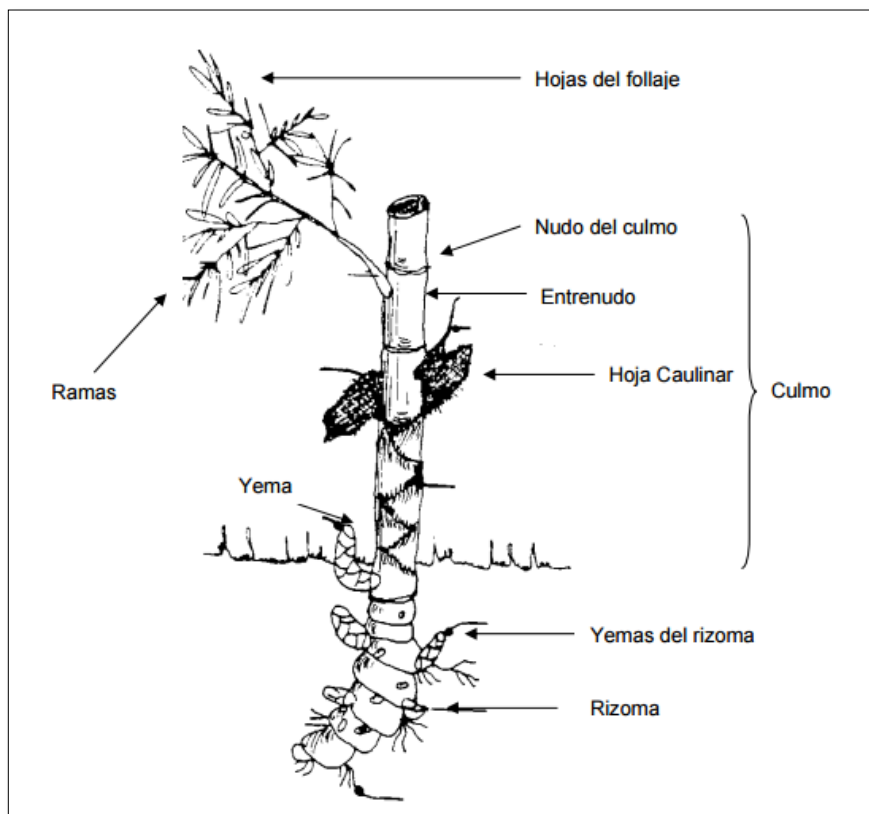
- Tratamiento con presión

Este método es útil respecto de la penetración del preservante, pero necesita instalaciones especiales y costosas, y no es económico para un material de bajo costo como el bambú.

## 1.2. Descripción y morfología de las especies por utilizar

La adaptabilidad de los bambúes contribuye a que exista una distribución geográfica muy amplia y una gran diversidad morfológica. Debido a su naturaleza y a sus floraciones, se ha dado mucha importancia a la estructura morfológica del bambú. Dentro de estos se encuentran: rizoma, culmo, yema, ramas, hojas, follaje, inflorescencia, floración y fruto para su identificación.

Figura 10. Estructura del bambú



Fuente: URRUTIA, Juan Francisco. *Propiedades físico-mecánicas del bambú (estudio preliminar de 6 especies de la finca Chocolá, Suchitepéquez)*. p 45.



- Rizoma

Es la estructura de soporte de la planta. Es fuerte y de una profundidad de más de metro y medio. Esta almacena nutrientes, siendo el sostén de la planta. Existen tres grupos de rizomas: paquimorfo, leptomorfo y afimorfo.

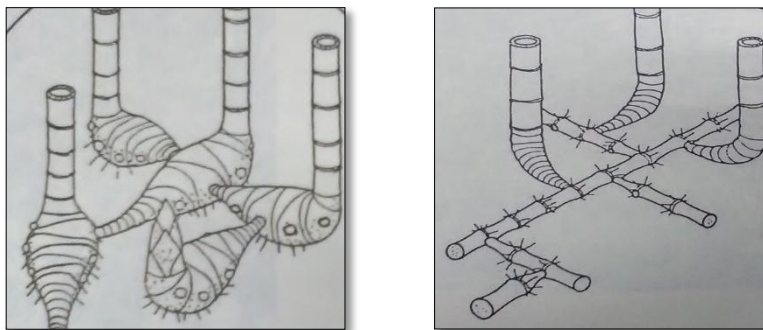
- Grupo paquimorfo:

Se identifica por tener rizomas cortos y gruesos, con nudos asimétricos, largos, sólidos y con yemas laterales en forma de semi-esfera. Los nuevos rizomas crecen horizontalmente en diferentes longitudes.

- Grupo leptomorfo:

Se caracteriza por presentar forma cilíndrica, relativamente recto, con un diámetro menor que el del culmo. Las yemas laterales son solitarias, y se pueden convertir directamente en culmos, y unos pocos en rizomas.

Figura 11. **Rizomas paquimorfos y leptomorfos**



Fuente: URRUTIA, Juan Francisco. *Propiedades físico-mecánicas del bambú (estudio preliminar de 6 especies de la finca Chocolá, Suchitepéquez)*. p 95.

- Grupo anfipodial

Se caracteriza porque en la misma planta se puede presentar una ramificación del rizoma, ya sea del grupo paquimorfo o leptomorfo.

- Culmo

Es la porción más útil de un bambú. Los culmos jóvenes se utilizan sobre todo para la elaboración de canastos, esteras y artesanías. Los maduros se utilizan principalmente en la construcción, pulpa para papel y productos industrializados. Los secos como material de combustión.

- Yema

La yema se encuentra encima de cada línea nodal y en posición dística. Las yemas son importantes dentro de los estudios taxonómicos debido a que ayudan a identificar las especies, secciones y géneros.

- Ramas

Las ramas se originan de la línea nodal, el número de ellas varía dependiendo de la especie de bambú, podrían tener de 1 hasta 100 ramas por nudo, en forma de espinas o abanico, puede tener una rama central dominante.

- Hoja caulinar

Protege el culmo desde el momento en que emerge hasta los primeros meses de crecimiento.

La hoja caulinar nace en cada nudo del culmo, y tiene como función principal de proteger la yema que da origen a las ramas y al follaje.

- Inflorescencia

La inflorescencia hace referencia a la organización de las flores en una planta. Según McClure en 1966, la inflorescencia de los bambúes es un eje o un sistema de ejes que emergen de un eje llamado raquis primario finalizando en una espiguilla.

- Follaje

El follaje es la principal fuente de elaboración de alimento en la planta. Se utiliza como alimento para el ganado o para animales menores. En china utilizan el follaje para extraer pigmentos, elaborar gaseosas, perfumes, etcétera.

- Floración

La floración del bambú puede ser gregaria o esporádica. La floración gregaria significa que todos los miembros de una generación, entran a la etapa reproductiva aproximadamente al mismo tiempo. La longitud del ciclo de floración varía en cada especie, con un rango de fluctuación entre 3-60 años.

- Fruto

En el fruto, la forma y tamaño del embrión, junto con la forma del hilum son muy importantes y sirven para distinguir grupos mayores dentro de las gramíneas. En la mayoría de las especies tiene forma de un grano de trigo o arroz. Los frutos se utilizan como fuente alimenticia.

### 1.2.1. **Dendrocalamus asper**

El origen semántico del nombre *Dendrocalamus asper* proviene del griego; *dendron*: árbol; *calamus*: caña; *asper*: áspero. La especie es nativa de Asia, debido a que allí se localizaron grandes extensiones de este “bambú gigante”, en forma natural.

Es nativa de la India, Birmania y Tailandia, en Guatemala fue introducida y sembrada por primera vez, alrededor de 1987 en el municipio de de Santa Bárbara, Suchitepéquez, en el kilómetro 121 de la ruta al Pacífico, entre los 200 y 600 metros sobre el nivel del mar; para luego ser propagada en varios municipios de la costa sur tales como: San Miguel Panán, Chicacao, San Pablo Jocopilas en Suchitepéquez; así como en Coyuta y Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla, entre otros.

Tiene tallos que pueden alcanzar de 20 a 39 metros de altura y un diámetro de 20 a 30 centímetros. Las paredes del tallo son tipo tubular con un grosor de 0,5 a 2,0 centímetros y su rizoma es de tipo paquimorfo. Este bambú es ideal para la construcción de viviendas, puentes pequeños, cercas, muebles, artesanía, conducción de agua entre otras industrias. Sirve también para hacer nuevos proyectos, como artículos laminados, arte de engomar, artículos comprimidos, revestimiento.

- **Morfología**

Está constituido por un culmo, que se compone de un sistema de ejes vegetativos o tallos segmentados por nudos (anillos a lo largo del tallo), entrenudos, rizoma y raíces que se extienden libre y agresivamente por el subsuelo. Su rizoma es de tipo paquimorfo.

Figura 12. Imagen de la especie *D. Asper*



Fuente: Centro educativo del bambú, Instituto de Ciencia de Tecnología Agrícola (ICTA).

Estos tabiques o nudos le dan una gran rigidez y al mismo tiempo, flexibilidad y resistencia. Brota del suelo con el diámetro máximo y final que tendrá hasta su madurez, desarrolla su longitud completa durante el periodo invernal, luego brotan las ramas y las hojas en un tiempo de seis años, que es el periodo de maduración o sazónamiento, en el que se adquiere las características físico-mecánicas de la madera sólida.

### 1.2.2. **Guadua angustifolia**

Es una especie de bambú leñoso que pertenece a la familia de las gramíneas, que son unas 500 especies en América. Unas veinte especies de estas tienen las mejores propiedades físico-mecánicas. Sobresale dentro del género por sus propiedades físico-mecánicas, así como por el tamaño de sus culmos que logran alcanzar los 30 metros de altura y unos 25 centímetros de diámetro. Tiene una velocidad de crecimiento de 10 centímetros por día, otros autores reportan crecimientos de hasta 21 centímetros por día. Se logra la madurez del culmo entre los cuatro a seis años de edad.

Figura 13. **Imagen de la especie *G. Angustifolia***



Fuente: Centro educativo del bambú, Instituto de Ciencia de Tecnología Agrícola (ICTA).



Ha sido seleccionada como una de las veinte mejores especies de bambúes del mundo ya que su capacidad para absorber energía y admitir una mayor flexión, la convierten en un material ideal para construcciones sismo resistentes, es considerada el tercer bambú más grande del mundo, superada solo por dos especies: *Dendrocalamus giganteus* y *Dendrocalamus sinicus*.<sup>1</sup>

- Morfología

La hoja caulinar tiene forma triangular, con los bordes de la vaina y de la lámina continua. La banda de pelos blancos y cortos en la línea nodal. También posee estomas por el haz y por el envés de la lámina foliar. El rizoma de la *G. angustifolia* es tipo paquimorfo con un patrón de ramificación simpodial, como la mayoría de bambúes que son de origen asiático.

Figura 14. **Hoja caulinar triangular y renuevo de la *G. Angustifolia***



Fuente: Centro educativo del bambú, Instituto de Ciencia de Tecnología Agrícola (ICTA).

---

<sup>1</sup> CORPEI. *Perfil de producto bambú*. p.44.

### 1.2.3. Gigantochloa verticillata willdenow

La especie *G. verticillata* recibió su nombre actual de *William Munro*. Fue introducida en Guatemala en el vivero Santa Adelaida, San Felipe. Se cultiva en lugares con alturas entre 600 y 1 000 metros sobre el nivel del mar.

Es ideal para refuerzos en la construcción y artesanías. Los culmos son verticales pero su punta se inclina hacia los lados, su color es verde cuando son jóvenes de color marrón claro cuando son maduros. Tienen pequeñas cerdas que se desvanecen después de la lampiña, no tienen flor ni frutos. Logra una altura de 25 metros y un diámetro de 10 centímetros. Los entrenudos son largos, las paredes de su tallo es tubular con un grosor de 1 a 2 centímetros. Su rizoma es tipo paquimorfo.

Figura 15. Imagen de la especie *G. Verticillata W.*



Fuente: Centro educativo del bambú, Instituto de Ciencia de Tecnología Agrícola (ICTA).



### 1.3. Regiones disponibles de las especies estudiadas en Guatemala

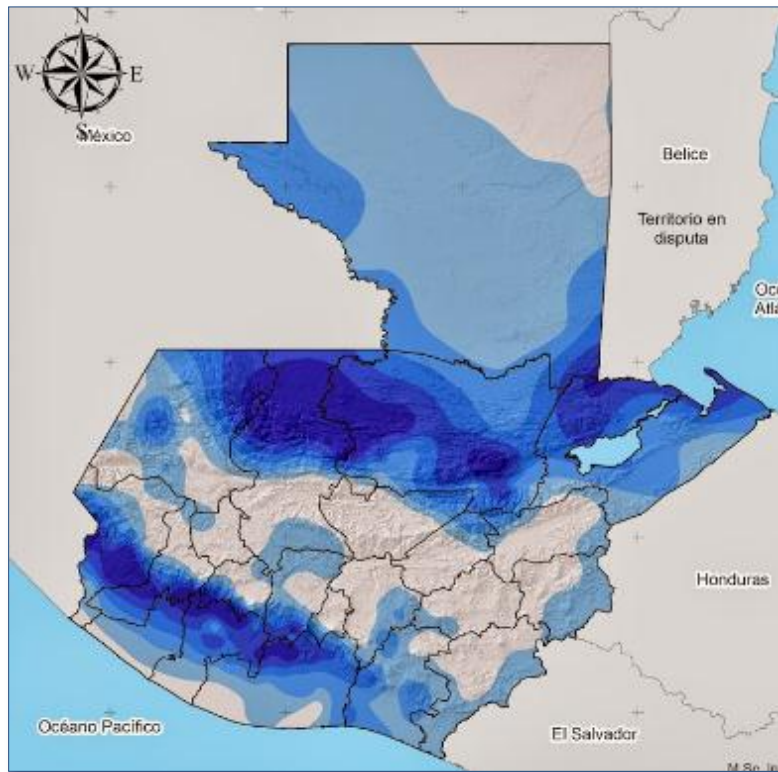
Gran parte del bambú que existe en Guatemala ha sido traído de otros países. La adaptación del bambú al clima varía según la especie y condiciones meteorológicas en la zona, como altitud, precipitación, temperatura y condiciones del suelo. La mayoría de especies que se encuentran en Guatemala están en los departamentos como San Marcos, Suchitepéquez, Retalhuleu y Escuintla, por supuesto, existen especies en los otros departamentos, pero la presencia es menor.

Las especies *D. Asper*, *G. Verticillata* y *G. Angustifolia* se desarrollan en rangos entre los 650 y 1 900 metros sobre el nivel del mar. Según el INTECAP, el período de crecimiento de la planta y de los retoños, la lluvia es muy importante. Para un buen desarrollo del bambú, el promedio de precipitación es de 1 200 a 4 050 milímetros por año.

La temperatura no influye mucho en el crecimiento del bambú, pero deben estar por lo menos en un rango entre los 9 y 36 grados centígrados. El suelo ideal para estas especies debe ser arenoso, con una buena humedad, drenaje y que posea retención de humedad dicho suelo.

Las áreas de la costa del Pacífico, la franja transversal del norte, Izabal y parte de Petén son aptas para el cultivo del bambú, según el rango de precipitación mencionado, como se observa en el siguiente mapa:

Figura 16. **Mapa de precipitación promedio anual del periodo de 1960 a 2013**



470-	1333-	1843-	2441-	3100-	3848-
1332	1842	2440	3099	3847	4855

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH).



## 2. UTILIZACIÓN DEL BAMBÚ PARA LA CONSTRUCCIÓN EN GUATEMALA

### 2.1. Antecedentes

El uso de bambú en Guatemala se ha fomentado por más de 60 años. Desde la época de los mayas hasta el siglo XX no se tiene ningún documento sobre el uso del bambú, pero algunos investigadores aseguran que desde tiempos muy remotos empleaban en su vida cotidiana recipientes para recoger y guardar alimentos así como el empleo de fibras naturales para la fabricación de elementos de cestería, como por ejemplo en una pintura de un vaso de Chamá, sitio arqueológico de la zona de las verapaces.

Figura 17. Pintura de pieza del clásico tardío



Fuente: RODRÍGUEZ, Sandra. *El bambú como alternativa constructiva en Guatemala*. p 128.

A continuación se realiza una breve descripción de la historia del bambú en Guatemala:

- 1940: el estadounidense Dr. McClure estableció dos estaciones experimentales de bambú; una en la finca Chocolá en Suchitepéquez y otro en el valle del Polochic, Alta Verapaz.
- 1948: bajo la asesoría del Dr. McClure se sembraron 15 manzanas de bambú en Telemán, Alta Verapaz, tomándose estudios técnicos y pruebas de crecimiento. El proyecto duró 6 años, esto con el fin de establecer un proyecto para la producción de pulpa para papel.
- 1950: se introducen siete especies de bambú que eran las de mayor valor por sus usos potenciales y su capacidad de adaptación.
- 1958: las plantas de bambú sembradas por el Dr. McClure florecieron y produjeron una gran cosecha de semillas. Se realizaron experimentos con algunas especies, también se probaron métodos de siembras.
- 1978: después del terremoto se inicia a hacer estudios de las propiedades y alternativas que presentaba el bambú para la construcción. Se utilizó por primera vez para realizar dos prototipos de vivienda en terrenos de la parroquia de San Lucas Tolimán, Sololá.
- 1980: se inicia con el proyecto de desarrollo del bambú en Guatemala con un convenio entre la Misión Técnica Agrícola de la República de China en Taiwán y el Ministerio de Agricultura. Más adelante es trasladada la responsabilidad al INTECAP, quienes desarrollan varios viveros, para trasladar material a las fincas de la Costa Sur.

- 1982: se inicia con la segunda etapa de la investigación que inició la Universidad de San Carlos de Guatemala, proponiendo un plan conjunto de investigación denominado “Proyecto de investigación y desarrollo del cultivo y la utilización del bambú en Guatemala”. Las siguientes investigaciones fueron enfocadas en el campo de la construcción:
  - Propiedades físico-mecánicas del bambú (estudio preliminar de 6 especies de la finca Chocolá, Suchitepéquez).
  - Paneles de concreto liviano con refuerzo de bambú.
  - Evaluación de la capacidad resistente del sistema placa-poste de concreto reforzado con bambú.
  - Propiedades físico-mecánicas del bambú (6 especies recolectadas en los departamentos de Guatemala, Santa Rosa y Jutiapa).
  - Utilización del bambú en el diseño de vivienda para la región del sur oriente de Guatemala.
  - Losas de concreto liviano para letrinas reforzadas con bambú.
  - Muros de tableros de bambú.
  - Evaluación de las propiedades físico mecánicas en cuatro especies de bambú.
  - Sistema constructivo a base de paneles de madera y bambú.
  - Determinación de las propiedades de cuatro especies de bambú.
  - Influencia de la fase de la luna en la conservación de la madera de bambú.
  - Bambú y fibrocemento en la vivienda económica de Mazatenango.
  - Usos del bambú en la construcción de vivienda de interés social, en el municipio de Ixcán, El Quiché.
  
- 1983: el especialista taiwanés de bambú, Dr. Wei Chi Lin, realiza una visita al país para evaluar las especies existentes y para hacer luego

recomendaciones para su óptimo aprovechamiento con técnicas de propagación y transformación.

- 1984: por solicitud del gobierno de Guatemala, el Instituto Técnico de Capacitación y Productividad (INTECAP) y la Misión Técnica de la República de China (*Taiwán*) (MITAC), inician la ejecución del proyecto “Promoción del Cultivo del Bambú en Guatemala”.
- 1997: nace la asociación Nacional del Bambú (ASOBAMBU).
- 2003: se inicia el “Proyecto de Desarrollo Integral del Cultivo de Bambú y sus Diferentes Usos” y se establece el primer “Centro Educativo del Bambú para Latinoamérica y el Caribe” ubicado en el municipio de Masagua, Escuintla.
- 2009: Se ejecutan proyectos a través del gobierno de Guatemala como lo fue la construcción de 600 casas con bambú en el municipio de Tecún Umán en San Marcos y una escuela de bambú en Santa Rosa.
- 2012: se realiza la transferencia del proyecto, instalaciones y plantaciones del Centro Educativo del Bambú al ICTA para continuar con su funcionamiento y mantenimiento.
- 2013: posterior a la transferencia de proyecto, se inicia la gestión de la implementación del proyecto “Industrialización del Bambú en Guatemala” que busca fomentar el uso del bambú a través de la producción, transformación, comercialización e investigación.

### **2.1.1. Estudios que se han hecho sobre las características físicas y propiedades mecánicas del bambú en Guatemala**

Se han realizado diversos estudios sobre las características físicas y propiedades mecánicas de diferentes especies de bambú, como temas de trabajos de graduación de parte de la Facultad de Agronomía, Arquitectura e Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

A continuación se realiza un breve resumen de cada uno de ellas y los resultados más importantes que obtuvieron:

- Menéndez Cahueque, Raúl (1983)

En este trabajo de graduación se realizó la caracterización de once cultivares de bambú de la finca Chocolá, Suchitepéquez, determinándose características morfológicas que permiten distinguir con facilidad una especie de otra.

Las diferencias entre las variables fueron: largo del entrenudo, diámetro de entrenudos, grosor de la pared de los entrenudos, altura del tallo, número de ramificaciones por nudo, forma de la hoja caulinar y de la lígula en la hoja caulinar. Las características que se manifestaron con alguna estabilidad fueron: pubescencia en el haz y envés de las hojas, tipo de rizoma, filotaxía de las ramas en el tallo, color de las hojas, color de los tallos, venación de las hojas del follaje y presencia de espinas.



- Urrutia Revilla, Juan Francisco (1983)

Fue la primera tesis que formó parte del estudio en conjunto con las facultades de Arquitectura, Ingeniería y Agronomía denominado: *Proyecto de investigación y desarrollo del cultivo y la utilización del bambú en Guatemala*.

Sirvió de base y respaldo de los demás estudios que se realizaron posteriormente. La tesis se basó en conocer las características físicas y propiedades mecánicas de seis especies de bambú que se recolectaron en la finca experimental Chocolá, San Pablo Jocopilas, Departamento de de Suchitepéquez.

Se tomaron culmos con edad entre tres y seis años. Las especies que se estudiaron fueron: *Bambusa vulgaris*, *Bambusa textilis*, *Bambusa tuldoides*, *Bambusa tulda*, *Bambusa guadua* y *Gigantochloa verticillata*. Los resultados fueron los siguientes:

- La especie que tuvo mayor variabilidad en sus propiedades fue la *Bambusa vulgaris*.
- El modulo de elasticidad resultó ser diez veces menor que el de acero de refuerzo convencional.
- La especie tuldoides obtuvo el menor contenido de humedad, mientras que la *Guadua* el menor peso específico.
- Las especies que presentaron mayor resistencia en sus propiedades mecánicas fueron las especies *Bambusa tulda* y *tuldoides*.
- La edad del tallo no varió en cuento a sus propiedades de elasticidad y resistencia de tensión y flexión.

- Morales Jolá, Hernán Eduardo (1985)

Se recolectó la muestra en la finca Chocolá, departamento de Suchitepéquez, el municipio de Santa Elena Barillas, departamento de Guatemala, el municipio Oratorio, departamento de Santa Rosa y el municipio de Jutiapa, Jutiapa. Las especies analizadas en este estudio fueron: *Bambusa tuloides*, *Bambusa arundinácea*, *Bambusa vulgaris*, *Melocanna baccifera*, *Phyllostachys bambusoides* y *Chusquea pittieri*.

Los ensayos realizados fueron: contenido de humedad, contracción y peso específico, tensión paralela a la fibra, comprensión paralela a la fibra, corte paralelo a la fibra, tensión paralela a la fibra y clivaje.

En los ensayos para determinar las características físicas la especie *Shusquea pittieri* obtuvo el menor peso específico, mayor contenido de humedad, mayor porcentaje de contracción radial y volumétrica. Mientras que la especie *Melocanna baccifera* obtuvo el mayor peso específico.

Para la parte mecánica la especie *Chusquea pittieri* posee un valor alto en esfuerzos a compresión y modulo de elasticidad en compresión. La especie *Melocanna baccifera* obtuvo el valor más alto en esfuerzo a tensión y el segundo más alto en esfuerzo a compresión y corte.

- Sagastume Andrade, Francisco (1986)

El estudio consistió en el muestreo y caracterización de las especies de la subfamilia *Bambusoideae* (*Poaceae*). Se realizó la descripción de cada una de las especies encontradas. Con esto se tabularon los datos por especie y se realizaron las dos claves dicotómicas de campo. Estos fueron los resultados obtenidos:

- Se actualizaron los datos de las especies recolectadas.
  - Se encontraron 2 variedades y 21 especies distribuidas en 7 géneros. Estas fueron: *Arthrostyloidium*, *Bambusa*, *Chusquea*, *Gigantochloa*, *Guadua*, *Phyllostachys* y *Schizostachyum*.
  - Se elaboraron dos claves de campo, para las especies de la vertiente del océano Pacífico.
- Oliva Mayorga, Gustavo Adolfo (1989)

Este trabajo de graduación estuvo orientado a establecer indicadores de la calidad de resistencia como material de construcción de cuatro especies de bambú, al comparar sus propiedades físico-mecánicas. Las especies utilizadas fueron: *Bambusa vulgaris*, *Bambusa arundinácea*, *Gigantochloa verticillata* y *Bambusa tulda*. Se ensayaron el tallo de cada especie; las partes basal, media y apical.

El material fue recolectado en la finca *Bulbuxyá* ubicada en el municipio de San Miguel Panán del departamento de Suchitepéquez. Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de resistencia de materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Las probetas fueron elaboradas en la sección de carpintería de la misma Facultad.

Se realizaron cuatro repeticiones de cada ensayo y se obtuvieron los siguientes resultados:

- Las pruebas físicas indicaron que en las partes del tallo el porcentaje de humedad disminuye mientras más se acerca a la parte apical.
  - Las pruebas mecánicas indicaron que las especies más resistentes son: *Bamusa tulda* y *Bambusa arundinácea*. Resultando más resistentes la parte basal del tallo, en las pruebas de corte, tensión perpendicular a la fibra y clivaje. En las pruebas de tensión y comprensión paralela a la fibra no hubo diferencia significativa entre estas partes.
- Tejada Vásquez, Julio Héctor (1990)

Las especies de bambú utilizadas en este trabajo de graduación fueron: *Gigantochloa apus kurz*, *Gigantochloa asper kurz*, *Schizostachyum pseudoluma* y *Chusquea pittieri hack*. La investigación se orientó a determinar la capacidad que presenta el bambú para soportar diferentes esfuerzos, con el fin de establecer la calidad de resistencia del material.

Se realizaron las pruebas en el laboratorio de resistencia de materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Las pruebas físicas determinaron que las especies evaluadas se encontraron dentro del rango de madurez esperados; entre 16 % a 18 %, comprobando que el contenido de humedad decrece con la altura del tallo. Las pruebas mecánicas indicaron que la especie *Gigantochloa apus* posee el valor más alto en el esfuerzo a tensión paralela a la fibra, la especie *Gigantochloa asper* obtuvo los mejores resultados mecánicos.

## **2.2. Situación actual del bambú como material de construcción en Guatemala**

Según el INDIS, que es el Instituto de Investigación en Diseño de la facultad de Arquitectura y Diseño de la Universidad Rafael Landívar en Guatemala, en febrero de 2012 se inició con la primera fase de un proyecto que consiste en investigación sobre el bambú. Como en Guatemala no existe una industria como tal, se inició con un diagnóstico sobre la situación actual del bambú en Guatemala.

Para ello, se recopiló información de plantaciones, fabricantes y puntos de comercialización donde utilizan bambú como materia prima. Los resultados hasta ese momento fueron que muchas personas han estado trabajando aisladas, porque no existe una cadena productiva como tal y es necesario crear y fortalecer una industria del bambú.

Como plan de acción para el fortalecimiento, se identificaron varias fases que serán apoyadas por Taiwán ICDF. Que contemplan los siguientes puntos:

- Capacitación de más profesionales.
- Crear una comisión de bambú en Guatemala.
- Crear una plataforma que sirva de base de datos actualizadas de las plantaciones, productores y comercializadores.
- Generación e innovación de nuevos productos.
- Apoyo a plantaciones para un inventario actualizado por especie.
- Incentivar a las universidades para incluir el bambú dentro del pensum de estudios.
- Mejorar el proceso de enseñanza y generar más material educativo de calidad

El área cultivada de bosque de bambú en Guatemala se aproxima a 12 000 hectáreas. Las principales especies cultivadas son: *Guadua Angustifolia* y *Bambusa vulgaris*. Estas son utilizadas mayormente en la protección de los cauces de los ríos y en la conservación de suelos y aguas.

Las que son utilizadas para procesamiento son: *D. asper*, y *G. angustifolia*. De estas se cuenta con 7 000 hectáreas cultivadas. Unas 5 600 hectáreas de bambú son cultivos de uno a tres años. Las especies de uso comercial, *Guadua* y *Bambusa* tienen 700 hectáreas cultivadas, ubicadas en diferentes departamentos del país.

Actualmente, las plantaciones existentes de bambú para caña proveen la materia prima para su manufactura. La fabricación de productos con la caña, consiste en producir muebles, tejidos, pisos y tabla decorativa de pared hecha con el nudo de bambú.

Por otro lado, como resultado de la capacitación y la asistencia técnica brindada por la MITAC a pequeños y medianos empresarios agrícolas e industriales, ya se han iniciado plantaciones en campo y se han establecido empresas para comercialización de productos de bambú.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Industrialización del Bambú. <http://bambu.gt/>. Consulta: junio del 2016.

### **2.3. Entidades gubernamentales e instituciones públicas y privadas que promueven el bambú en Guatemala**

- Instituciones/gobierno
  - Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA)

Es una institución de derecho público responsable de generar y promover la ciencia y tecnologías agrícolas para la sostenibilidad de los sistemas de producción agrícola, con énfasis en agricultores de infra-subsistencia y excedentarias, como una contribución al desarrollo agrícola de Guatemala.

- Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación

MAGA es la institución de servicio público para la agricultura, seguridad alimentaria y normatividad de proyectos de desarrollo agrícola. Fomenta el desarrollo rural integral a través de la transformación y modernización del sector agropecuario, forestal e hidrobiológico.

- Misión Técnica Agrícola de la República de China (Taiwán)

El gobierno de la república de China (Taiwán), apoya a Guatemala en diversos proyectos para el desarrollo económico y social del país. Por lo que crearon un grupo que busca en conjunto promover y desarrollar el bambú, dicho grupo está conformado por:

- Misión Técnica Agrícola de la República de China (Taiwán) y el Fondo Internacional de Cooperación y Desarrollo (ICDF Taiwán, por sus siglas en inglés).
  - Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación MAGA.
  - Ministerio de Economía MINECO.
  - Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola ICTA a través del Centro Educativo del Bambú.
  - Universidad Rafael Landívar a través del Instituto de Investigación en Diseño.
  - Universidad de San Carlos de Guatemala a través de la Facultad de Arquitectura.
- Empresas privadas

Las siguientes empresas promueven el desarrollo del bambú al utilizarlo como su principal materia prima:

- Proyecto de Diseño – Guambu / Casa Viva
- Bambumaya-Conex, S.A.
- D´Bambú
- Eco-Bambú
- Cerro Joen
- Carbu
- AB Arquitectura
- Finca Panamá



### **2.3.1. Cantidad de hectáreas cultivadas de bambú**

Actualmente, no se tiene una cifra aproximada de la producción de este producto, lo que se puede mencionar es que cada vez va en aumento, esto por la importancia que ha cobrado el bambú en el país por los diferentes estudios y el interés que las universidades e instituciones gubernamentales y empresas privadas le han puesto. Además de ello los distintos proyectos que se han realizado para fomentar e incentivar la producción, transformación, comercialización e investigación técnica y de mercados del bambú en Guatemala.

En Guatemala se reconocen alrededor de 22 especies de bambú las cuales equivalen aproximadamente a 12 000 hectáreas de cultivo, se estima que el 50 % de uso comercial, según estadísticas del Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola (ICTA).

Actualmente, se considera que existen 350 fincas aproximadamente que han sembrado bambú en cantidades variables, la mayoría de ellas fincas de la costa sur de Guatemala. La mayor producción de *G. Angustifolia* se encuentra en las fincas Panamá de Santa Bárbara Suchitepéquez.

### **2.4. Especies apropiadas para la construcción**

No todas las especies de las 22 que se encuentran en Guatemala tienen las características físicas y propiedades mecánicas aptas para utilizarlo en la construcción. Es por ellos que se hace una lista de las especies apropiadas:

- Refuerzo en las construcciones
  - *G. Angustifolia*
  - *G. Verticillata*
  - *Gigantochloa apus*
  - *Bambusa arundinácea*
  - *Bambusa tulda*
  - *Bambusa tuldoides*
  - *D. Asper*
  
- Construcciones de puentes
  - *Dendrocalamus giganteus*
  - *D. Asper*
  - *G. Angustifolia*
  - *Bambusa vulgaris Var. Striata*

#### **2.4.1. Niveles de consumo**

Según la misión de la república de China, que han trabajado con el Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola (ICTA) desde 2003, el bambú se empezó a trabajar con mayor énfasis en el país, encontrándose con mayor densidad de producción en la costa sur. Las especies más comercializadas son: *G. angustifolia*, *D. asper*, *G. verticillata* debido a su resistencia para el uso en la construcción, así como otras especies que se utilizan en la elaboración de muebles y artesanías como lo es la *Bambusa vulgaris*, *Phyllostachys aurea* entre otros. Este mercado también ha crecido debido a las constantes capacitaciones que se han realizado de parte de la misión y el ICTA.

## **2.5. Manejo correcto del bambú**

Para usarlo como material de construcción es necesario darle un buen manejo desde que se esté cultivando hasta el almacenamiento y transporte. A continuación se presenta una lista de actividades por tomar en cuenta para que se pueda manejar correctamente el bambú:

- Cultivo
- Corte
- Preservación
- Almacenamiento
- Transporte
- Métodos de secado

El método apropiado para cada una de estas actividades ya fue mencionado en el capítulo 1. Además de ello también se debe tener un buen manejo al construir:

- Proteger las culmos de la lluvia y de los rayos solares directos

La humedad excesiva produce hongos como en cualquier otro material y los rayos solares blanquean y deterioran los culmos, por lo cual es imperativo protegerlas del agua y del sol directo, construyendo aleros lo suficientemente amplios. Si se usa culmos chancados, es necesario recubrirla con mortero de arena-cemento o con una mezcla de materiales orgánicos con tierra (tipo quincha).

- Mantener columnas y paredes aisladas de la humedad del suelo

Para construir columnas o paredes con bambú es necesario que no se las empotre directamente en el concreto o en el suelo para evitar su deterioro (pudrición). Las culmos tienen una alta capacidad de absorción de la humedad del ambiente, del suelo y de la lluvia.

- Cimientos

Se describe una cimentación aplicable en sitios libres de inundación y adecuados para la construcción. Esto permite la ejecución de pisos sólidos. De todas formas, los sitios en los que se van a construir deben contar con rellenos adecuados, de mínima altura para evitar la afectación por lluvia o por humedad.

- Evitar el aplastamiento y la fisura de las culmos

Cuando se aplica un peso localizado sobre el entrenudo, éste se aplasta, pudiendo deteriorar toda la estructura. Para evitarlo, se debe colocar las cargas sobre los nudos y/o rellenar los culmos de concreto. Además, es necesaria la presencia de un nudo en cada extremidad de los culmos para evitar que se fisure.

## **2.6. Condiciones de uso**

Para el uso correcto del bambú en la construcción, es necesario que los culmos de bambú cumplan con ciertos parámetros, se recomiendan los siguientes:

- Edad del bambú

Para contar con bambú de calidad es necesario usar culmos maduras, por su resistencia y menor contenido de humedad, que hayan sido debidamente preservados (inmunizados) y secados. El uso de culmos no maduras o frescas (sin secado), puede ocasionar rajaduras, fisuras y hasta el colapso de la construcción.

- Diámetro y altura

Se recomienda utilizar culmos con diámetros entre 5 a 14 centímetros, dependiendo el uso estructural que se le dé a cada uno. Depende de la especie y el tipo de uso. La altura de corte más común es en la base del culmo, al ras del suelo.

- Contenido de humedad

Cuando las edificaciones se construyan con bambú en estado verde, el profesional responsable debe tener en cuenta todas las precauciones posibles para garantizar que las piezas al secarse tengan el dimensionamiento previsto en el diseño. Es recomendable utilizar culmos con un contenido de humedad entre 10 % a 21 % para evitar contracciones del material.

- Durabilidad

El bambú estructural debe tener una buena durabilidad natural y estar adecuadamente protegido ante agentes externos (humos, humedad, insectos, hongos, etcétera).

- Deformación

Las piezas de bambú estructural no pueden presentar una deformación inicial del eje mayor al 0,33 % de la longitud del elemento. Esta deformación se reconoce al colocar la pieza sobre una superficie plana y observar si existe separación entre la superficie de apoyo y la pieza.

Figura 18. **Deformación en el culmo**



Fuente: Centro educativo del bambú, Instituto de Ciencia de Tecnología Agrícola (ICTA).

- Entre nudos

Los tallos con entrenudos mayores a 50 centímetros no son recomendables para el uso en la construcción.

- Fisuras, agrietamientos y perforaciones

Las piezas de bambú estructural no pueden presentar fisuras perimetrales en los nudos ni fisuras longitudinales a lo largo del eje neutro del elemento. En caso de tener elementos con fisuras, estas deben estar ubicadas en la fibra externa superior o en la fibra externa inferior. Si tienen agrietamientos superiores o iguales al 20 % de la longitud del tronco no serán consideradas como aptas para uso estructural. No deben presentar perforaciones causadas por ataque de insectos xilófagos antes de ser utilizadas.

Figura 19. **Perforaciones**



Fuente: VALDEZ, David. *Cultivo del bambú*. p11.

- Pudrición

No se aceptan bambúes que presenten algún grado de pudrición. Los tallos con evidencia de pudrición no deben ser utilizados. Hay que tener cuidado de no confundir la pudrición con las manchas blancas de los líquenes.

- Conicidad

Las piezas de bambú estructural no deben presentar una conicidad superior al 1,0 % del largo del culmo por utilizar.

- Requisitos de resistencia

Los elementos estructurales de bambú deben diseñarse para que los esfuerzos aplicados, producidos por las cargas de servicio y modificados por los coeficientes aplicables en cada caso, sean iguales o menores que los esfuerzos admisibles del material.

- Requisitos de rigidez

- Las deformaciones deben evaluarse para las cargas de servicio.
- Se consideraran necesariamente los incrementos de deformación con el tiempo (deformaciones diferidas) por acción de cargas aplicadas en forma continua.
- Las deformaciones de los elementos y sistemas estructurales deben ser menores o iguales que las admisibles.
- En aquellos sistemas basados en el ensamble de elementos de bambú se incluirán adicionalmente las deformaciones en la estructura debidas a las uniones, tanto instantáneas como diferidas.

- Esfuerzos admisibles

Los esfuerzos admisibles que deberán usarse en el diseño de elementos estructurales de bambú, son los que se consignan en la siguiente tabla:



Tabla IV. **Esfuerzos admisibles**

FLEXIÓN (fm)	TRACCIÓN PARALELA (ft)	COMPRESIÓN PARALELA (fc)	CORTE (fv)	COMPRESIÓN PERPENDICULAR (f'c⊥)
5 Mpa (50 Kg/cm <sup>2</sup> )	16 Mpa (160 Kg/cm <sup>2</sup> )	13 Mpa (130 Kg/cm <sup>2</sup> )	1 Mpa (10 Kg/cm <sup>2</sup> )	1,3 Mpa (13 g/cm <sup>2</sup> )

Fuente: Norma técnica E.100 bambú. p 7.

- Módulo de elasticidad

Los módulos de elasticidad que deberán usarse en el diseño de elementos de bambú son los que se consignan en la siguiente tabla:

Tabla V. **Módulo de elasticidad**

E <sub>prom</sub>	E <sub>min</sub>
9 500 Mpa (95 000Kg/cm <sup>2</sup> )	7 300 Mpa (73 000 Kg/cm <sup>2</sup> )

Fuente: Norma técnica E.100 bambú. p 8.

## 2.7. Ejemplos de construcciones con bambú en Guatemala

Actualmente en Guatemala se ve una serie de construcciones que tienen como materia prima diferentes especies de bambú, destacan los hoteles, restaurantes, viviendas, entre otras. A continuación, se presentan algunos ejemplos:

### **2.7.1. Hotel y playa *Sand Bay* en Puerto Barrios**

Es un hotel y restaurante famoso ubicado en Puerto Barrios, Izabal. Su diseño es único y ecológico, construido y decorado con ochenta por ciento de bambú tratado.

Figura 20. **Instalaciones hotel *Sand Bay***



Fuente: Portal del hotel. Disponible en: <http://es.slideshare.net/ecoproyecto/hotel-y-playa-sand-bay-en-ptobarrios-izabal>. Consulta: el 7 de junio de 2016.

### **2.7.2. Hotel y restaurante Bambú en Santiago Atitlán**

Este hotel está ubicado en Santiago Atitlán, a las orillas del lago de Atitlán, rodeado de montañas y vegetación. Una parte de sus instalaciones está construida con bambú, su techo y la pérgola.

Figura 21. **Imágenes del hotel y restaurante Bambú**



Fuente: <http://ecobambu.com/>. Consulta: el 7 de junio 2016.

### 2.7.3. **Ram Tzul**

*Ram Tzul* es un hotel y restaurante ubicado en Purulhá, Baja Verapaz. Como se observa en las imágenes se utilizó un porcentaje alto de bambú para la construcción de sus instalaciones. Es una de las construcciones de bambú más grande en Centroamérica.

Figura 22. **Restaurante construido con bambú**



Fuente: disponible en: <http://www.ramtzul.com/restaurante/restaurante.htm>. Consulta: 7 de junio de 2016.

#### 2.7.4. Tortugal River Lodge

Son *bungalows* ubicados en Río Dulce, Izabal. Esta diseñado con 90 % de bambú en toda su construcción. Es uno de los hoteles más grandes construidos con bambú en Guatemala.

Figura 23. Habitaciones construidas con bambú



Fuente: disponible en: <https://tortugal.com/hotel>. Consulta: 7 de junio de 2016.

### **2.7.5. Pacific Pearls Lodge**

Está ubicado en las costas del Pacífico. Las suites de este eco-hotel están construidas con bambú y paja.

**Figura 24. Muebles y techo de bambú**



Fuente: <http://www.pacificpearlslodge.com/>. Consulta: 7 de junio de 2016.

### **2.7.6. Centro educativo del bambú, en Escuintla**

Está ubicado dentro del Centro Experimental del Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola (ICTA) en el Km. 83.5 Masagua, Escuintla. Se construyó con el apoyo técnico y económico del gobierno de la república de China (Taiwán) a través de la Misión Técnica Agrícola de Taiwán, junto al especialista en bambú Ing. Shyh-shiun LIN. Se implementó con el fin de fomentar y promover la reproducción del bambú en Guatemala y Centroamérica.



Figura 25. **Centro educativo del bambú**



Fuente: Centro Educativo del Bambú, Instituto de Ciencia de Tecnología Agrícola (ICTA).

### 2.7.7. **Escuela del bambú en Santa Rosa**

La embajada de Taiwán construyó una escuela con bambú en el Caserío La Aradita, Oratorio, Santa Rosa. Esto con el fin de tenerla como muestra y proyecto piloto de los edificios de servicio que podrían ser construidos cuando aumente el cultivo y la producción de bambú en Guatemala.

Figura 26. **Construcción de la escuela del bambú**



Fuente: Industrialización de Bambú en Guatemala <http://bambu.gt/galeria009>. Consulta: 11 de junio 2016.

### **2.7.8. Proyecto habitacional social de seiscientas casas en San Marcos**

Este proyecto habitacional social se realizó en el municipio de Tecún Umán, San Marcos. La construcción de las casas se llevó a cabo durante tres años aproximadamente y el costo de construcción fue menor ya que se ahorró un 50 a 60 % en comparación con las casas convencionales. Además resistieron al terremoto que el 7 de noviembre de 2012 afectó a ese departamento.

**Figura 27. Proyecto habitacional en San Marcos**



Fuente: Industrialización de Bambú en Guatemala <http://bambu.gt>. Consulta: 11 de junio 2016.

### **3. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DEL BAMBÚ APTO PARA LA CONSTRUCCIÓN**

#### **3.1. Definición de las características físicas**

A continuación se hace una breve descripción de las características físicas que se evaluarán para cada una de las diferentes especies estudiadas. Esta selección se hizo en base a la norma ASTM D143.

##### **3.1.1. Contenido de humedad**

La humedad es la relación entre la masa de agua y la masa de sólidos presentes en un material. Esta característica física es muy importante porque de esta dependen las propiedades mecánicas del bambú.

Se requiere que las distintas especies, se encuentren dentro de un rango de 10 % a 21 % para ser utilizada como elemento estructural; ya que los esfuerzos mecánicos presentan una variación si están fuera de ese rango. Diferentes estudios han mostrado que la resistencia mecánica del material ante diferentes solicitaciones de carga disminuye a medida que el contenido de humedad aumenta.

##### **3.1.2. Contracción**

Es la propiedad que posee el bambú, de disminuir su volumen a medida que pierde la humedad que contiene durante el periodo de secado.



Excepto en el PSF (punto de saturación de la fibra), ya que en este punto y arriba de este no sufre contracciones. Estas contracciones son mayores cuando el porcentaje de humedad en el tallo es alto y viceversa. Es mayor el efecto en los entrenudos.

### **3.1.3. Densidad seca**

Es la relación entre la masa y el volumen del bambú en condiciones secas. Entre más densa sea una especie es mucho más resistente. Y según su densidad se clasifican las especies de bambú en liviana, semi-liviana o pesada.

### **3.1.4. Densidad húmeda**

Es la relación entre la masa y el volumen del bambú en condiciones húmedas, normalmente se mide con un contenido de humedad del 12 %. Esta característica está relacionada con el contenido de agua que tengan los culmos de bambú.

### **3.1.5. Dureza**

Es la dificultad que presenta el bambú para ser penetrado por otros cuerpos (clavos, tornillos, etcétera.) o ser trabajado (cepillo, sierra, formón). La dureza está ligada a la densidad, cuanto mayor sea la dureza del bambú mayor es su densidad. La dureza depende de la parte del culmo (base, medio o apical), edad o especie, etcétera. Algunas especies de la familia herbáceo son blandas y flexibles, debido a células vivas que forman un tejido de sostén, mientras que algunos son leñosos y son más duros y rígidos debido a células muertas que forman paredes endurecidas.

### **3.1.6. Absorción**

Esta característica física es la capacidad del bambú de absorber y retener agua en las paredes de las células, lo que ocasiona el hinchamiento del material. Este fenómeno está relacionado con la temperatura y la humedad de la zona donde se encuentre.

### **3.1.7. Peso específico seco**

Se expresa como el peso del material por unidad de volumen. Cuando el material está completamente seco. Esto se obtiene disecando el material en horno a  $110 \pm 2$  °C, hasta que tenga un peso constante. Esta característica no debe confundirse con la densidad, ya que esta es la relación de la masa entre el volumen.

### **3.1.8. Peso específico húmedo**

Al igual que el peso específico seco, es la relación entre el peso y volumen, Tomando en cuenta un rango establecido de humedad (10 % a 21 %) que es el rango donde se considera que el material es apto para su uso en la construcción. Varía con la humedad del culmo, la parte del tallo que se esté analizando (base, medio o apical), en las partes internas y externas, así como la especie.

## **3.2. Definición de propiedades mecánicas**

A continuación se hace una breve descripción de las diferentes propiedades mecánicas por evaluar.

### **3.2.1. Resistencia a tensión paralela a la fibra**

Es la resistencia que provoca el bambú a la separación o desgarre de sus fibras, bajo la acción de dos fuerzas externas opuestas entre si y en posición paralela a la fibra, que ejercen tracción o estiramiento al material.

Esta es la mejor propiedad mecánica que posee el bambú, puede llegar a ser hasta cuatro veces más fuerte que en compresión para una misma especie. Es por esta propiedad que se le conoce al bambú como el “acero vegetal”. Por lo que se han realizado varios estudios sustituyendo el acero por este material en estructuras de concreto, con conclusiones poco favorables debido, principalmente, a la poca adherencia del bambú con el concreto y la variación volumétrica que este presenta durante el proceso del fraguado. Una de las posibilidades para aprovechar esto es su uso en cables de bambú, que sirven para sostener puentes colgantes.

### **3.2.2. Resistencia a tensión perpendicular a la fibra**

Es la capacidad del bambú a resistir fuerzas que provocan la separación o desgarre de sus fibras, a causa de fuerzas colineales, opuestas y en posición perpendicular a la fibra del bambú.

Esta capacidad disminuye a comparación con la resistencia a tensión paralela, debido a la facilidad de disgregación de sus fibras, que está también relacionado con el agrietamiento superficial que padece el bambú durante el proceso de secado. Esto sucede cuando los esfuerzos que se producen durante el secado son mayores a la resistencia del bambú a tensión perpendicular a la fibra, es decir los culmos tienden a rajarse. Es por ello que no se utilizan clavos para las uniones.

### **3.2.3. Resistencia a compresión paralela a la fibra**

Es la capacidad del bambú para resistir fuerzas axiales de aplastamiento que provocan su deformación. Estas fuerzas son opuestas entre sí, ejerciendo su acción en un plano paralelo a la dirección de las fibras del material.

Dado que gran parte del bambú es utilizado en la construcción para columnas, vigas, soportes, montantes y otros, en las cuales están sujetos a cargas que tienen a aplastar o acortar los miembros longitudinalmente. Es necesario recurrir a pilares compuestos por varios culmos de bambú para asegurar la estructura, para evitar que fallen. Esto depende de la esbeltez que presente la pieza por estudiar, para conocer si fallará por aplastamiento, pandeo o corte.

### **3.2.4. Resistencia a corte**

Es la capacidad del material a resistir fuerzas que producen deslizamiento o rompimiento de una porción de este en relación a otra porción adyacente. El corte es una fuerza que actúa paralelamente a un plano, en contraste a las de tensión y compresión que son perpendiculares al área considerada. La fractura por corte es muy diferente de la tensión o compresión puesto que no hay reducción localizada del área, ni tampoco alargamiento.

Este esfuerzo se tendrá que tener muy en cuenta especialmente en el diseño de las uniones o juntas. La mayoría de estos componentes constructivos están sujetos a corte paralelo a la fibra.

### **3.2.5. Resistencia a flexión**

Presenta la capacidad del bambú a ser doblada o curvada en su sentido longitudinal sin romperse o rajarse bajo la acción de cargas transversales. Si son elásticas recuperan su forma original cuando cesa la fuerza, caso contrario fallan.

Para conocer esta resistencia se aplica una fuerza al centro del culmo que esta soportada en los extremos por apoyos, con esto se encuentra el módulo de Young o módulo de elasticidad que es una medida de la rigidez del material. Según estudios la rigidez del bambú es prácticamente el doble al de la madera, debido a la composición física.

El esfuerzo de flexión es significativo a lo largo del culmo, pero en la base los resultados suelen ser más bajo por ser más rígida.

## **4. METODOLOGÍA DE ENSAYO**

### **4.1. Muestreo**

Para tomar las muestras significativas del material que se iba a ensayar, llegamos al Centro Educativo del Bambú, que se encuentra dentro de las instalaciones del Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola (ICTA), ubicado en Coyuta, Masagua, Escuintla, Guatemala, quienes donaron el material para este proyecto de investigación.

Se cortaron 15 culmos de bambú de aproximadamente cinco metros de largo de cada especie para un total de 45 culmos. Entre las edades de cuatro a cinco años. En el lugar se rotularon los culmos de cada especie para diferenciar una especie, seguidamente se trasladó hacia las instalaciones del Laboratorio de Tecnología de la Madera de la Facultad de Ingeniería ubicado dentro del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

#### **4.1.1. Preparación de material**

Teniendo el material en el lugar, se procedió a medir la longitud y el espesor de pared de cada culmo, así mismo se tomó el número de nudos y la longitud de los entrenudos, para tener información de las variaciones de estas características según la especie analizada y para tener identificado el culmo y la sección para los ensayos. Con el fin de que el material fuera más duradero y menos propenso al ataque de los insectos y hongos durante el tiempo de secado, se procedió a someter a un tratamiento de curado con diésel.

Posteriormente, se almacenó el material bajo la sombra por cuarenta días, colocándolos mampuestos entre sí con el fin de evitar rajadura o pandeo (que normalmente presenta al colocarlas inclinadas apoyadas por una pared), esto con el objetivo de que se secaran hasta que su contenido de humedad estuvieran dentro del rango permitido.

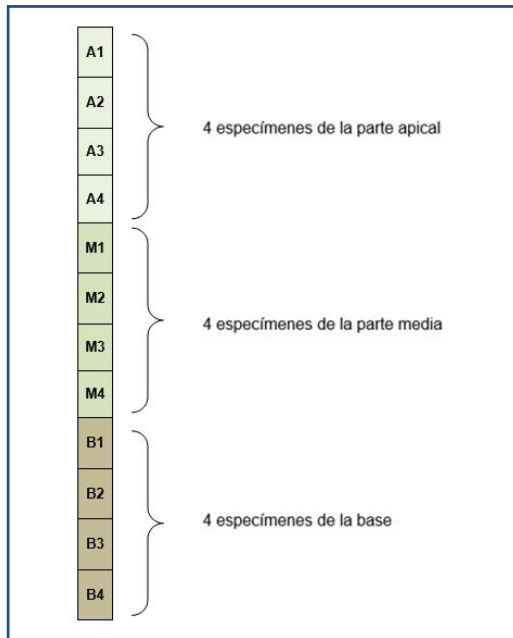
Figura 28. **Material en el lugar de secado**



Fuente: Sección de Tecnología de la Madera, Facultad de Ingeniería, USAC.

Luego del secado de las unidades experimentales con el contenido de humedad ideal, se procedió a elaborar las probetas para los diferentes ensayos, con las dimensiones estipuladas en las normas utilizadas. Se cortaron cuatro probetas de cada parte del culmo: base, media y apical, siendo un total de doce probetas para cada ensayo. Esto se hizo para conocer la diferencia que va presentando el material según la parte del tallo que se esté analizando.

Figura 29. **Número de especímenes por ensayo**



Fuente: elaboración propia.

Luego del corte de las probetas, se rotularon de la siguiente manera:

G	B	1
a	b	c

Donde:

a = especie analizado

G (*G. Angustifolia*),

A (*D. Asper*)

V (*G. Verticillata*)



b = posición del culmo

B (base)

M (media)

A (apical)

c = número o cantidad de ensayo del 1 al 4

## **4.2. Métodos de ensayo**

Para conocer las propiedades mecánicas del bambú se siguieron con los procedimientos de ensayo según las normas ISO 22157 e INBAR (ISO/TC 165 N315) que es exclusivamente para bambú. Anteriormente se había aportado conocimiento sobre este tema pero utilizando normas para ensayos de madera, debido a que no existía una norma para ensayos de bambú. Para las características físicas, se siguieron los procedimientos de la norma ASTM D143.

### **4.2.1. Determination of physical and mechanical properties of bamboo INBAR (ISO 22157)**

Esta norma fue preparada por el comité técnico ISO/TC 165, estructuras de madera, en colaboración con INBAR, (red internacional de bambú y ratán) con el título de: determinación de propiedades físicas y mecánicas del bambú. Se compone de dos partes:

Parte 1: requisitos

Parte 2: Manual de laboratorio

El objetivo es acercar el bambú al nivel de un material de construcción e ingeniería reconocido internacionalmente. INBAR pretende hacerlo en favor del bienestar de los grupos de menores ingresos en los países en desarrollo y en favor de un mejor ambiente en los países productores de bambú. La discusión sobre la necesidad de una Norma Internacional comenzó ya en 1988. En 1998, un grupo de especialistas de INBAR se reunieron y redactaron el documento de acuerdo con su experiencia y propuestas de mejoras.

Debido a que esta parte de ISO 22157 es la primera norma internacional sobre el bambú, no cancela o reemplaza otros documentos en su totalidad o en parte, además de los borradores preparados y distribuidos para discusión interna por INBAR durante 1998 y 1999. Los cambios técnicos de las ediciones anteriores solo se aplican a estos borradores anteriores.

#### **4.2.2. Laboratory Manual on testing Methods for determination of physical and mechanical properties INBAR (ISO/TC 165 N315)**

Esta es la segunda parte de la norma ISO 22157 especifica métodos de prueba para evaluar las propiedades físicas y mecánicas del bambú. Con el objetivo de obtener datos, que pueden utilizarse para establecer funciones de resistencias admisibles, útil para métodos de diseños estructurales. Los ensayos que comprenden son: contenido de humedad, masa por volumen, contracción, compresión, flexión, y tensión.

Los datos también pueden usarse para establecer la relación entre las propiedades mecánicas y los factores, tales como el contenido de humedad, la masa por volumen, el sitio de crecimiento, la posición a lo largo del culmo, la presencia del nodo y el entrenudo, etcétera.

#### **4.2.3. Norma ASTM D-143**

Esta norma dicta métodos de ensayo para la determinación de diversas resistencias y propiedades físicas y mecánicas de la madera mediante pequeños especímenes. Así mismo, factores de control como el tamaño de la muestra, el contenido de humedad, temperatura, velocidad de carga, y recolección del material.

#### **4.3. Procedimientos de ensayos para determinar características físicas**

A continuación se presenta los procedimientos de cada uno de los ensayos realizados para determinar las características físicas del bambú.

##### **4.3.1. Contenido de humedad**

El objetivo de este ensayo es conocer el contenido de humedad del material que es uno de los índices más significativos para las propiedades mecánicas. Para esto se utilizó el método de secado al horno.

- Probeta de ensayo
  - El material debe estar libre de musgo, se tomaran de las probetas ensayadas.
  - Se cortan cuadros de 1 x 1 cm, y se identifican según la parte del culmo que se ensayó (base, media y apical). Cuando sea posible se cortaran cilindros de longitud igual a 7 cm.
  - La muestra debe estar en un lugar resguardado de luz solar y de agua.

Figura 30. **Probetas de ensayo para contenido de humedad**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Equipo
  - Horno con temperatura uniforme en toda la cámara del secado.
  - Balanza de precisión con escala de  $\pm 0,1$  g.
  - Vernier milimétrico con escala  $\pm 0,01$  mm para medir las dimensiones físicas de la probeta.

Figura 31. **Equipo para contenido de humedad**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Procedimiento

- Se toma el peso del material húmedo (temperatura ambiente).
- Se introduce al horno a temperatura de  $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  por 24 horas.
- Se retira del horno, y se espera que el material disipe la energía calorífica, evitando que absorba humedad del ambiente y se vuelve a tomar el peso del material seco, con la misma balanza que se utilizó al tomar el peso húmedo.

- Cálculos

Para obtener el porcentaje de contenido de humedad se utiliza la siguiente ecuación:

$$CH = \frac{P1 - P2}{P2} * 100$$

Donde:

CH = contenido de humedad %

P1 = peso de la probeta húmedo (g)

P2 = peso de la probeta seco (g)

### **4.3.2. Ensayos complementarios de características físicas según norma ASTM D-143**

Para los ensayos complementarios de las características físicas, se tomó en cuenta los procedimientos de la norma ASTM D-143.

#### **4.3.2.1. Contracción**

El objetivo de este ensayo es dar a conocer el porcentaje de contracción que sufre el bambú al liberar agua luego de colocarla en un ambiente seco.

- Procedimiento y probeta de ensayo

Se utiliza el mismo procedimiento de ensayo y espécimen para determinar el peso específico. Tomando las dimensiones del espécimen con contenido de humedad normal y después del secado.

- Cálculos

Para determinar el porcentaje de contracción

$$\%C = \frac{D_{CH} - D_o}{D_o} * 100$$

Donde:

$\%C$  = coeficiente de contracción volumétrico

$D_{CH}$  = dimensión de la probeta con contenido de humedad normal (cm<sup>3</sup>)

$D_o$  = dimensión en estado anhidro (cm<sup>3</sup>)

#### 4.3.2.2. Densidad seca

El objetivo de este ensayo es determinar la cantidad de masa por unidad de volumen de los especímenes de bambú, con ella se puede comparar y verificar que especie es más denso.

- Probeta de ensayo
  - El material debe estar libre de musgo y de cualquier otro defecto. Se tomaran de las probetas ensayadas.
  - Se cortan cuadros de 1 x 1 cm, y se identifican según la parte del culmo donde se está tomando (base, media y apical).
  - La probeta debe estar en condición seca. (es decir que ya no tenga más líquido que ceder).
  
- Equipo
  - Vernier para medir las dimensiones físicas de los especímenes
  - Balanza de precisión con escala de 0,1 g
  - Probeta graduada de 1 000 mL
  - Agua, para la inmersión del material
  
- Procedimiento
  - Se toma la masa del material.
  - Se toma el volumen del material por el método de desplazamiento de agua a temperatura ambiente.

Figura 32. **Medición de los especímenes**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, Facultad de Ingeniería, USAC.

- **Cálculos**

Se utiliza la siguiente ecuación para determinar la densidad seca del bambú:

$$D_s = \frac{M_s}{V_s}$$

Donde:

$D_s$  = densidad seca ( $\text{g/cm}^3$ )

$M_s$  = masa del material (g)

$V_s$  = volumen del material (cm)



#### **4.3.2.3. Densidad húmeda**

Para determinar la densidad húmeda o verde se realiza el mismo procedimiento utilizado para determinar la densidad seca, con la diferencia que las probetas deben estar verde, con un contenido de humedad mayor a 30 %.

#### **4.3.2.4. Dureza**

Con este ensayo se podrá determinar la dureza de las distintas especies de bambú, y saber si se trata de un bambú blando, duro o semiduro. Y para hacer una comparación entre especie.

- Probeta de ensayo
  - Se extrae material de la base, media y apical del culmo del bambú.
  - Se cortan probetas con dimensiones de 5 x 5 x 15 cm (en este caso por la concavidad del bambú, las dimensiones fueron menores, utilizando solo la parte más plana).
  
- Equipo
  - Vernier para medir las dimensiones físicas del espécimen.
  - Máquina de ensayo.
  - Identador (bola de acero templado)
  - Durómetro

- Procedimiento
  - Se toman las dimensiones reales de las probetas, midiendo por lo menos cuatro veces cada lado y luego sacar un promedio.
  - Se marca el centro de las probetas.
  - Se arma el sistema para el ensayo.
  - Se acomoda el material sobre la máquina de ensayos, y se aplica carga hasta que haya penetrado la mitad de la esfera en el espécimen. Cuando el material es muy delgado, se introduce la esfera solo hasta donde el material presente la primera falla.
  - Se anota la carga última, y se verifica el tipo de falla que presenten las fibras.

Figura 33. **Aplicación de carga en la prueba de dureza**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 34. **Diferentes tipos de falla en las probetas de dureza**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, Facultad de Ingeniería, USAC.

#### **4.3.2.5. Absorción**

El objetivo de este ensayo es determinar el porcentaje de agua que absorbe las probetas de bambú de un ambiente húmedo, al tener un hinchamiento en su volumen.

- Probeta de ensayo
  - El material debe estar libre de musgo, hongos, o cualquier otro defecto.
  - Deben estar en condiciones secas con un porcentaje de humedad aproximadamente de 15 %.
  - Se cortan rectángulos de 2 x 4 cm, y se identifican según la especie y la parte del culmo que se ensayó (base, media y apical), y el número de correlación de la probeta.

Figura 35. **Probetas de ensayo de la especie *G. Angustifolia* para el ensayo de absorción**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Equipo
  - Vernier para medir las dimensiones físicas de los especímenes
  - Balanza de precisión con escala de 0,1 gramos
  - Probeta graduada de 1 000 mL
  - Agua, para la inmersión de los especímenes
  - Estufa de secado
  - Desecador, para retirar la humedad de las sustancias
  
- Procedimiento
  - Se pesa y se toman las dimensiones reales del material (tomando por lo menos cuatro veces del mismo lado para luego obtener un promedio).
  - Se sumergen en agua destilada por 24 horas, para permitir la penetración del agua a través de sus superficies y queden completamente saturados.

Figura 36. **Probetas totalmente saturados**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Se extraen las probetas del agua, secándolos con un trapo, cuidando que no absorban humedad del ambiente e inmediatamente se vuelve a tomar las mediciones y su peso.
- Se acomodan dentro del desecador, para retirar la humedad del material, se tapa y se deja ahí por un periodo de cinco días aproximadamente.
- Se vuelve a tomar las dimensiones y peso, se repite hasta que tengan un peso constante.

Figura 37. **Acomodamiento de las probetas dentro del desecador**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Cálculos

$$\%ABS = \frac{D_s - D_n}{D_n} * 100$$

Donde:

$\%ABS$  = porcentaje de absorción volumétrico

$D_s$  = dimensión de las probetas en estado saturado ( $\text{cm}^3$ )

$D_n$  = dimensión de las probetas con CH normal ( $\text{cm}^3$ )

#### 4.3.2.6. Peso específico seco

Se sigue la metodología del ensayo de densidad seca, en donde las probetas deben estar en condiciones secas, con un contenido de humedad de aproximadamente 12 %.

- Cálculos

Se utiliza la siguiente ecuación para determinar el peso específico seco del bambú:

$$\gamma_s = \frac{w_s}{V_s}$$

Donde:

$\gamma_s$  = peso específico ( $\text{N/m}^3$ )

$w_s$  = peso de la probeta (N)

$V_s$  = volumen de la probeta seco ( $\text{m}^3$ )

#### **4.3.2.7. Peso específico húmedo**

Para este ensayo se sigue la metodología del ensayo de densidad húmeda. Las probetas se deben cortar verdes, con un contenido de humedad mayor de 30 %. Se realizan los mismos cálculos para determinar el peso específico seco.

#### **4.4. Procedimientos de ensayos y equipo mecánico para determinar propiedades mecánicas**

A continuación se exponen los procedimientos y el equipo requerido para llevar a cabo la investigación.

##### **4.4.1. Ensayo para la resistencia a tensión paralela a la fibra**

El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia a tracción o tensión paralela a la fibra. En ensayo consiste en aplica cargas axiales a tensión a una velocidad constante hasta su falla. Este dato servirá para el diseño de estructuras.

- Probeta de ensayo
  - Se cortaran láminas de aproximadamente 50 cm de longitud, y se identificarán si son de la parte de la base, media o apical del culmo.
  - No deben tener grietas por secado o perforaciones.
  - Se debe tomar por lo menos cuatro medidas de la sección transversal y longitudinal. Posteriormente, se determina un promedio de las medidas tomando en cuenta los dos extremos.

Figura 38. **Especímenes de ensayo para el ensayo de tensión**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, Facultad de Ingeniería, USAC.

- **Equipo**
  - Vernier con aproximación de 0,01 mm para medir las dimensiones físicas de las probetas.
  - Mordazas para evitar el deslizamiento de las probetas. Estas deben ser planas con rugosidad.
  - Máquina de ensayo con capacidad de carga de 20 toneladas o más.
  
- **Procedimiento**
  - Calibrar la máquina de ensayos.
  - Se debe armar el equipo; se colocan las mordazas en ambos extremos de la probeta.
  - Se aplica carga a cada 100 kg hasta que el material falle. Se debe registrar la carga máxima y el tipo de falla.



Figura 39. **Acomodamiento de la probeta dentro de la máquina de ensayos**



Fuente: Sección de Metales, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Cálculos

$$\sigma_u = \frac{Fu}{A}$$

Donde:

$\sigma_u$  = esfuerzo último a tensión paralelo a la fibra ( $\text{kg/cm}^2$ )

$Fu$  = carga máxima a la que la probeta falla (kg)

$A$  = área de la sección ( $\text{cm}^2$ )

#### 4.4.2. Ensayo para la resistencia a tensión perpendicular a la fibra

El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia a la tracción o tensión perpendicular a la fibra de especímenes de bambú. Consiste en aplicar cargas axiales a tensión, perpendicularmente a la sección del cilindro.

- Probeta de ensayo
  - Las probetas son cilindros de aproximadamente 10 cm de largo, sin nudo.
  - Se debe promediar por lo menos 4 medidas de las distintas dimensiones. Con una aproximación de 0,1 mm.
  - Se tomarán probetas de la base, media y apical de cada culmo. Identificando cada una de ellas. No debe tener grietas por secado, perforaciones, hongos, etcétera.
  - Se debe cortar de tal forma que queden rectos y llanos.

Figura 40. **Probetas para el ensayo de resistencia a tensión perpendicular a la fibra**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, Facultad de Ingeniería, USAC.

- **Equipo**
  - 2 dispositivos de carga que son semicilindros de madera para transmitir la carga al espécimen.
  - Vernier con aproximación de 0,01 mm.
  - Máquina de ensayo con capacidad de carga de 20 toneladas o más.

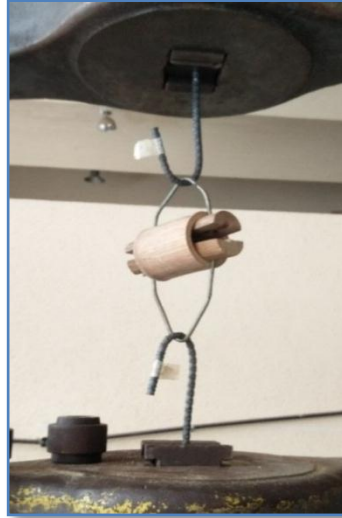
Figura 41. **Dispositivos de carga**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, Facultad de Ingeniería, USAC.

- **Procedimiento**
  - Se colocan las probetas en el dispositivo de carga; se destornilla un lado del semicilindro y se introduce dentro de la probeta, luego se atornilla, se hace lo mismo en el lado opuesto.
  - Se acomoda el sistema dentro de la máquina de ensayos. Este debe quedar alineado con el centro de la probeta.
  - Se aplica carga con un rango de velocidad entre 20 a 50 psi/s hasta que falle.
  - Se debe anotar la carga máxima, y el tipo de falla.

Figura 42. **Acomodamiento del sistema dentro de la máquina de ensayos**



Fuente: Sección de Metales, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 43. **Falla por corte**



Fuente: Sección de Metales, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Cálculos

El esfuerzo máximo de tensión o tracción perpendicular a la fibra se determinará con la siguiente ecuación:

$$\sigma_u = \frac{Fu}{2 * e * l}$$

Donde:

$\sigma_u$  = esfuerzo último a tensión perpendicular a la fibra (kg/cm<sup>2</sup>)

$Fu$  = carga máxima a la que el espécimen falla (kg)

$e$  = espesor promedio (cm)

$l$  = longitud promedio de la probeta (cm)

#### **4.4.3. Ensayo para la resistencia a compresión paralela a la fibra**

El objetivo de este ensayo es dar a conocer la resistencia a la compresión del material y su módulo de elasticidad. Consiste en aplicar una carga axial de compresión a los especímenes hasta que falle.

- Probeta de ensayo

- La probeta de ensayo no debe tener grietas, perforaciones ni hongos.
- Se cortan con una longitud de dos veces su diámetro exterior promedio aproximadamente. El corte deberá ser recto (llano y paralelo).

- Se debe marcar el material según la parte del culmo que se esté utilizando (base, media o apical).
- Se debe medir con el vernier el diámetro externo, diámetro interno y espesor de cada extremo de la probeta.
- Debe ensayarse el mismo día de corte, para que no pierda humedad.

Figura 44. **Medición del diámetro externo de las probetas**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, Facultad de Ingeniería, USAC.

- **Equipo**
  - Vernier para medir las dimensiones físicas de la probeta con aproximación de 0,1 mm.
  - Deformímetro con escala de 0,001 mm/división.
  - Máquina de ensayo con capacidad de carga de 30 toneladas. Con indicador de carga.

Figura 45. **Indicador de carga**



Fuente: Sección de Metales, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Procedimiento
  - Se arma el sistema, que consiste en la colocación de las probetas en la máquina de ensayos.
  - Se deben colocar bloques de carga de acero en los extremos de la probeta, y una lámina de neopreno duro entre el material y los bloques; para garantizar la distribución uniforme de la carga.
  - La probeta debe quedar bien alineado con el centro del bloque tanto superior como el inferior y también con el pistón de la máquina que aplica la carga.
  - Se debe aplicar carga continuamente sin bruscos, con una velocidad de carga entre los 20 a 50 psi/s, hasta que el material falle.
  - Se debe ir anotando la lectura del deformímetro a cada 500 kg, para trazar el diagrama de esfuerzo-deformación.
  - Se debe registrar la carga máxima, el tipo de falla y apariencia de la probeta.

Figura 46. Colocación del espécimen en la máquina universal



Fuente: Sección de Metales, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Cálculos

El esfuerzo máximo de compresión se determina con la siguiente ecuación:

$$\sigma_u = \frac{4 Fu}{\pi(De^2 - (De - 2e)^2)}$$

Donde:

$\sigma_u$  = esfuerzo de compresión último (kg/cm<sup>2</sup>)

$Fu$  = carga máxima a la que el espécimen falla (kg)

$De$  = diámetro exterior promedio (cm)

$e$  = espesor promedio (cm)



#### 4.4.3.1. Con un nudo

Para el ensayo a compresión del bambú con un nudo se sigue con el procedimiento anteriormente descrito. Con la única diferencia que al cortar las probetas se debe hacer de tal forma que quede un nudo aproximadamente en el centro del material.

Figura 47. **Especímenes con un nudo de la especie *G. Angustifolia***



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, Facultad de Ingeniería, USAC.

#### 4.4.3.2. Con dos nudos

Para esta variante del ensayo a compresión, se cortan las probetas al ras de los nudos en ambos extremos (detrás de los nudos, de tal forma que queden con ambos nudos), sin importar la variación de longitud de los canutos se hace así porque la longitud de cada una va variando según la parte que se esté analizando, para verificar el efecto de la esbeltez del material, y su tipo de falla, ya que la mayoría de bambú se utiliza para columnas, lo cual sufren por este tipo de falla.

Figura 48. **Falla por aplastamiento y corte de probetas con dos nudos**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, Facultad de Ingeniería, USAC.

#### 4.4.3.3. Sin nudo

En este caso las probetas de ensayos se toman dentro de los canutos (sin nudos) con una longitud de dos veces su diámetro exterior promedio. Se sigue tomando el mismo procedimiento descrito anteriormente.

Figura 49. **Fallas en las probetas después de la aplicación de carga**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, Facultad de Ingeniería, USAC.

#### 4.4.4. Ensayo para la resistencia a corte paralelo a la fibra

Este ensayo permite determinar la resistencia a corte paralelo a la fibra de especímenes de bambú. Consiste en aplicar una carga axial de compresión sobre los cilindros hasta que falle.

- Equipo
  - Vernier para medir las dimensiones físicas de las muestras.
  - Máquina de ensayo con capacidad de 20 toneladas.
  - Dispositivo de ensayo para corte; consiste en dos rotulas de acero con dos partes hueco, que no sufra deformaciones por su uso.

Figura 50. **Dispositivo para ensayo de corte paralelo a la fibra**



Fuente: Sección de Metales, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Probeta de ensayo
  - La probeta de ensayo no debe tener grietas, perforaciones ni hongos.
  - Se cortarán con una longitud de dos veces su diámetro exterior promedio aproximadamente. El corte deberá ser recto (llano y paralelo).

- Se deberá ensayar con especímenes sin nudo y con un nudo en el centro de la probeta.
- Se debe marcar el material según la parte del culmo que se esté utilizando (base, media o apical)
- Se debe ensayar el mismo día del corte para evitar la pérdida de humedad.

Figura 51. **Probetas para ensayo con nudo y sin nudo**



Fuente: Sección de Metales, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Procedimiento
  - Se calibra la máquina de ensayos. Luego se coloca la rótula en la parte inferior de la máquina; debe quedar centrada con el eje de la máquina.
  - Se coloca la probeta sobre la rótula seguidamente sobre este se coloca la otra rotula. Se debe cuidar que quede centrada el eje del espécimen con el centro del dispositivo de ensayo.
  - Se aplica carga sobre la rótula superior a una velocidad entre 20 a 50 psi/s hasta que el espécimen falla.
  - Se anota la carga máxima con la que falló el espécimen, así como el tipo de falla.

Figura 52. **Falla en la probeta de ensayo de corte**



Fuente: Sección de Metales, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Cálculos

$$\tau_u = \frac{Fu}{\Sigma(t * l)}$$

Donde:

$\tau_u$  = esfuerzo ultimo a corte (kg/cm<sup>2</sup>)

$Fu$  = carga máxima a la que el espécimen falla (N)

$t$  = espesor promedio de la probeta (cm)

$l$  = longitud promedio de la probeta (cm)

$\Sigma(t * l)$  = sumatoria de los cuatro productos de (cm<sup>2</sup>)

Nota: para la sumatoria de los cuatro productos de  $t * l$  se debe tomar el espesor y longitud (a lo largo) de cada uno de los cuatro lados de las cuatro porciones en los que se cortan de la probeta luego de ser ensayadas. O bien sacar el área de cada uno de ellos, y realizar la sumatoria.

Figura 53. **Lados por tomar en cuenta para el área paralelo al corte**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, Facultad de Ingeniería, USAC.

#### **4.4.5. Ensayo para la resistencia a flexión**

El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia a flexión del bambú y su módulo de elasticidad. Esto permite conocer dependiendo de la falla que presente si se puede o no utilizar como elemento de construcción (principalmente como viga).

- **Probeta de ensayo**
  - Las probetas de ensayo no debe tener grietas por el proceso de secado, perforaciones, hongos, etcétera. Así mismo, se deben eliminar aquellas que presenten grietas al ser cortados.
  - Se cortarán vigas con luces entre 1,50 a 2,00 metros, porque con esta dimensión fallarán por flexión, que es lo que se necesita evaluar.
  - Se debe identificar si son de la parte de la base, media o apical del culmo.
  - Deben ensayarse el mismo día del corte para evitar la pérdida de humedad.

- Equipo
  - Vernier para medir las dimensiones físicas de la probeta.
  - Deformímetro con vástago.
  - Dispositivos de apoyo y de carga. Son bloques de madera (de diferentes diámetros), tienen forma circular en la parte superior para sostener y aumentar la superficie de contacto entre el espécimen y el apoyo.
  - Lámina de neopreno para que el espécimen quede bien apoyado sobre los apoyos.
  - Riel para soportar los dispositivos de apoyo.
  - Máquina de ensayo. Con capacidad de carga de 20 toneladas.

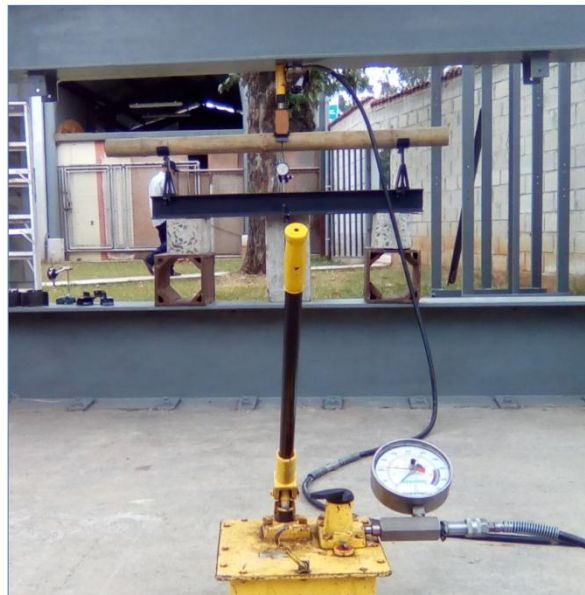
Figura 54. **Dispositivos de apoyo y de carga**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Procedimiento
  - Colocar los dispositivos de apoyo. Se debe acomodar los dispositivos de apoyo sobre el riel de tal forma que puedan desplazarse longitudinalmente sobre el riel, para acomodar el apoyo en el nudo más cercano a sus extremos.
  - Se acomoda la probeta sobre los apoyos dejando una distancia sobresaliente de cada lado. tratando que los nudos más cercanos a los extremos queden sobre los apoyos.
  - Se coloca el dispositivo de carga en el centro de la probeta (preferiblemente sobre un nudo).
  - El Deformímetro se coloca en el centro de la luz de la probeta y debe tener contacto con la parte inferior del material.

Figura 55. **Sistema para el ensayo de flexión**



Fuente: Sección de Tecnología de la Madera, Facultad de Ingeniería, USAC.



- Se aplica carga cada 50 kg tomando lectura de la deformación hasta que la probeta falla. Se anota la carga última, el tipo de falla y la apariencia de la probeta.

Figura 56. **Deformación en probeta del ensayo de flexión**



Fuente: Sección de Estructuras, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Cálculos: tomados de la norma ISO 22157
  - Módulo de ruptura (Mr.)

$$\sigma = \frac{Mc}{I}$$

Se sabe que  $\frac{I}{c} = S$ , entonces:  $\sigma = \frac{M}{S}$

Módulo de sección (S) para una circulación circular hueca:  $\frac{\pi}{4R} (R^4 - r^4)$

Momento máximo para viga simplemente apoyada:  $M = \frac{PL}{4}$

Sustituyendo con los diámetros de la sección del bambú:  $\frac{\pi(\emptyset e^4 - (\emptyset e - 2t)^4)}{32\emptyset e}$

Momento máximo para viga simplemente apoyada:  $M = \frac{PL}{4}$ , Sustituyendo:

$$\sigma = \frac{\frac{PL}{4}}{\frac{\pi(\emptyset e^4 - (\emptyset e - 2t)^4)}{32\emptyset e}}, \text{ Simplificando } \sigma = Mr. = \frac{32M\emptyset e}{\pi(\emptyset e^4 - (\emptyset e - 2t)^4)}$$

Donde:

M = momento (kg-cm)

$\emptyset e$  = diámetro externo (cm)

t = espesor (cm)

P = carga máxima (kg)

L = longitud de la luz libre (cm)

$\sigma$  = módulo de ruptura o esfuerzo máximo (kg/cm<sup>2</sup>)

- Módulo de elasticidad (E)

$$E = \frac{\text{esfuerzo}}{\text{deformacion unitaria}} = \frac{S}{\varepsilon} = \frac{P/A}{\delta/l} = \frac{Pl}{A\delta}$$

Donde:

E = módulo de elasticidad (kg/cm<sup>2</sup>)

P = fuerza aplicada (kg)

A = área de la sección transversal de la probeta (cm<sup>2</sup>)

L = longitud de la probeta (cm)

$\delta$  = deformación total (cm)

- Flecha máxima

$$\delta_{m\acute{a}x.} = \frac{PL^3}{48EI}$$

Donde:

P= carga máxima (kg)

L = luz libre entre apoyos (cm)

E = módulo de elasticidad (kg/cm<sup>2</sup>)

I = inercia (cm<sup>4</sup>)

$\delta_{m\acute{a}x.}$  = deformación o flecha máxima (cm)

- Deflexiones admisibles

En elementos de flexión de bambú, según norma E-100 para sobrecargas de servicio de todo tipo de edificaciones debe limitarse al siguiente valor:

$$\delta_{adm} = \frac{L}{350} \text{ o } 13 \text{ mm}$$

Donde:

L= luz libre entre apoyos (cm)

## **5. RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO**

### **5.1. Cálculos de las características físicas de cada una de las especies estudiadas**

Para determinar las características físicas de las tres especies de bambú analizadas, se realizaron ocho diferentes ensayos como lo son el contenido de humedad, contracción y densidad. Estos fueron desarrollados en las instalaciones de la Sección de Tecnología de la Madera de la Facultad de Ingeniería

Se realizaron doce repeticiones de cada uno de los ensayos por especie, fueron un total de treinta y seis repeticiones de cada uno, por tener tres especies distintas. En las siguientes tablas se separan los datos según la parte del culmo analizado (apical, medio y base).

Se da a conocer los cálculos de una probeta de referencia y luego encontraremos las tablas donde se realiza el mismo procedimiento para cada especie.

#### **5.1.1. Contenido de humedad**

A continuación se encuentran los datos y resultados de las pruebas de contenido de humedad.

- Contenido de humedad en estado verde

Probetas con un porcentaje de humedad mayor a 30 %

Datos probeta de referencia

Peso verde = 1,15 g

Peso secado al horno = 0,87 g

$$\%CH = \frac{P1 - P2}{P2} * 100$$

$$\%CH = \frac{1,90 - 1,45}{1,45} * 100$$

$$\%CH_{\text{verde}} = 34,50$$

Tabla VI. **Resultados del ensayo de contenido de humedad en estado verde de la especie *D. Asper***

Parte del culmo	No.	Peso verde (g)	Peso seco (g)	%H
APICAL	1	1,90	1,41	34,50
	2	1,83	1,40	30,70
	3	1,67	1,24	34,91
	4	1,98	1,44	37,73
MEDIA	1	3,35	2,33	43,91
	2	3,31	2,35	40,64
	3	3,06	2,15	42,07
	4	3,05	2,14	42,54
BASE	1	2,50	1,71	45,92
	2	2,63	1,80	45,74
	3	2,64	1,82	44,75
	4	2,65	1,82	45,53

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Resultados del ensayo de contenido de humedad en estado verde de la especie *G. Angustifolia***

Parte del culmo	No.	Peso verde (g)	Peso seco (g)	%H
APICAL	1	0,98	0,63	54,73
	2	0,99	0,64	55,12
	3	1,06	0,67	58,71
	4	0,97	0,60	63,05
MEDIA	1	1,59	0,87	83,89
	2	1,54	0,84	82,73
	3	1,78	0,94	90,39
	4	1,51	0,81	86,42
BASE	1	2,21	1,14	94,23
	2	2,05	1,05	94,81
	3	2,42	1,25	94,13
	4	2,21	1,13	95,73

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Resultados del ensayo de contenido de humedad en estado verde de la especie *G. Verticillata***

Parte del culmo	No.	Peso verde (g)	Peso seco (g)	%H
APICAL	1	1,15	0,87	31,64
	2	1,26	0,91	38,39
	3	1,20	0,86	39,78
	4	1,18	0,84	40,88
MEDIA	1	1,36	0,90	49,59
	2	1,65	1,09	51,79
	3	1,61	1,06	52,21
	4	1,63	1,07	51,60
BASE	1	1,86	1,17	59,18
	2	1,85	1,17	59,25
	3	1,83	1,17	56,51
	4	1,78	1,14	56,13

Fuente: elaboración propia.

- Contenido de humedad en estado seco

Datos probeta de referencia

Peso verde = 1,06 g

Peso secado al horno = 0,92 g

$$\%CH = \frac{P1 - P2}{P2} * 100$$

$$\%CH = \frac{1,06 - 0,92}{1,06} * 100$$

$$\%CH_{\text{seco}} = 15,22$$

Tabla IX. **Resultados del ensayo de contenido de humedad en estado seco de la especie *D. Asper***

Parte del culmo	No.	Peso normal (g)	Peso seco (g)	%H
APICAL	1	1,06	0,92	15,22
	2	0,99	0,87	13,79
	3	1,10	0,96	14,58
	4	1,05	0,92	14,21
MEDIA	1	4,05	3,44	17,73
	2	4,03	3,52	14,49
	3	3,60	3,02	19,21
	4	3,82	3,27	16,67
BASE	1	2,28	1,89	20,63
	2	2,51	2,01	24,88
	3	2,36	1,96	20,41
	4	2,44	1,99	22,67

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Resultados del ensayo de contenido de humedad en estado seco de la especie *G. Angustifolia***

Parte del culmo	No.	Peso normal (g)	Peso seco (g)	%H
APICAL	1	0,57	0,51	11,76
	2	0,53	0,47	12,77
	3	0,54	0,48	12,50
	4	0,54	0,48	12,63
MEDIA	1	0,91	0,8	13,75
	2	0,91	0,8	13,75
	3	0,90	0,79	13,92
	4	0,91	0,80	13,84
BASE	1	1,18	1,01	16,83
	2	1,21	1,05	15,24
	3	1,25	1,07	16,82
	4	1,23	1,06	16,04

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Resultados del ensayo de contenido de humedad en estado verde de la especie *G. Verticillata***

Parte del culmo	No.	Peso normal (g)	Peso seco (g)	%H
APICAL	1	1,31	1,16	12,93
	2	1,14	1,03	10,68
	3	1,12	0,99	13,13
	4	1,13	1,01	11,88
MEDIA	1	1,01	0,89	13,48
	2	0,94	0,81	16,05
	3	0,89	0,77	15,58
	4	0,92	0,79	15,82
BASE	1	1,22	1,02	19,61
	2	1,23	1,03	19,42
	3	1,14	0,99	15,15
	4	1,19	1,01	17,33

Fuente: elaboración propia.



### 5.1.2. Contracción

Se presentan los resultados de los ensayos de contracción de cada una de las tres especies estudiadas.

#### Datos probeta de referencia

Volumen verde = 12 928,68 mm<sup>3</sup>

Volumen seco = 12 453,76 mm<sup>3</sup>

$$\%C = \frac{Vv - Vs}{Vv} * 100$$

$$\%C = \frac{12\,928,68\text{ mm}^3 - 12\,453,76\text{ mm}^3}{12\,928,68\text{ mm}^3} = 2,45$$

Tabla XII. **Resultados del ensayo de porcentaje de contracción de la especie *D. Asper***

Parte del culmo	No.	bv (mm)	av (mm)	ev (mm)	Vv (mm <sup>3</sup> )	bs (mm)	as (mm)	es (mm)	Vs (mm <sup>3</sup> )	%C
APICAL	1	25,33	44,05	12,50	13 947,33	25,15	43,77	12,36	13 606,08	2,45
	2	25,99	43,75	11,77	13 383,23	25,87	42,04	11,56	12 572,36	6,06
	3	25,15	43,99	11,34	12 545,99	24,8	43,04	11,21	11 965,46	4,63
	4	25,57	43,87	11,56	12 961,89	25,34	42,54	11,39	12 270,19	5,34
MEDIA	1	24,45	46,70	13,24	15 117,63	23,27	46,41	13,14	14 190,68	6,13
	2	24,15	45,40	12,30	13 485,84	24,06	45,29	12,08	13 163,30	2,39
	3	24,44	46,89	12,33	14 130,08	24,30	46,37	12,13	13 667,97	3,27
	4	24,30	46,15	12,32	13 806,26	24,18	45,83	12,11	13 414,39	2,84
BASE	1	23,48	43,50	14,66	14 973,43	23,02	43,44	14,50	14 499,84	3,16
	2	23,80	43,35	14,99	15 465,63	23,73	43,22	14,44	14 809,82	4,24
	3	23,80	43,65	14,67	15 240,22	23,57	43,46	14,43	14 781,40	3,01
	4	23,80	43,50	14,55	15 063,62	23,11	43,34	14,44	14 457,91	4,02

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Resultados del ensayo de porcentaje de contracción de la especie *G. Angustifolia***

Parte del culmo	No.	bv (mm)	av (mm)	ev (mm)	Vv (mm <sup>3</sup> )	bs (mm)	as (mm)	es (mm)	Vs (mm <sup>3</sup> )	%C
APICAL	1	23,66	44,16	8,05	8 410,85	22,68	44,04	7,41	7 401,31	12,00
	2	24,85	43,33	7,25	7 806,44	23,22	43,08	6,37	6 372,02	18,37
	3	23,72	43,55	6,90	7 127,74	23,01	43,47	6,18	6 181,51	13,28
	4	24,29	43,44	7,08	7 463,70	23,12	43,28	6,28	6 276,89	15,90
MEDIA	1	24,14	40,85	11,80	11 636,20	23,45	40,69	10,55	10 066,60	13,49
	2	23,85	41,05	10,40	10 182,04	22,8	40,8	9,55	8 883,79	12,75
	3	23,95	40,83	11,92	11 656,31	22,94	40,66	10,55	9 840,41	15,58
	4	23,90	40,94	11,16	10 919,68	22,87	40,73	10,05	9 361,53	14,27
BASE	1	24,34	43,1	12,4	13 008,27	23,75	43,05	11,70	11 962,52	8,04
	2	24,2	43,15	11,95	12 478,55	23,11	43,12	11,65	11 609,26	6,97
	3	23,9	43,85	12,9	13 519,39	23,4	42,65	11,22	11 197,67	17,17
	4	24,05	43,50	14,55	15 221,85	23,26	42,89	11,44	11 404,02	25,08

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Resultados del ensayo de porcentaje de contracción de la especie *G. Verticillata***

Parte del culmo	No.	bv (mm)	av (mm)	ev (mm)	Vv (mm <sup>3</sup> )	bs (mm)	as (mm)	es (mm)	Vs (mm <sup>3</sup> )	%C
APICAL	1	23,15	47,12	5,65	6 163,18	22,3	47,05	5,5	5 770,68	6,37
	2	23,7	46,45	5,3	5 834,58	23,45	46,4	5,15	5 603,61	3,96
	3	23,45	47,02	6,1	6 725,98	23,1	47	5,82	6 318,77	6,05
	4	23,58	46,74	5,70	6 280,13	23,28	46,70	5,49	5 961,88	5,07
MEDIA	1	23,85	44,1	8,67	9 118,98	22,95	44,05	8,18	8 269,55	9,31
	2	23,26	43,26	7,65	7 697,64	22,95	43,2	7,5	7 435,80	3,40
	3	23,9	43,9	8,7	9 128,13	23,35	43,85	8,5	8 703,13	4,66
	4	23,58	43,58	8,18	8 400,76	23,15	43,53	8,00	8 060,83	4,05
BASE	1	23,55	43,7	7,45	7 667,06	23,1	43,5	7,17	7 204,77	6,03
	2	24	43,6	7,25	7 586,40	23,65	43,5	7,05	7 252,86	4,40
	3	23,55	43,65	7,55	7 761,08	23	43,6	7,25	7 270,30	6,32
	4	23,78	43,63	7,40	7 675,16	23,33	43,55	7,15	7 263,00	5,37

Fuente: elaboración propia.

### 5.1.3. Densidad seca

Se presentan los resultados de los ensayos para determinar la densidad en estado seco de cada una de las tres especies estudiadas, clasificando según la parte del culmo analizado (apical, medio y base).

#### Datos probeta No.1

Masa seca = 0,92 g

Volumen = 1,16 cm<sup>3</sup>

$$D_s = \frac{M_s}{V_s}$$

$$D_s = \frac{0,92 \text{ g}}{1,16 \text{ cm}^3} = 0,79 \text{ g/cm}^3$$

Tabla XV. **Resultados del ensayo de densidad en estado seco de la especie *D. Asper***

Parte del culmo	No.	Masa (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad (kg/cm <sup>3</sup> )
APICAL	1	0,92	1,16	0,79	794,86
	2	0,87	1,11	0,78	781,99
	3	0,96	1,24	0,78	775,58
	4	0,92	1,17	0,78	778,98
MEDIA	1	1,25	2,03	0,62	617,15
	2	1,22	2,03	0,60	600,25
	3	1,34	2,13	0,63	629,76
	4	1,45	2,08	0,70	697,00
BASE	1	1,77	2,51	0,71	706,37
	2	1,88	2,64	0,71	711,13
	3	1,73	2,45	0,71	707,46
	4	1,81	2,54	0,71	709,67

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Resultados del ensayo de densidad en estado seco de la especie *G. Angustifolia***

Parte del culmo	No.	Masa (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad (kg/cm <sup>3</sup> )
APICAL	1	0,51	0,91	0,56	557,98
	2	0,49	0,81	0,60	603,43
	3	0,52	0,82	0,63	630,33
	4	0,48	0,82	0,58	580,12
MEDIA	1	0,71	1,33	0,54	535,11
	2	0,66	1,25	0,53	529,29
	3	0,73	1,15	0,63	634,23
	4	0,72	1,22	0,59	592,40
BASE	1	0,76	1,52	0,50	500,02
	2	0,87	1,42	0,61	612,94
	3	0,79	1,37	0,58	575,10
	4	0,77	1,40	0,55	551,39

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Resultados del ensayo de densidad en estado seco de la especie *G. Verticillata***

Parte del culmo	No.	Masa (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad (kg/cm <sup>3</sup> )
APICAL	1	1,16	1,95	0,60	596,17
	2	1,03	1,98	0,52	521,40
	3	0,99	1,93	0,51	512,85
	4	1,01	1,85	0,55	545,82
MEDIA	1	0,89	1,88	0,47	472,65
	2	0,81	1,85	0,44	436,90
	3	0,77	1,81	0,43	425,45
	4	0,79	1,83	0,43	430,75
BASE	1	1,02	1,88	0,54	543,18
	2	1,03	2,64	0,39	389,61
	3	0,99	2,44	0,41	405,22
	4	1,01	2,54	0,40	397,18

Fuente: elaboración propia.

#### 5.1.4. Densidad húmeda

Se presentan los resultados de los ensayos de densidad en estado húmedo o verde de cada una de las tres especies estudiadas, con un contenido de humedad mayor a 30 %.

##### Datos probeta No.1

Masa verde = 1,90 g

Volumen = 2,31 cm<sup>3</sup>

$$Dh = \frac{Mh}{Vh}$$

$$Dh = \frac{1,90 \text{ g}}{2,31 \text{ cm}^3} = 0,82 \text{ g/cm}^3$$

Tabla XVIII. **Resultados del ensayo de densidad en estado verde de la especie *D. Asper***

Parte del culmo	No.	Masa (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
APICAL	1	1,90	2,31	0,82	820,43
	2	1,83	2,22	0,82	824,28
	3	1,67	2,02	0,82	824,62
	4	1,98	2,16	0,92	916,43
MEDIA	1	3,35	3,43	0,98	975,38
	2	3,31	3,91	0,85	845,27
	3	3,06	3,81	0,80	801,84
	4	3,05	3,77	0,81	808,06
BASE	1	2,50	3,07	0,81	813,11
	2	2,63	2,69	0,98	977,43
	3	2,64	2,87	0,92	916,56
	4	2,65	3,10	0,86	856,72

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Resultados del ensayo de densidad en estado verde de la especie *G. Angustifolia***

Parte del culmo	No.	Masa (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
APICAL	1	0,98	1,20	0,81	810,22
	2	0,99	1,11	0,89	891,89
	3	1,06	1,22	0,86	864,75
	4	0,97	1,31	0,74	743,00
MEDIA	1	1,59	1,88	0,84	843,84
	2	1,66	2,00	0,83	830,00
	3	1,78	2,02	0,88	879,77
	4	1,51	1,88	0,80	803,19
BASE	1	2,21	2,64	0,84	836,42
	2	2,05	2,66	0,77	768,80
	3	2,42	2,53	0,96	955,05
	4	2,21	2,42	0,91	911,71

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Resultados del ensayo de densidad en estado verde de la especie *G. Verticillata***

Parte del culmo	No.	Masa (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
APICAL	1	1,15	1,48	0,77	772,80
	2	1,26	1,46	0,86	862,42
	3	1,20	1,83	0,65	652,63
	4	1,18	1,56	0,76	760,35
MEDIA	1	1,36	1,88	0,72	720,74
	2	1,65	1,85	0,89	887,29
	3	1,61	1,90	0,85	845,88
	4	1,63	1,80	0,90	903,26
BASE	1	1,86	2,32	0,80	801,06
	2	1,85	2,13	0,87	868,61
	3	1,83	2,11	0,86	864,93
	4	1,78	2,05	0,87	867,76

Fuente: elaboración propia.

### 5.1.5. Dureza

Se presentan los resultados de los ensayos de dureza de cada una de las especies, donde solo se toman los datos de carga última soportada por el material.

#### Datos probeta No.1

Espesor: 0,92 cm

Longitud: 10,66 cm

Ancho: 4,09 cm

Dureza = 482,17 kg

Tabla XXI. **Resultados del ensayo de dureza de la especie *D. Asper***

Parte del culmo	No.	Espesor (cm)	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Dureza (kg)
APICAL	1	0,92	10,66	4,09	482,17
	2	0,75	11,19	3,93	375,02
	3	0,78	11,18	4,22	401,81
	4	0,77	11,19	4,08	391,09
MEDIA	1	0,99	10,48	4,20	401,81
	2	0,96	10,49	5,26	348,23
	3	0,97	10,52	5,33	375,02
	4	0,97	10,51	5,30	364,31
BASE	1	1,14	10,21	3,97	294,66
	2	1,16	10,74	4,55	321,45
	3	1,08	10,73	5,06	321,45
	4	1,12	10,74	4,81	324,12

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Resultados del ensayo de dureza de la especie G. *Angustifolia***

Parte del culmo	No.	Espesor (cm)	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Dureza (kg)
APICAL	1	1,12	13,2	5,38	321,45
	2	1,05	13,8	5,09	294,66
	3	1,04	13,8	5,01	294,66
	4	1,05	13,80	5,05	297,34
MEDIA	1	1,10	14,30	5,01	267,87
	2	1,13	14,20	5,26	267,87
	3	1,26	14,10	5,33	321,45
	4	1,20	14,15	5,30	297,34
BASE	1	1,17	11,13	5,25	125,90
	2	1,15	11,20	5,20	126,44
	3	1,12	11,10	5,15	141,97
	4	1,14	11,15	5,18	133,94

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Resultados del ensayo de dureza de la especie G. *Verticillata***

Parte del culmo	No.	Espesor (cm)	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Dureza (kg)
APICAL	1	0,66	10,63	4,79	401,81
	2	0,67	10,64	4,86	428,59
	3	0,66	10,58	4,38	375,02
	4	0,66	10,61	4,62	404,49
MEDIA	1	0,91	10,57	4,69	321,45
	2	0,95	10,60	4,20	348,23
	3	0,96	10,64	4,26	321,45
	4	0,96	10,62	4,23	337,52
BASE	1	1,13	10,64	5,31	294,66
	2	1,17	10,65	5,10	241,08
	3	1,09	10,67	5,25	214,30
	4	1,13	10,66	5,18	230,37

Fuente: elaboración propia.



### 5.1.6. Absorción

Se presentan los resultados de los ensayos del porcentaje de absorción de las tres especies analizadas.

#### Datos probeta No.1

Peso saturado = 12,54 g

Peso normal = 9,99 g

$$\%ABS = \frac{Y_{sat} - Y_n}{Y_n} * 100$$

$$\% ABS = \frac{12,54g - 9,99g}{9,99g} = 25,53 \%$$

Tabla XXIV. **Resultados del ensayo de porcentaje de absorción de la especie *D. Asper***

Parte del culmo	No.	Peso saturado (g)	Peso seco (g)	% ABS
APICAL	1	12,54	9,99	25,53
	2	11,90	9,16	29,91
	3	10,53	8,68	21,31
	4	11,66	9,28	25,66
MEDIA	1	13,51	10,86	24,40
	2	14,61	10,91	33,91
	3	15,39	12,19	26,25
	4	14,50	11,32	28,12
BASE	1	14,55	10,88	33,73
	2	13,84	10,80	28,15
	3	18,75	14,69	27,64
	4	15,71	12,12	29,61

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Resultados del ensayo de porcentaje de absorción de la especie *G. Angustifolia***

Parte del culmo	No.	Peso saturado (g)	Peso seco (g)	% ABS
APICAL	1	7,30	5,52	32,25
	2	7,12	5,49	29,69
	3	6,98	5,22	33,72
	4	7,13	5,41	31,85
MEDIA	1	9,04	6,99	29,33
	2	8,37	6,37	31,40
	3	8,84	6,56	34,76
	4	8,75	6,64	31,78
BASE	1	11,96	9,02	32,59
	2	11,44	8,55	33,80
	3	10,97	8,24	33,13
	4	11,46	8,60	33,17

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Resultados del ensayo de porcentaje de absorción de la especie *G. Verticillata***

Parte del culmo	No.	Peso saturado (g)	Peso seco (g)	% ABS
APICAL	1	6,22	5,22	19,16
	2	6,24	4,88	27,87
	3	6,40	5,01	27,74
	4	6,29	5,04	24,82
MEDIA	1	8,31	6,65	24,96
	2	7,23	5,88	22,96
	3	7,89	6,51	21,20
	4	7,81	5,55	40,72
BASE	1	7,29	5,66	28,80
	2	7,20	5,61	28,34
	3	7,40	5,76	28,47
	4	7,30	5,68	28,54

Fuente: elaboración propia.

### 5.1.7. Peso específico seco

A continuación se presentan los resultados de los ensayos de peso específico en estado seco de cada una de las tres especies estudiadas.

#### Datos probeta de referencia

Peso seco = 9,02E-03 N

Volumen = 1,16E-06 m<sup>3</sup>

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

$$\gamma_s = \frac{9,02E-03 \text{ N}}{1,16E-06 \text{ m}^3} = 0,82 \text{ N/m}^3$$

Tabla XXVII. **Resultados del ensayo de peso específico seco de la especie**  
**D. Asper**

Parte del culmo	No.	Peso (N)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Peso específico (N/m <sup>3</sup> )
APICAL	1	9,02E-03	1,16E-06	7 789,66
	2	8,53E-03	1,11E-06	7 663,54
	3	9,41E-03	1,24E-06	7 600,67
	4	8,97E-03	1,17E-06	7 634,05
MEDIA	1	1,23E-02	2,03E-06	6 048,04
	2	1,20E-02	2,03E-06	5 882,43
	3	1,31E-02	2,13E-06	6 171,61
	4	1,42E-02	2,08E-06	6 830,61
BASE	1	1,73E-02	2,51E-06	6 922,40
	2	1,84E-02	2,64E-06	6 969,07
	3	1,70E-02	2,45E-06	6 933,10
	4	1,77E-02	2,54E-06	6 954,72

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. Resultados del ensayo de peso específico seco de la especie  
*G. Angustifolia*

Parte del culmo	No.	Peso (N)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Peso específico (N/m <sup>3</sup> )
APICAL	1	5,00E-03	9,14E-07	5 468,16
	2	4,61E-03	8,12E-07	5 672,21
	3	4,70E-03	8,25E-07	5 702,10
	4	4,66E-03	8,19E-07	5 685,22
MEDIA	1	7,84E-03	1,33E-06	5 908,80
	2	7,84E-03	1,25E-06	6 287,29
	3	7,74E-03	1,15E-06	6 726,26
	4	7,79E-03	1,22E-06	6 410,21
BASE	1	9,90E-03	1,52E-06	6 512,14
	2	1,03E-02	1,42E-06	7 249,66
	3	1,05E-02	1,37E-06	7 633,48
	4	1,04E-02	1,40E-06	7 438,74

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. Resultados del ensayo de peso específico seco de la especie  
*G. Verticillata*

Parte del culmo	No.	Peso (N)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Peso específico (N/m <sup>3</sup> )
APICAL	1	1,14E-02	1,95E-06	5 842,49
	2	1,01E-02	1,98E-06	5 109,74
	3	9,70E-03	1,93E-06	5 025,91
	4	9,90E-03	1,85E-06	5 349,01
MEDIA	1	8,72E-03	1,88E-06	4 631,97
	2	7,94E-03	1,85E-06	4 281,60
	3	7,55E-03	1,81E-06	4 169,40
	4	7,74E-03	1,83E-06	4 221,31
BASE	1	1,00E-02	1,88E-06	5 323,18
	2	1,01E-02	2,64E-06	3 818,16
	3	9,70E-03	2,44E-06	3 971,15
	4	9,90E-03	2,54E-06	3 892,39

Fuente: elaboración propia.

### 5.1.8. Peso específico húmedo

A continuación se presentan los resultados de los ensayos de peso específico en estado verde de cada una de las tres especies estudiadas.

Datos probeta de referencia

Peso húmedo = 1,86E-02 N

Volumen = 2,31E-06 m<sup>3</sup>

$$\gamma_h = \frac{WS}{V_S}$$

$$\gamma_h = \frac{1,86E-02 \text{ N}}{2,31E-06 \text{ m}^3} = 8040,21 \text{ N/m}^3$$

Tabla XXX. **Resultados del ensayo de peso específico verde de la especie *D. Asper***

Parte del culmo	No.	Peso (N)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Peso específico (N/m <sup>3</sup> )
APICAL	1	1,86E-02	2,31E-06	8 040,21
	2	1,79E-02	2,22E-06	8 077,93
	3	1,63E-02	2,02E-06	8 081,25
	4	1,94E-02	2,16E-06	8 981,06
MEDIA	1	3,28E-02	3,43E-06	9 558,72
	2	3,24E-02	3,91E-06	8 283,63
	3	2,99E-02	3,81E-06	7 858,01
	4	2,99E-02	3,77E-06	7 918,96
BASE	1	2,45E-02	3,07E-06	7 968,52
	2	2,57E-02	2,69E-06	9 578,78
	3	2,58E-02	2,87E-06	8 982,27
	4	2,60E-02	3,10E-06	8 395,82

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. Resultados del ensayo de peso específico verde de la especie  
***G. Angustifolia***

Parte del culmo	No.	Peso (N)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Peso específico (N/m <sup>3</sup> )
APICAL	1	9,56E-03	1,20E-06	7 940,14
	2	9,70E-03	1,11E-06	8 740,54
	3	1,03E-02	1,22E-06	8 474,59
	4	9,54E-03	1,31E-06	7 281,42
MEDIA	1	1,56E-02	1,88E-06	8 269,59
	2	1,63E-02	2,00E-06	8 134,00
	3	1,74E-02	2,02E-06	8 621,71
	4	1,48E-02	1,88E-06	7 871,28
BASE	1	2,16E-02	2,64E-06	8 196,88
	2	2,00E-02	2,66E-06	7 534,21
	3	2,37E-02	2,53E-06	9 359,50
	4	2,16E-02	2,42E-06	8 934,73

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. Resultados del ensayo de peso específico verde de la especie  
***G. Verticillata***

Parte del culmo	No.	Peso (N)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Peso específico (N/m <sup>3</sup> )
APICAL	1	1,12E-02	1,48E-06	7 573,41
	2	1,23E-02	1,46E-06	8 451,67
	3	1,17E-02	1,83E-06	6 395,75
	4	1,16E-02	1,56E-06	7 451,46
MEDIA	1	1,33E-02	1,88E-06	7 063,30
	2	1,61E-02	1,85E-06	8 695,41
	3	1,57E-02	1,90E-06	8 289,62
	4	1,59E-02	1,80E-06	8 851,96
BASE	1	1,82E-02	2,32E-06	7 850,42
	2	1,81E-02	2,13E-06	8 512,38
	3	1,79E-02	2,11E-06	8 476,30
	4	1,74E-02	2,05E-06	8 504,05

Fuente: elaboración propia.

## 5.2. Cálculos de esfuerzos de propiedades mecánicas de cada una de las especies estudiadas

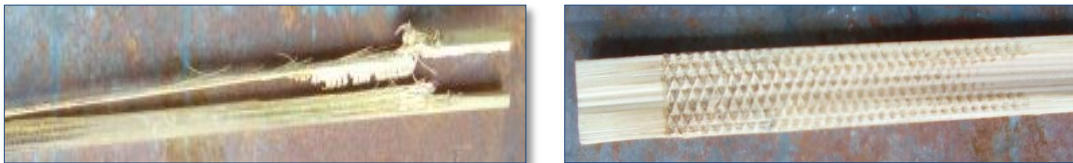
A continuación se presentan los resultados de los cálculos obtenidos de los ensayos para determinar las propiedades mecánicas del bambú.

### 5.2.1. Esfuerzo último de tensión paralela a la fibra

Esta prueba no se pudo completar, por fallas en el sistema del equipo de ensayo. Originalmente, se habían cortado las probetas como se especifica en la norma ASTM D143, pero fallaban a corte debido a la posición en que se ejercía la fuerza, dando un resultado erróneo de lo que se esperaba. Por esta razón, se decide optar por fabricar nuevas probetas, en forma de láminas con una longitud de 50 centímetros y una pulgada de ancho aproximadamente.

Con esta modificación las mordazas no pudieron evitar el deslizamiento, aun con un cambio de mordazas con dientes mucho más finos, debido a la fricción que existe en la superficie de las mordazas y el bambú que es un material liso por naturaleza. Así mismo, otras fallaban por rajadura por la fuerza que las mordazas ejercían sobre ellas, esto se debe a la edad del bambú, el espesor de pared tan pequeño en el caso de la *G. Verticillata*.

Figura 57. **Fallas en las probetas de tensión paralela a la fibra**



Fuente: elaboración propia.

- Esfuerzo ultimo de tensión perpendicular a la fibra

Se calcula de la siguiente manera el esfuerzo perpendicular a la fibra, las cuales se resume en las siguientes tablas.

Datos probeta de referencia

Fu = 3 147,75 Kg

De = 72,89 mm

Espesor = 11,03 mm

$$\sigma_u = \frac{Fu}{2 * e * l}$$

$$\sigma_u = \frac{89,00 \text{ kg}}{2 * 0,72 \text{ cm} * 10,20 \text{ cm}} = 6,09 \text{ kg/cm}^2$$

**Tabla XXXIII. Datos y resultados del ensayo de tensión perpendicular a la fibra de la especie *D. Asper***

Parte del culmo	No.	e (cm)	L (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	F (kg)	σu (kg/cm <sup>2</sup> )	σu (Mpa)
APICAL	1	0,72	10,20	14,63	89,00	6,09	0,60
	2	0,72	10,30	14,75	93,51	6,34	0,62
	3	0,72	10,40	14,87	98,00	6,59	0,65
	4	0,72	10,35	14,81	95,75	6,46	0,63
MEDIA	1	0,73	10,02	14,54	90,00	6,19	0,61
	2	0,73	10,20	14,95	85,03	5,69	0,56
	3	0,74	10,10	14,95	85,00	5,69	0,56
	4	0,74	10,15	14,95	85,01	5,69	0,56
BASE	1	0,99	10,05	19,82	130,00	6,56	0,64
	2	1,00	10,08	20,15	127,51	6,33	0,62
	3	1,01	10,10	20,49	125,00	6,10	0,60
	4	1,01	10,09	20,32	126,25	6,21	0,61

Fuente: elaboración propia.



Tabla XXXIV. Datos y resultados del ensayo de tensión perpendicular a la fibra de la especie *G. Angustifolia*

Parte del culmo	No.	e (cm)	L (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	F (kg)	$\sigma_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (Mpa)
APICAL	1	0,57	10,01	11,33	109,00	9,62	0,94
	2	0,53	10,01	10,64	103,50	9,73	0,95
	3	0,50	10,00	9,95	98,00	9,85	0,97
	4	0,51	10,00	10,29	100,75	9,79	0,96
MEDIA	1	0,68	10,55	14,32	117,00	8,17	0,80
	2	0,68	10,53	14,31	112,04	7,83	0,77
	3	0,68	10,50	14,30	107,00	7,48	0,73
	4	0,68	10,51	14,30	109,52	7,66	0,75
BASE	1	1,11	10,55	23,41	200,00	8,54	0,84
	2	0,97	10,55	20,44	180,00	8,81	0,86
	3	0,83	10,55	17,47	160,00	9,16	0,90
	4	0,90	10,55	18,96	170,00	8,97	0,88

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. Datos y resultados del ensayo de tensión perpendicular a la fibra de la especie *G. Verticillata*

Parte del culmo	No.	e (cm)	L (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	F (kg)	$\sigma_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (Mpa)
APICAL	1	0,71	10,20	14,39	93,00	6,46	0,63
	2	0,64	10,20	12,96	83,00	6,41	0,63
	3	0,56	10,20	11,52	73,00	6,34	0,62
	4	0,60	10,20	12,24	78,00	6,37	0,63
MEDIA	1	0,96	10,35	19,85	132,00	6,65	0,65
	2	0,95	10,33	19,72	110,97	5,63	0,55
	3	0,95	10,30	19,59	90,00	4,60	0,45
	4	0,95	10,31	19,65	100,48	5,11	0,50
BASE	1	0,74	10,20	15,06	3400	2,26	0,22
	2	0,72	10,30	14,92	45,76	3,07	0,30
	3	0,71	10,40	14,77	58,00	3,93	0,39
	4	0,72	10,35	14,85	51,88	3,49	0,34

Fuente: elaboración propia.

## 5.2.2. Esfuerzo máximo de compresión paralela a la fibra

Se presentan los resultados de los esfuerzos de compresión paralela a la fibra, analizadas en tres diferentes formas: con nudo, sin nudo y con dos nudos respectivamente.

### 5.2.2.1. Con un nudo

#### Datos probeta No.1

Fu = 3 079,32 Kg

De = 72,89 mm

Espesor = 11,03 mm

$$\sigma_u = \frac{4Fu}{\pi(De^2 - (De - 2e)^2)} = 144,16 \text{ kg/cm}^2$$

Tabla XXXVI. Datos y resultados del ensayo de compresión paralela a la fibra con un nudo de la especie *D. Asper*

Parte del culmo	No.	Ø ext. (mm)	Ø int. (mm)	e (mm)	F (kg)	$\sigma_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (Mpa)
APICAL	1	72,89	61,91	10,98	3 079,32	144,16	14,14
	2	74,83	63,90	10,94	2 860,26	130,30	12,78
	3	76,77	65,88	10,89	3 000,00	133,10	13,05
	4	75,80	64,89	10,91	2 867,15	128,88	12,64
MEDIA	1	77,99	66,10	11,89	3 660,97	148,27	14,54
	2	76,40	64,49	11,91	3 399,33	140,89	13,82
	3	74,81	62,88	11,93	3 421,47	145,20	14,24
	4	75,60	63,69	11,92	3 410,40	143,02	14,03
BASE	1	78,00	66,26	11,74	4 037,33	165,24	16,20
	2	79,76	67,63	12,13	3 695,18	143,41	14,06
	3	81,52	69,00	12,52	3 832,04	141,23	13,85
	4	80,64	68,32	12,32	3 763,61	142,32	13,96

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Datos y resultados del ensayo de compresión paralela a la fibra con un nudo de la especie *G. Angustifolia***

Parte del culmo	No.	Ø ext. (mm)	Ø int. (mm)	e (mm)	F (kg)	σu (kg/cm <sup>2</sup> )	σu (Mpa)
APICAL	1	61,07	46,78	14,29	2 395,03	114,04	11,18
	2	60,56	47,12	13,45	2 645,33	132,91	13,03
	3	60,05	47,45	12,60	2 189,74	116,56	11,43
	4	60,31	47,28	13,02	2 417,54	124,96	12,25
MEDIA	1	74,60	59,33	15,27	2 463,46	86,57	8,49
	2	72,30	57,62	14,68	2 614,00	98,35	9,65
	3	70,00	55,90	14,10	2 723,49	109,99	10,79
	4	71,15	56,76	14,39	2 668,74	104,00	10,20
BASE	1	75,00	58,02	16,98	2 668,74	86,23	8,46
	2	77,67	60,62	17,05	2 733,67	84,21	8,26
	3	80,33	63,22	17,11	2 737,17	80,53	7,90
	4	79,00	61,92	17,08	2 735,42	82,33	8,07

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Datos y resultados del ensayo de compresión paralela a la fibra con un nudo de la especie *G. Verticillata***

Parte del culmo	No.	Ø ext. (mm)	Ø int. (mm)	e (mm)	F (kg)	σu (kg/cm <sup>2</sup> )	σu (Mpa)
APICAL	1	65,58	53,70	11,90	3 010,89	150,00	14,71
	2	66,72	54,84	11,90	3 079,32	150,29	14,74
	3	67,87	55,98	11,89	3 099,85	148,28	14,54
	4	67,30	55,41	11,89	3 098,63	149,71	14,68
MEDIA	1	71,96	59,80	12,16	3 147,75	137,82	13,52
	2	71,16	59,11	12,14	3 216,18	142,90	14,01
	3	70,36	58,42	12,12	3 353,04	151,22	14,83
	4	70,76	58,76	12,13	3 284,61	147,03	14,42
BASE	1	73,43	58,42	13,21	3 489,90	139,62	13,69
	2	73,49	59,39	13,21	3 500,84	139,96	13,73
	3	73,55	60,35	13,20	3 558,32	142,15	13,94
	4	73,52	59,87	13,21	3 529,58	141,05	13,83

Fuente: elaboración propia.

### 5.2.2.2. Sin nudo

Datos probeta de referencia

Fu = 3 147,75 Kg

De = 72,89 mm

Espesor = 11,03 mm

$$\sigma_u = \frac{4 Fu}{\pi(De^2 - (De - 2e)^2)}$$

$$\sigma_u = \frac{4 (3\,763,61\text{ kg})}{\pi(6,58\text{cm}^2 - (6,58\text{cm} - 2(1,66\text{cm}))^2)} = 146,41\text{ Kg/cm}^2$$

Tabla XXXIX. **Datos y resultados del ensayo de compresión paralela a la fibra sin nudos de la especie *D. Asper***

Parte del culmo	No.	Ø ext. (mm)	Ø int. (mm)	e (mm)	F (kg)	σu (kg/cm <sup>2</sup> )	σu (Mpa)
APICAL	1	65,84	49,22	16,63	3 763,61	146,41	14,36
	2	68,13	50,85	17,28	3 804,67	137,84	13,52
	3	70,41	52,47	17,93	3 832,04	129,62	12,71
	4	69,27	51,66	17,61	3 838,88	134,35	13,18
MEDIA	1	71,70	48,20	23,50	3 832,04	107,67	10,56
	2	74,10	49,22	24,88	3 702,03	96,22	9,44
	3	76,50	51,22	25,28	3 558,32	118,39	11,61
	4	75,30	50,22	25,08	4 044,17	102,20	10,02
BASE	1	79,01	51,20	27,81	4 516,33	100,95	9,90
	2	79,68	52,20	27,48	4 317,89	95,80	9,39
	3	80,36	53,20	27,16	4 105,76	90,46	8,87
	4	80,02	52,70	27,32	4 218,67	93,27	9,15

Fuente: elaboración propia.

Tabla XL. **Datos y resultados del ensayo de compresión paralela a la fibra sin nudos de la especie *G. Angustifolia***

Parte del culmo	No.	Ø ext. (mm)	Ø int. (mm)	e (mm)	F (kg)	$\sigma_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (Mpa)
APICAL	1	62,30	47,20	15,10	3 079,32	137,52634	13,49
	2	65,00	48,14	16,86	2 983,52	117,02390	11,48
	3	66,02	48,50	17,52	2 874,03	107,66283	10,56
	4	65,51	48,32	17,19	2 744,02	105,16295	10,31
MEDIA	1	65,55	49,11	16,44	2 600,31	102,51896	10,05
	2	64,18	46,11	18,07	2 572,94	98,27829	9,64
	3	62,81	43,10	19,71	2 531,88	94,87178	9,30
	4	68,00	48,30	19,70	2 572,94	86,07298	8,44
BASE	1	74,66	51,30	23,36	3 421,47	90,88080	8,91
	2	77,50	56,80	20,70	3 394,09	91,90253	9,01
	3	80,33	62,30	18,03	3 353,04	95,00126	9,32
	4	78,91	59,55	19,36	3 380,41	93,30900	9,15

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLI. **Datos y resultados del ensayo de compresión paralela a la fibra sin nudos de la especie *G. Verticillata***

Parte del culmo	No.	Ø ext. (mm)	Ø int. (mm)	e (mm)	F (kg)	$\sigma_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (Mpa)
APICAL	1	60,74	48,72	12,02	2 737,17	148,76327	14,59
	2	67,54	54,00	13,54	2 812,44	122,42647	12,01
	3	74,34	59,28	15,06	2 874,03	102,46159	10,05
	4	70,94	56,64	14,30	3 086,16	121,27259	11,89
MEDIA	1	70,42	53,82	16,61	3 284,61	116,98367	11,47
	2	71,64	54,87	16,77	3 223,02	111,51481	10,94
	3	72,85	55,92	16,93	3 147,75	105,85137	10,38
	4	72,24	55,40	16,85	3 359,88	114,59935	11,24
BASE	1	74,50	55,92	18,58	3 558,32	109,02956	10,69
	2	73,85	54,46	19,39	3 633,60	109,51855	10,74
	3	73,20	52,99	20,21	3 695,18	109,83123	10,77
	4	73,53	53,90	19,63	3 671,23	110,47490	10,83

Fuente: elaboración propia.

### 5.2.2.3. Con dos nudos

Datos probeta No.1

Fu = 3 147,75 Kg

De = 72,89 mm

Espesor = 11,03 mm

$$\sigma_u = \frac{4 Fu}{\pi(De^2 - (De - 2e)^2)}$$

$$\sigma_u = \frac{4 * (3\,763,61\,kg)}{\pi(6,58cm^2 - (6,58cm - 2(1,66cm))^2)} = 146,41\,Kg/cm^2$$

Tabla XLII. **Datos y resultados del ensayo de compresión paralela a la fibra con dos nudos de la especie *D. Asper***

Parte del culmo	No.	Ø ext. (mm)	Ø int. (mm)	e (mm)	F (kg)	σu (kg/cm <sup>2</sup> )	σu (Mpa)
APICAL	1	66,03	43,74	22,37	3 865,37	126,00	12,36
	2	68,70	46,61	22,13	4 555,61	140,71	13,80
	3	71,37	49,48	21,89	5 245,85	154,15	15,12
	4	70,03	48,04	22,01	4 900,73	147,58	14,47
MEDIO	1	75,53	50,40	25,27	4 624,64	115,89	11,36
	2	76,02	49,94	23,58	4 262,26	109,72	10,76
	3	76,50	49,48	21,89	3 899,88	103,83	10,18
	4	76,26	49,71	22,74	4 081,07	106,74	10,47
BASE	1	80,31	50,80	25,78	4 831,71	109,42	10,73
	2	80,46	50,02	28,57	4 831,71	103,74	10,17
	3	80,61	49,24	31,37	4 831,71	99,56	9,76
	4	80,54	49,63	29,97	4 831,71	101,48	9,95

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIII. Datos y resultados del ensayo de compresión paralela a la fibra con dos nudos de la especie *G. Angustifolia*

Parte del culmo	No.	Ø ext. (mm)	Ø int. (mm)	e (mm)	F (kg)	σ <sub>u</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	σ <sub>u</sub> (Mpa)
APICAL	1	62,30	43,31	18,11	2 622,93	104,33	10,23
	2	61,30	40,62	19,72	2 899,02	112,53	11,04
	3	60,31	37,93	21,33	3 175,12	121,57	11,92
	4	60,80	39,28	20,53	3 037,07	116,94	11,47
MEDIO	1	68,46	43,31	23,22	2 968,05	89,93	8,82
	2	69,46	47,82	22,96	2 726,46	81,30	7,97
	3	70,45	52,34	22,69	2 484,88	72,99	7,16
	4	69,95	50,08	22,82	2 605,67	77,11	7,56
BASE	1	81,22	43,31	24,89	3 106,10	70,52	6,92
	2	79,37	48,30	24,68	2 657,44	62,67	6,15
	3	77,52	53,30	24,48	2 208,78	54,16	5,31
	4	78,44	50,80	24,58	2 433,11	58,50	5,74

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIV. Datos y resultados del ensayo de compresión paralela a la fibra con dos nudos de la especie *G. Verticillata*

Parte del culmo	No.	Ø ext. (mm)	Ø int. (mm)	e (mm)	F (kg)	σ <sub>u</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	σ <sub>u</sub> (Mpa)
APICAL	1	65,69	46,11	19,58	4 624,64	163,05	15,99
	2	67,51	46,47	21,04	4 721,27	153,70	15,07
	3	69,33	46,83	22,50	4 831,71	145,95	14,31
	4	68,42	46,65	21,77	4 776,49	149,70	14,68
MEDIA	1	71,07	47,77	23,34	3 589,27	90,11	8,84
	2	72,59	48,66	23,30	3 882,95	96,77	9,49
	3	74,11	49,55	24,56	3 727,32	97,49	9,56
	4	73,35	49,33	24,02	3 805,13	102,22	10,02
BASE	1	78,24	52,93	25,21	4 417,56	105,19	10,32
	2	78,36	52,00	26,35	4 003,42	92,99	9,12
	3	78,48	51,06	27,50	4 279,51	97,18	9,53
	4	78,42	51,53	26,92	4 141,46	95,09	9,32

Fuente: elaboración propia.

### 5.2.3. Módulo de elasticidad (E)

Datos probeta de referencia

$$\epsilon = 0,0003 \text{ cm/cm}$$

$$\sigma = 13 \text{ kg/cm}^2$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{13 \text{ kg/cm}^2}{0,0003 \text{ cm/cm}} = 41\,229,11 \text{ kg/cm}^2$$

A continuación se presentan tablas con las deformaciones unitarias y el módulo de elasticidad determinado de cada una de las especies. Se muestran solo los datos de la zona elástica.

Tabla XLV. **Deformación unitaria, esfuerzo y módulo de elasticidad de la especie *D. Asper***

$\epsilon$ (cm/cm)	$\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	E (kg/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon$ (cm/cm)	$\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	E (kg/cm <sup>2</sup> )
0,000	0,00	0,00	0,002	182,36	94 489,90
0,000	13,03	93 498,88	0,002	195,39	95 402,94
0,000	26,05	93 818,67	0,002	208,41	95 517,04
0,000	39,08	94 336,10	0,002	221,44	95 862,24
0,001	52,10	95 380,79	0,003	234,47	96 046,19
0,001	65,13	92 430,28	0,003	247,49	96 236,67
0,001	78,16	94 489,97	0,003	260,52	96 178,78
0,001	91,18	93 269,74	0,003	273,54	96 755,72
0,001	104,21	94 207,01	0,003	286,57	97 794,90
0,001	117,23	94 199,26	0,003	299,60	97 089,54
0,001	130,26	94 917,25	0,003	312,62	97 756,74
0,002	143,29	95 627,72	0,003	325,65	98 827,66
0,002	156,31	96 102,83	0,004	338,67	99 538,22
0,002	169,34	94 583,12	<b>E promedio</b>		<b>95 308,72</b>

Fuente: elaboración propia.



Tabla XLVI. **Deformación unitaria, esfuerzo y módulo de elasticidad de la especie *G. Angustifolia***

$\epsilon$ (cm/cm)	$\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	E (kg/cm <sup>2</sup> )
0,000	0,00	0
0,000	20,00	65 051,00
0,001	40,00	68 579,00
0,001	60,00	66 833,00
0,001	81,00	66 963,00
0,002	101,00	66 892,00
0,002	121,00	66 834,00
0,002	141,00	67 286,00
0,002	161,00	68 503,00
<b>E promedio</b>		<b>66 331,68</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVII. **Deformación unitaria, esfuerzo y módulo de elasticidad de la especie *G. Verticillata***

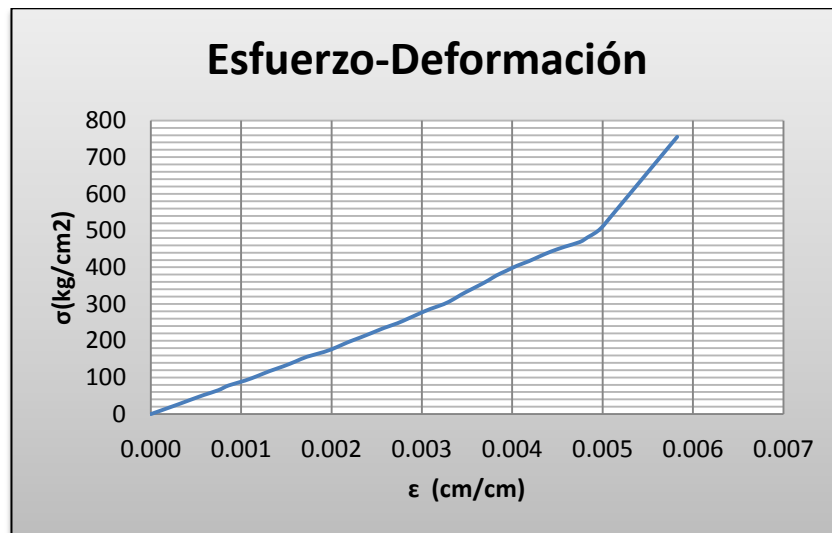
$\epsilon$ (cm/cm)	$\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	E (kg/cm <sup>2</sup> )
0,000	0,00	0
0,000	23,00	63 412,00
0,001	45,00	62 481,00
0,001	68,00	62 545,00
0,001	90,00	62 857,00
0,002	113,00	62 320,00
0,002	136,00	62 410,00
0,003	158,00	62 360,00
0,003	181,00	64 720,00
0,003	204,00	63 508,00
0,004	226,00	63 181,00
0,004	249,00	61 943,00
0,004	271,00	67 755,00
<b>E promedio</b>		<b>63 290,94</b>

Fuente: elaboración propia.

- Diagramas de esfuerzo frente a deformación unitaria

A continuación se presentan los diagramas de esfuerzo frente a los de deformación unitaria de cada una de las tres especies analizadas, determinados a partir del ensayo de flexión.

Figura 58. **Diagrama de esfuerzo frente a deformación de la especie *D.***  
*Asper*



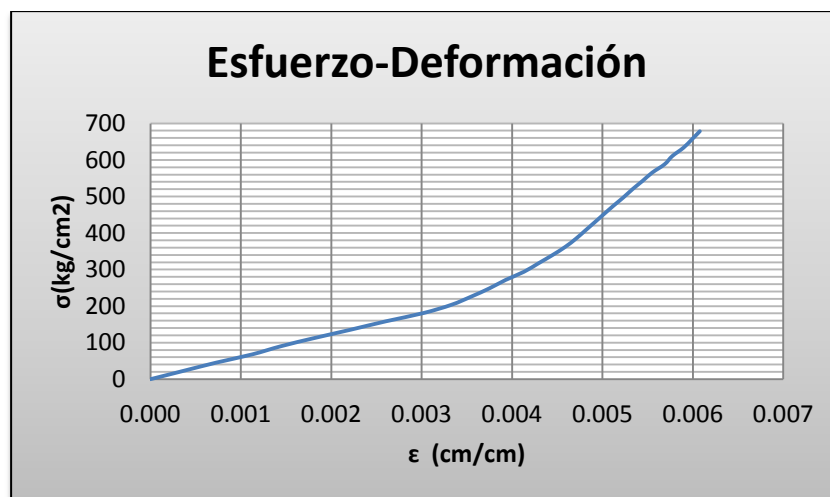
Fuente: elaboración propia.

Figura 59. **Diagrama de esfuerzo frente a deformación de la especie G.**  
*Angustifolia*



Fuente: elaboración propia.

Figura 60. **Diagrama de esfuerzo frente a deformación de la especie G.**  
*Verticillata*



Fuente: elaboración propia.

### 5.2.4. Módulo de ruptura

A continuación se presentan los datos y resultados del modulo de ruptura determinado a partir del ensayo de flexión de cada una de las tres especies.

#### Datos probeta de referencia

Momento (M) = 17 814,49 kg-cm

Módulo de sección S = 27,82 cm<sup>3</sup>

$$M = \frac{PL}{4} = 17\,814,49 \text{ kg-cm,}$$

$$S = \frac{\pi(\emptyset e^4 - (\emptyset e - 2t)^4)}{32\emptyset e} = 27,82 \text{ cm}^3$$

$$Mr. = \frac{M}{S} = \frac{17\,814,49 \text{ kg-cm}}{27,82 \text{ cm}^3} = 640,44 \text{ Kg/cm}^2$$

Tabla XLVIII. Datos y resultados del módulo de ruptura de la especie *D.*

#### *Asper*

Parte del culmo	No.	Øe (cm)	e (cm)	L (cm)	P (kg)	S (cm <sup>3</sup> )	M (kg-cm)	MR. (kg/cm <sup>2</sup> )	MR. (Mpa)
APICAL	1	7,65	0,85	100,01	712,51	27,82	17 814,49	640,44	62,81
	2	7,43	0,77	100,01	892,42	24,39	22 311,54	914,71	89,70
	3	7,20	0,70	100,00	1 068,76	21,18	26 719,07	1 261,54	123,71
	4	7,31	0,74	100,00	999,29	22,76	24 982,95	1 097,68	107,65
MEDIA	1	7,53	0,64	100,02	926,26	21,96	23 161,16	1 054,79	103,44
	2	8,23	0,90	100,01	107,54	34,22	26 766,28	782,19	76,71
	3	8,92	1,16	100,00	1 211,26	48,72	30 281,61	621,57	60,95
	4	8,58	1,03	100,01	1 319,92	41,18	32 999,70	801,43	78,59
BASE	1	9,30	1,87	100,03	1 425,02	68,89	35 636,11	517,26	50,73
	2	9,43	1,79	100,02	1 435,70	70,24	35 898,00	511,07	50,12
	3	9,56	1,72	100,00	1 442,83	71,42	36 070,74	505,06	49,53
	4	9,50	1,76	100,01	1 441,05	70,85	36 028,91	508,51	49,87

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIX. **Datos y resultados del módulo de ruptura de la especie G.**  
**Angustifolia**

Parte del culmo	No.	Øe (cm)	e (cm)	L (cm)	P (kg)	S (cm <sup>3</sup> )	M (kg-cm)	MR. (kg/cm <sup>2</sup> )	MR. (Mpa)
APICAL	1	7,22	0,67	100,05	480,94	20,78	12 029,59	578,88	56,77
	2	6,95	0,62	100,03	409,69	17,89	10 245,38	572,70	56,16
	3	6,68	0,56	100,01	338,44	15,24	8 461,88	555,20	54,45
	4	6,82	0,59	100,02	374,07	16,54	9 353,54	565,66	55,47
MEDIA	1	7,36	0,82	100,00	480,94	24,85	12 023,58	483,88	47,45
	2	7,29	0,74	100,01	427,51	22,78	10 688,70	469,18	46,01
	3	7,22	0,67	100,02	374,07	20,68	9 353,54	452,21	44,35
	4	7,25	0,71	100,02	400,79	21,74	10 021,15	461,02	45,21
BASE	1	7,11	1,27	100,01	570,01	29,22	14 251,60	487,69	47,83
	2	7,34	1,13	100,02	525,48	29,93	13 139,50	439,06	43,06
	3	7,56	1,00	100,03	480,94	30,04	12 027,19	400,37	39,26
	4	7,45	1,07	100,03	503,21	30,06	12 583,37	418,55	41,05

Fuente: elaboración propia.

Tabla L. **Datos y resultados del módulo de ruptura de la especie G.**  
**Verticillata**

Parte del culmo	No.	Øe (cm)	e (cm)	L (cm)	P (kg)	S (cm <sup>3</sup> )	M (kg-cm)	MR. (kg/cm <sup>2</sup> )	MR. (Mpa)
APICAL	1	6,46	0,49	100,02	427,51	12,75	10 689,77	838,28	82,21
	2	6,48	0,52	100,04	552,19	13,40	13 809,68	1 030,61	101,07
	3	6,51	0,54	100,05	676,88	14,04	16 930,54	1 205,83	118,25
	4	6,49	0,53	100,04	614,54	13,72	15 369,99	1 120,19	109,85
MEDIA	1	7,31	0,79	100,00	712,51	23,88	17 812,71	745,84	73,14
	2	7,59	0,79	100,01	739,23	25,97	18 482,54	711,78	69,80
	3	7,87	0,78	100,02	765,95	28,12	19 152,50	680,98	66,78
	4	7,73	0,78	100,02	752,59	27,04	18 817,50	696,00	68,25
BASE	1	6,77	1,10	100,03	961,89	24,19	24 054,38	994,23	97,50
	2	7,07	1,09	100,02	819,38	26,76	20 488,72	765,52	75,07
	3	7,36	1,08	100,01	676,88	29,44	16 923,77	574,80	56,37
	4	7,22	1,09	100,02	748,13	28,09	18 706,15	665,93	65,31

Fuente: elaboración propia.

### 5.2.5. Flecha máxima

A continuación se presentan los datos y resultados de la deformación máxima determinado a partir del ensayo de flexión:

Datos probeta de referencia:

$$P = 712,51 \text{ kg}$$

$$L = 100,01 \text{ cm}$$

$$E = 152\,380,45 \text{ kg/cm}^2$$

$$I = 106,43 \text{ cm}^4$$

$$\delta_{max} = \frac{PL^3}{48EI} = \frac{712,51 \text{ kg} * 100,01 \text{ cm}^3}{48 * 152\,380,445 \text{ kg/cm}^2 * 106,43 \text{ cm}^4} = 0,92 \text{ cm}$$

Tabla LI. **Datos y resultados de la deformación máxima de la especie *D.***  
***Asper***

Parte del culmo	No.	L (cm)	P (kg)	E (kg/cm <sup>2</sup> )	I (cm <sup>4</sup> )	δ máx. (cm)
APICAL	1	100,01	712,51	152 380,45	106,43	0,92
	2	100,01	892,42	155 280,00	90,57	1,32
	3	100,00	1 068,76	158 667,18	76,25	1,84
	4	100,00	999,29	156 100,21	83,22	1,60
MEDIA	1	100,02	926,26	84 453,30	82,72	2,76
	2	100,01	1 070,54	85 300,56	140,79	1,86
	3	100,00	1 211,26	87 250,30	217,35	1,33
	4	100,01	1 319,92	88 500,00	176,56	1,76
BASE	1	100,03	1 425,02	44 876,02	320,47	2,07
	2	100,02	1 435,70	42 896,33	331,24	2,11
	3	100,00	1 442,83	44 200,00	341,38	1,99
	4	100,01	1 441,05	43 800,25	336,40	2,04

Fuente: elaboración propia.

Tabla LII. **Datos y resultados de la deformación máxima de la especie G.**  
***Angustifolia***

Parte del culmo	No.	L (cm)	P (kg)	E (kg/cm <sup>2</sup> )	I (cm <sup>4</sup> )	δ máx. (cm)
APICAL	1	100,05	480,94	100 608,11	74,98	1,33
	2	100,03	409,69	95 200,00	62,16	1,44
	3	100,01	338,44	92 100,00	50,92	1,50
	4	100,02	374,07	91 362,33	56,35	1,51
MEDIA	1	100,00	480,94	54 540,35	91,45	2,01
	2	100,01	427,51	52 400,22	83,04	2,05
	3	100,02	374,07	50 850,64	74,66	2,05
	4	100,02	400,79	51 980,55	78,85	2,04
BASE	1	100,01	570,01	55 341,51	103,88	2,07
	2	100,02	525,48	51 980,22	109,78	1,92
	3	100,03	480,94	48 963,78	113,62	1,80
	4	100,03	503,21	50 652,41	112,00	1,85

Fuente: elaboración propia.

Tabla LIII. **Datos y resultados de la deformación máxima de la especie G.**  
***Verticillata***

Parte del culmo	No.	L (cm)	P (kg)	E (kg/cm <sup>2</sup> )	I (cm <sup>4</sup> )	δ máx. (cm)
APICAL	1	100,02	427,51	64 814,34	41,20	3,34
	2	100,04	552,19	65 560,00	43,44	4,04
	3	100,05	676,88	68 120,00	45,67	4,54
	4	100,04	614,54	67 895,00	44,56	4,24
MEDIA	1	100,00	720,00	60 202,88	87,25	2,86
	2	100,01	739,23	62 200,22	93,93	2,64
	3	100,02	765,95	63 100,11	76,79	3,30
	4	100,02	752,59	62 662,33	104,49	2,40
BASE	1	100,03	930,00	65 365,86	86,98	3,41
	2	100,02	819,38	62 210,10	94,59	2,90
	3	100,01	660,00	56 520,22	108,40	2,24
	4	100,02	748,13	60 840,23	101,35	2,53

Fuente: elaboración propia.

### 5.2.6. Esfuerzo máximo de corte paralelo a la fibra

- Sin nudo

Datos probeta No.1 de la parte apical del culmo de la especie *D. Asper*:

$$F_u = 6\,230,00 \text{ Kg}$$

$$\Sigma(t * l) = 68,60 \text{ cm}^2$$

$$\tau_u = \frac{F_u}{\Sigma(t * l)}$$

$$\tau_u = \frac{6\,230,00 \text{ kg}}{\Sigma(68,60 \text{ cm}^2)} = 90,82 \text{ kg/cm}^2$$

Tabla LIV. Datos y resultados del ensayo de corte paralelo a la fibra sin nudo de la especie *D. Asper*

Parte del culmo	No.	A1 (cm <sup>2</sup> )	A2 (cm <sup>2</sup> )	A3 (cm <sup>2</sup> )	A4 (cm <sup>2</sup> )	ΣA (cm <sup>2</sup> )	F (kg)	Tu (kg/cm <sup>2</sup> )	Tu (Mpa)
APICAL	1	17,57	17,22	16,86	16,95	68,60	6 230,00	90,82	8,91
	2	17,27	16,85	16,86	17,09	68,07	6 590,00	96,81	9,49
	3	16,97	16,49	16,86	17,22	67,54	6 950,00	102,91	10,09
	4	18,64	18,86	19,09	18,12	74,71	7 000,00	93,70	9,19
MEDIA	1	19,89	20,04	20,13	19,78	79,84	7 350,00	92,06	9,03
	2	20,01	20,15	20,24	19,94	80,34	7 675,00	95,53	9,37
	3	20,12	20,27	20,34	20,11	80,84	8 000,00	98,96	9,70
	4	19,09	18,86	19,09	18,38	75,43	6 180,00	81,94	8,04
BASE	1	23,96	22,19	22,01	22,33	90,50	8 020,00	88,62	8,69
	2	23,89	23,43	22,87	22,95	93,14	8 160,00	87,61	8,59
	3	23,82	24,67	23,73	23,57	95,78	8 300,00	86,65	8,50
	4	25,49	26,11	26,03	25,39	10,02	8 450,00	82,02	8,04

Fuente: elaboración propia.



Tabla LV. **Datos y resultados del ensayo de corte paralelo a la fibra sin nudo de la especie *G. Angustifolia***

Parte del culmo	No.	A1 (cm <sup>2</sup> )	A2 (cm <sup>2</sup> )	A3 (cm <sup>2</sup> )	A4 (cm <sup>2</sup> )	∑A (cm <sup>2</sup> )	F (kg)	Tu (kg/cm <sup>2</sup> )	Tu (Mpa)
APICAL	1	12,61	13,12	12,47	11,36	49,56	3 400,00	68,60	6,73
	2	12,63	12,88	12,38	11,86	49,75	3 625,00	72,86	7,15
	3	12,65	12,64	12,28	12,37	49,94	3 850,00	77,09	7,56
	4	10,75	10,95	13,77	10,47	45,95	3 700,00	80,52	7,90
MEDIA	1	14,34	15,35	14,67	14,14	58,50	4 200,00	71,79	7,04
	2	14,30	15,17	14,10	13,84	57,42	4 190,00	72,98	7,16
	3	14,27	14,99	13,53	13,54	56,33	4 180,00	74,21	7,28
	4	14,27	14,37	13,77	14,82	57,22	4 100,00	71,65	7,03
BASE	1	19,37	19,41	17,82	17,50	74,10	5 100,00	68,83	6,75
	2	18,52	18,22	17,03	16,80	70,57	5 080,00	71,99	7,06
	3	17,67	17,04	16,23	16,10	67,04	5 060,00	75,48	7,40
	4	17,68	17,11	16,29	16,60	67,68	4 800,00	70,93	6,96

Fuente: elaboración propia.

Tabla LVI. **Datos y resultados del ensayo de corte paralelo a la fibra sin nudo de la especie *G. Verticillata***

Parte del culmo	No.	A1 (cm <sup>2</sup> )	A2 (cm <sup>2</sup> )	A3 (cm <sup>2</sup> )	A4 (cm <sup>2</sup> )	∑A (cm <sup>2</sup> )	F (kg)	Tu (kg/cm <sup>2</sup> )	Tu (Mpa)
APICAL	1	9,26	8,86	8,89	8,99	36,01	2 740,00	76,10	7,46
	2	9,23	8,99	8,91	8,98	36,10	2 500,00	69,25	6,79
	3	9,20	9,11	8,93	8,96	36,20	2 600,00	71,82	7,04
	4	10,91	11,21	11,77	10,60	44,49	2 900,00	65,18	6,39
MEDIA	1	11,06	11,14	10,85	10,98	44,04	4 300,00	97,65	9,58
	2	11,05	11,28	10,94	10,98	44,26	4 450,00	100,55	9,86
	3	11,04	11,42	11,03	10,99	44,48	4 400,00	98,92	9,70
	4	11,72	11,90	11,77	11,98	47,37	4 800,00	101,32	9,94
BASE	1	13,38	13,47	13,28	13,36	53,48	5 750,00	107,51	10,54
	2	13,42	13,30	13,19	13,42	53,34	5 530,00	103,68	10,17
	3	13,46	13,13	13,11	13,49	53,20	5 650,00	106,21	10,42
	4	13,53	13,02	12,65	14,13	53,34	5 600,00	104,99	10,30

Fuente: elaboración propia.

- Con nudo

Datos probeta No.1:

$$Fu = 7\,700,00 \text{ kg}$$

$$\Sigma (t * l) = 80,63 \text{ cm}^2$$

$$\tau_u = \frac{Fu}{\Sigma(t * l)}$$

$$\tau_u = \frac{7\,700,00 \text{ kg}}{(80,63 \text{ cm}^2)}$$

$$\tau_u = 90,82 \text{ kg/cm}^2$$

Tabla LVII. **Datos y resultados del ensayo de corte paralelo a la fibra con nudo de la especie *D. Asper***

Parte del culmo	No.	A1 (cm <sup>2</sup> )	A2 (cm <sup>2</sup> )	A3 (cm <sup>2</sup> )	A4 (cm <sup>2</sup> )	ΣA (cm <sup>2</sup> )	F (kg)	Tu (kg/cm <sup>2</sup> )	Tu (Mpa)
APICAL	1	16,31	23,62	24,17	16,53	80,63	7 700,00	95,49	9,36
	2	16,74	25,69	25,34	17,03	84,80	7 425,00	87,56	8,59
	3	17,16	27,76	26,51	17,54	88,97	7 150,00	80,36	7,88
	4	19,46	29,34	25,24	18,19	92,23	7 540,00	81,76	8,02
MEDIA	1	19,88	27,13	26,37	18,57	91,95	8 180,00	88,97	8,72
	2	20,41	29,30	29,26	19,76	98,73	8 180,00	82,85	8,12
	3	20,94	31,48	32,15	20,94	105,52	7 200,00	68,23	6,69
	4	15,69	26,94	25,24	16,56	84,43	6 240,00	73,91	7,25
BASE	1	25,33	34,66	35,02	25,37	120,38	8 800,00	73,10	7,17
	2	25,92	35,52	35,88	25,60	122,92	8 840,00	71,92	7,05
	3	26,51	36,38	36,74	25,83	125,46	8 880,00	70,78	6,94
	4	29,13	36,53	36,51	29,35	131,53	1 000,00	76,03	7,46

Fuente: elaboración propia.

Tabla LVIII. **Datos y resultados del ensayo de corte paralelo a la fibra con nudo de la especie *G. Angustifolia***

Parte del culmo	No.	A1 (cm <sup>2</sup> )	A2 (cm <sup>2</sup> )	A3 (cm <sup>2</sup> )	A4 (cm <sup>2</sup> )	ΣA (cm <sup>2</sup> )	F (kg)	Tu (kg/cm <sup>2</sup> )	Tu (Mpa)
APICAL	1	10,52	16,27	19,28	13,02	59,09	4 200,00	71,08	6,97
	2	11,93	18,75	18,58	14,55	63,80	4 370,00	68,49	6,72
	3	13,34	21,23	17,87	16,07	68,51	4 540,00	66,27	6,50
	4	11,27	18,57	15,78	15,54	61,16	4 150,00	67,86	6,65
MEDIA	1	15,81	19,84	19,43	16,38	71,46	4 840,00	67,73	6,64
	2	15,56	20,93	20,80	15,82	73,10	4 870,00	66,62	6,53
	3	15,31	22,02	22,17	15,26	74,75	4 900,00	65,55	6,43
	4	15,38	22,08	15,78	21,07	74,30	5 100,00	68,64	6,73
BASE	1	25,10	30,81	29,62	26,93	112,47	5 500,00	48,90	4,80
	2	22,03	28,76	27,66	23,48	101,93	5 450,00	53,47	5,24
	3	18,96	26,71	25,71	20,02	91,40	5 400,00	59,08	5,79
	4	21,34	23,58	25,35	23,01	93,27	5 440,00	58,32	5,72

Fuente: elaboración propia.

Tabla LIX. **Datos y resultados del ensayo de corte paralelo a la fibra con nudo de la especie *G. Verticillata***

Parte del culmo	No.	A1 (cm <sup>2</sup> )	A2 (cm <sup>2</sup> )	A3 (cm <sup>2</sup> )	A4 (cm <sup>2</sup> )	ΣA (cm <sup>2</sup> )	F (kg)	Tu (kg/cm <sup>2</sup> )	Tu (Mpa)
APICAL	1	8,79	13,77	14,88	10,29	47,73	2 740,00	57,41	5,63
	2	8,94	14,15	14,94	9,52	47,55	2 620,00	55,10	5,40
	3	9,09	14,54	15,00	8,75	47,37	2 500,00	52,77	5,18
	4	9,43	16,23	20,94	10,19	56,78	2 900,00	51,07	5,01
MEDIA	1	12,21	18,40	17,34	11,92	59,87	4 300,00	71,82	7,04
	2	12,71	17,88	17,51	12,48	60,59	4 550,00	75,10	7,36
	3	13,22	17,35	17,69	13,04	61,30	4 800,00	78,30	7,68
	4	15,03	20,37	20,94	15,66	72,01	4 900,00	68,05	6,67
BASE	1	16,12	20,17	21,80	15,72	73,80	5 750,00	77,91	7,64
	2	15,59	20,36	21,80	15,15	72,90	5 175,00	70,99	6,96
	3	15,07	20,54	21,80	14,59	72,00	4 600,00	63,89	6,27
	4	12,16	17,75	19,86	11,45	61,22	5 500,00	89,84	8,81

Fuente: elaboración propia.

### 5.3. Tablas de resultados

A continuación se presentan las tablas con resultados de las pruebas físicas y mecánicas de las tres especies de bambú en estudio.

Tabla LX. **Resultados de los ensayos de las características físicas de la especie *D. Asper***

No.	Tipo de ensayo	Parte del culmo	$\mu$	$\mu$ total
1	Contenido de humedad verde %	apical	34,46	40,75
		media	42,29	
		base	45,49	
2	Contenido de humedad seco %	apical	14,45	17,87
		media	17,02	
		base	22,15	
3	Peso específico verde (N/m <sup>3</sup> )	apical	8 295,11	8 477,10
		media	8 404,83	
		base	8 731,35	
4	Peso específico seco (N/m <sup>3</sup> )	apical	7 671,98	6 949,99
		media	6 233,17	
		base	6 109,33	
5	Densidad verde (g/cm <sup>3</sup> )	apical	0,85	0,87
		media	0,86	
		base	0,89	
6	Densidad seco (g/cm <sup>3</sup> )	apical	0,83	0,70
		media	0,64	
		base	0,62	
7	Contracción volumétrica %	apical	4,62	3,96
		media	3,66	
		base	3,61	
8	Absorción %	apical	25,60	27,85
		media	28,17	
		base	29,78	
9	Dureza (Kg)	apical	412,52	366,76
		media	372,34	
		base	315,42	

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXI. **Resultados de los ensayos de las características físicas de la especie *G. Angustifolia***

No.	Tipo de ensayo	Parte del culmo	$\mu$	$\mu$ total
1	Contenido de humedad verde %	apical	57,90	79,49
		media	85,86	
		base	94,72	
2	Contenido de humedad seco %	apical	12,42	14,15
		media	13,82	
		base	16,23	
3	Peso específico verde (N/m <sup>3</sup> )	apical	8 109,17	8 279,88
		media	8 224,15	
		base	8 506,33	
4	Peso específico seco (N/m <sup>3</sup> )	apical	5 811,06	5 636,90
		media	5 612,99	
		base	5 486,66	
5	Densidad verde (g/cm <sup>3</sup> )	apical	0,83	0,84
		media	0,84	
		base	0,87	
6	Densidad seco (g/cm <sup>3</sup> )	apical	0,59	0,58
		media	0,57	
		base	0,56	
7	Contracción volumétrica %	apical	14,89	14,41
		media	14,02	
		base	14,31	
8	Absorción %	apical	31,88	32,29
		media	31,81	
		base	33,17	
9	Dureza (Kg)	apical	302,03	240,91
		media	288,63	
		base	132,06	

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXII. **Resultados de los ensayos de las características físicas de la especie *G. Verticillata***

No.	Tipo de ensayo	Parte del culmo	$\mu$	$\mu$ total
1	Contenido de humedad verde %	apical	37,67	48,91
		media	51,30	
		base	57,77	
2	Contenido de humedad seco %	apical	12,16	15,09
		media	15,23	
		base	17,88	
3	Peso específico verde (N/m <sup>3</sup> )	apical	7 468,07	8 009,64
		media	8 225,07	
		base	8 335,79	
4	Peso específico seco (N/m <sup>3</sup> )	apical	5 331,79	4 636,36
		media	4 326,07	
		base	4 251,22	
5	Densidad verde (g/cm <sup>3</sup> )	apical	0,76	0,82
		media	0,84	
		base	0,85	
6	Densidad seco (g/cm <sup>3</sup> )	apical	0,54	0,47
		media	0,44	
		base	0,43	
7	Contracción volumétrica %	apical	5,36	5,42
		media	5,35	
		base	5,53	
8	Absorción %	apical	24,90	26,96
		media	27,46	
		base	28,54	
9	Dureza (Kg)	apical	402,48	326,58
		media	332,16	
		base	245,10	

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXIII. **Resultados de los ensayos de las propiedades mecánicas de la especie *D. Asper***

No.	Tipo de ensayo	Parte del culmo	$\mu$	$\mu$ total
1	Tensión perpendicular a la fibra (kg/cm <sup>2</sup> )	apical	6,37	6,16
		media	5,81	
		base	6,30	
2	Compresión con un nudo (kg/cm <sup>2</sup> )	apical	155,88	147,60
		media	144,35	
		base	142,58	
3	Compresión sin nudo (kg/cm <sup>2</sup> )	apical	137,05	112,76
		media	106,12	
		base	95,12	
4	Compresión con dos nudos (kg/cm <sup>2</sup> )	apical	142,11	118,23
		media	109,05	
		base	103,55	
5	Corte sin nudos (kg/cm <sup>2</sup> )	apical	96,06	91,47
		media	92,12	
		base	86,23	
6	Corte con nudos (kg/cm <sup>2</sup> )	apical	86,29	79,25
		media	78,49	
		base	72,96	
7	Módulo de ruptura (kg/cm <sup>2</sup> )	apical	978,59	768,02
		media	815,00	
		base	510,48	
	Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )	apical	155 606,96	95 308,72
		media	86 376,04	
		base	43 943,15	
	Flecha máxima (cm)	apical	1,42	1,80
		media	1,93	
		base	2,05	

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXIV. **Resultados de los ensayos de las propiedades mecánicas de la especie *G. Angustifolia***

No.	Tipo de ensayo	Parte del culmo	$\mu$	$\mu$ total
1	Tensión perpendicular a la fibra (kg/cm <sup>2</sup> )	apical	9,75	8,80
		media	7,79	
		base	8,87	
2	Compresión con un nudo (kg/cm <sup>2</sup> )	apical	122,12	101,72
		media	99,73	
		base	83,32	
3	Compresión sin nudo (kg/cm <sup>2</sup> )	apical	116,84	101,68
		media	95,44	
		base	92,77	
4	Compresión con dos nudos (kg/cm <sup>2</sup> )	apical	113,84	85,21
		media	80,33	
		base	61,46	
5	Corte sin nudos (kg/cm <sup>2</sup> )	apical	74,77	73,08
		media	72,66	
		base	71,81	
6	Corte con nudos (kg/cm <sup>2</sup> )	apical	68,42	63,50
		media	67,13	
		base	54,94	
7	Módulo de ruptura (kg/cm <sup>2</sup> )	apical	568,11	490,37
		media	466,57	
		base	436,42	
	Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )	apical	94 817,61	66 331,68
		media	52 442,94	
		base	51 734,48	
	Flecha máxima (cm)	apical	1,45	1,80
		media	2,04	
		base	1,91	

Fuente: elaboración propia.



Tabla LXV. **Resultados de los ensayos de las propiedades mecánicas de la especie *G. Verticillata***

No.	Tipo de ensayo	Parte del culmo	$\mu$	$\mu$ total
1	Tensión perpendicular a la fibra (kg/cm <sup>2</sup> )	apical	6,39	5,03
		media	5,50	
		base	3,19	
2	Compresión con un nudo (kg/cm <sup>2</sup> )	apical	149,57	145,00
		media	144,74	
		base	140,70	
3	Compresión sin nudo (kg/cm <sup>2</sup> )	apical	123,73	115,23
		media	112,24	
		base	109,71	
4	Compresión con dos nudos (kg/cm <sup>2</sup> )	apical	153,10	115,79
		media	96,65	
		base	97,61	
5	Corte sin nudos (kg/cm <sup>2</sup> )	apical	70,59	91,93
		media	99,61	
		base	105,60	
6	Corte con nudos (kg/cm <sup>2</sup> )	apical	54,09	67,69
		media	73,32	
		base	75,66	
7	Módulo de ruptura (kg/cm <sup>2</sup> )	apical	1048,73	835,83
		media	708,65	
		base	750,12	
	Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )	apical	66597,34	63 290,94
		media	62041,39	
		base	61234,10	
	Flecha máxima (cm)	apical	4,04	3,20
		media	2,80	
		base	2,77	

Fuente: elaboración propia.

#### 5.4. Análisis estadístico inferencial

A continuación se presentan los resultados del análisis estadístico que se realizó para encontrar las variaciones que presentan los datos de cada ensayo.

**Tabla LXVI. Resultados del análisis estadístico de los ensayos de las características físicas y propiedades mecánicas de la especie *D. Asper***

No.	Tipo de ensayo	$\mu$	S	CV
1	Contenido de humedad verde (%)	40,75	5,12	12,57
2	Contenido de humedad seco (%)	17,87	3,68	20,57
3	Peso específico verde (N/m <sup>3</sup> )	8 477,10	632,25	7,46
4	Peso específico seco (N/m <sup>3</sup> )	6 949,99	652,29	9,39
5	Densidad verde (g/cm <sup>3</sup> )	0,87	0,18	20,68
6	Densidad seco (g/cm <sup>3</sup> )	0,70	0,08	12,21
7	Contracción volumétrica (%)	3,96	1,33	33,66
8	Absorción (%)	27,85	3,65	13,10
9	Dureza (Kg)	366,76	50,43	13,75
10	Tensión perpendicular a la fibra (kg/cm <sup>2</sup> )	6,16	0,33	5,31
11	Compresión con un nudo (kg/cm <sup>2</sup> )	147,60	19,14	12,97
12	Compresión sin nudo (kg/cm <sup>2</sup> )	112,76	19,68	17,45
13	Compresión con dos nudos (kg/cm <sup>2</sup> )	118,23	19,19	16,23
14	Corte sin nudos (kg/cm <sup>2</sup> )	91,47	6,50	7,10
15	Corte con nudos (kg/cm <sup>2</sup> )	79,25	8,37	10,57
16	Módulo de ruptura (kg/cm <sup>2</sup> )	768,02	262,92	34,23
	Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )	95 308,72	48 099,02	50,47
	Flecha máxima (cm)	1,80	0,47	26,29

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXVII. **Resultados del análisis estadístico de los ensayos de las características físicas y propiedades mecánicas de la especie G.**

***Angustifolia***

No.	Tipo de ensayo	$\mu$	S	CV
1	Contenido de humedad verde (%)	79,49	16,61	20,90
2	Contenido de humedad seco (%)	14,15	1,71	12,08
3	Peso específico verde (N/m <sup>3</sup> )	8 279,88	589,68	7,12
4	Peso específico seco (N/m <sup>3</sup> )	5 636,90	410,45	7,28
5	Densidad verde (g/cm <sup>3</sup> )	0,84	0,21	25,00
6	Densidad seco (g/cm <sup>3</sup> )	0,58	0,04	7,28
7	Contracción volumétrica (%)	14,41	4,74	32,92
8	Absorción (%)	32,29	1,62	5,01
9	Dureza (Kg)	240,91	82,10	34,08
10	Tensión perpendicular a la fibra (kg/cm <sup>2</sup> )	8,80	0,86	9,82
11	Compresión con un nudo (kg/cm <sup>2</sup> )	101,72	18,02	17,71
12	Compresión sin nudo (kg/cm <sup>2</sup> )	101,68	14,13	13,90
13	Compresión con dos nudos (kg/cm <sup>2</sup> )	85,21	41,95	49,23
14	Corte sin nudos (kg/cm <sup>2</sup> )	73,08	3,39	4,64
15	Corte con nudos (kg/cm <sup>2</sup> )	63,50	6,92	10,90
16	Módulo de ruptura (kg/cm <sup>2</sup> )	490,37	62,66	12,78
	Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )	66 331,68	36 961,64	55,72
	Flecha máxima (cm)	1,80	0,27	15,28

Fuente: elaboración propia.

**Tabla LXVIII. Resultados del análisis estadístico de los ensayos de las características físicas y propiedades mecánicas de la especie G.**

***Verticillata***

<b>No.</b>	<b>Tipo de ensayo</b>	<b><math>\mu</math></b>	<b>S</b>	<b>CV</b>
1	Contenido de humedad verde %	48,91	9,07	18,55
2	Contenido de humedad seco %	15,09	2,81	18,60
3	Peso específico verde (N/m <sup>3</sup> )	8 009,64	750,51	9,37
4	Peso específico seco (N/m <sup>3</sup> )	4 636,36	673,65	14,53
5	Densidad verde (g/cm <sup>3</sup> )	0,82	0,08	9,37
6	Densidad seco (g/cm <sup>3</sup> )	0,47	0,11	24,15
7	Contracción volumétrica %	5,42	1,58	29,20
8	Absorción %	26,96	5,39	19,99
9	Dureza (Kg)	326,58	70,91	21,71
10	Tensión perpendicular a la fibra (kg/cm <sup>2</sup> )	5,03	1,53	30,44
11	Compresión con un nudo (kg/cm <sup>2</sup> )	145,00	4,89	3,37
12	Compresión sin nudo (kg/cm <sup>2</sup> )	115,23	12,08	10,48
13	Compresión con dos nudos (kg/cm <sup>2</sup> )	115,79	28,09	24,26
14	Corte sin nudos (kg/cm <sup>2</sup> )	91,93	16,19	17,61
15	Corte con nudos (kg/cm <sup>2</sup> )	67,69	10,40	15,36
16	Módulo de ruptura (kg/cm <sup>2</sup> )	835,83	202,21	24,19
	Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )	63 290,94	3 309,30	5,23
	Flecha máxima (cm)	3,20	0,75	23,42

Fuente: elaboración propia.

- Corrección de análisis estadístico por el coeficiente de variación

En las tablas anteriores se observa que los coeficientes de variación del módulo de elasticidad para la especie *D. Asper* y *G. Angustifolia* son muy altos al igual que para el resultado de compresión con dos nudos. Esto es a causa de la variación de los datos según la parte del culmo analizado. Las medidas de su diámetro van disminuyendo con su altura.

Es por ello que se utiliza la mediana en lugar de la media, porque no pierde su carácter representativo, y no presenta problemas por valores extremos.

Tabla LXIX. **Resultados del análisis estadístico con mediana**

<b>ESPECIE</b>	<b>Tipo de ensayo</b>	<b>Me</b>	<b>S</b>	<b>CV</b>
<i>D. Asper</i>	Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )	95 348,17	1 718,83	1,80
<i>G. Angustifolia</i>	Compresión con dos nudos (kg/cm <sup>2</sup> )	81,75	23,82	29,13
<i>G. Verticillata</i>	Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )	67 358,70	1 137,38	1,69

Fuente: elaboración propia.

## 5.5. Comparación de las características entre las tres especies utilizadas

Se presentan los resultados obtenidos de cada uno de los ensayos de cada especie.

Tabla LXX. Resumen de los resultados de los ensayos realizados a las tres especies

No.	Tipo de ensayo	<i>D. Asper</i>	<i>G. Angustifolia</i>	<i>G. Verticillata</i>
1	Contenido de humedad verde %	40,75	79,49	48,91
2	Contenido de humedad seco %	17,87	14,15	15,09
3	Peso específico verde (N/m <sup>3</sup> )	8477,1	8 279,88	8 009,64
4	Peso específico seco (N/m <sup>3</sup> )	6 949,99	5 636,90	4 636,36
5	Densidad verde (g/cm <sup>3</sup> )	0,87	0,84	0,82
6	Densidad seco (g/cm <sup>3</sup> )	0,70	0,58	0,47
7	Contracción volumétrica %	3,96	14,41	5,42
8	Absorción %	27,85	32,29	26,96
9	Dureza (Kg)	366,76	240,91	326,58
10	Tensión perpendicular a la fibra (kg/cm <sup>2</sup> )	6,16	8,80	5,03
11	Compresión con un nudo (kg/cm <sup>2</sup> )	147,6	101,72	145,00
12	Compresión sin nudo (kg/cm <sup>2</sup> )	112,76	101,68	115,23
13	Compresión con dos nudos (kg/cm <sup>2</sup> )	118,23	85,21	115,79
14	Corte sin nudos (kg/cm <sup>2</sup> )	90,18	73,08	91,93
15	Corte con nudos (kg/cm <sup>2</sup> )	79,25	63,50	67,69
16	Módulo de ruptura (kg/cm <sup>2</sup> )	768,02	490,37	835,83
	Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )	95 308,72	66 331,68	63 290,94
	Flecha máxima (cm)	1,8	1,80	3,20

Fuente: elaboración propia.

## **5.6. Análisis e interpretación de resultados**

Luego de realizar los ensayos correspondientes para determinar las características físicas y propiedades mecánicas de las tres especies de bambú se procede a realizar el análisis de resultados tomando como referencia la tabla LXIX del inciso anterior (5.5. comparación de las características entre las tres especies utilizadas), además de ello también se hace uso de las tablas del inciso 5.3. Donde se presentan los resultados obtenidos según la parte del culmo analizado.

Para realizar el análisis estadístico, se utilizaron los métodos de la estadística inferencial que consiste en la utilización de una muestra de una población que hace posible la estimación de sus características. De esa forma, se obtuvo información de cada una de las especies partiendo de los resultados obtenidos de la muestra.

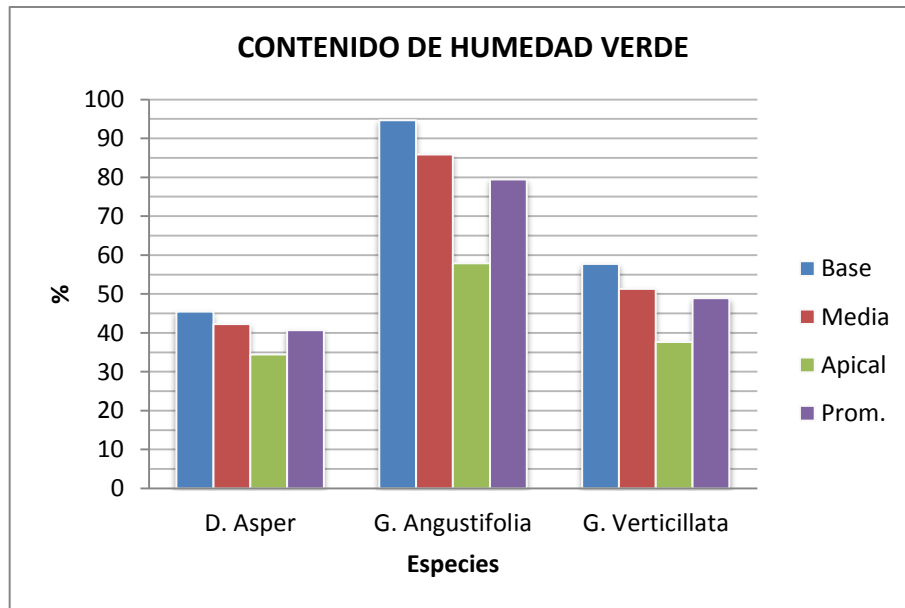
### **5.6.1. Análisis de características físicas**

Se puede observar en las tablas de resultados del inciso 5,3 que los datos cambian según la parte del culmo analizado, por ejemplo, el contenido de humedad disminuye a medida que la altura aumenta, y esta variación sucede con las tres especies. Lo que anticipa que la resistencia mecánica disminuye en la parte basal.

Así mismo, se observa la diferencia en los datos cuando el material se analizó en estado verde y seco.

A continuación se presentan diagramas que ilustran la diferencia en los resultados según la parte analizada y el promedio de cada uno de los ensayos.

Figura 61. **Diagrama de comparación de resultados del ensayo de contenido de humedad verde**



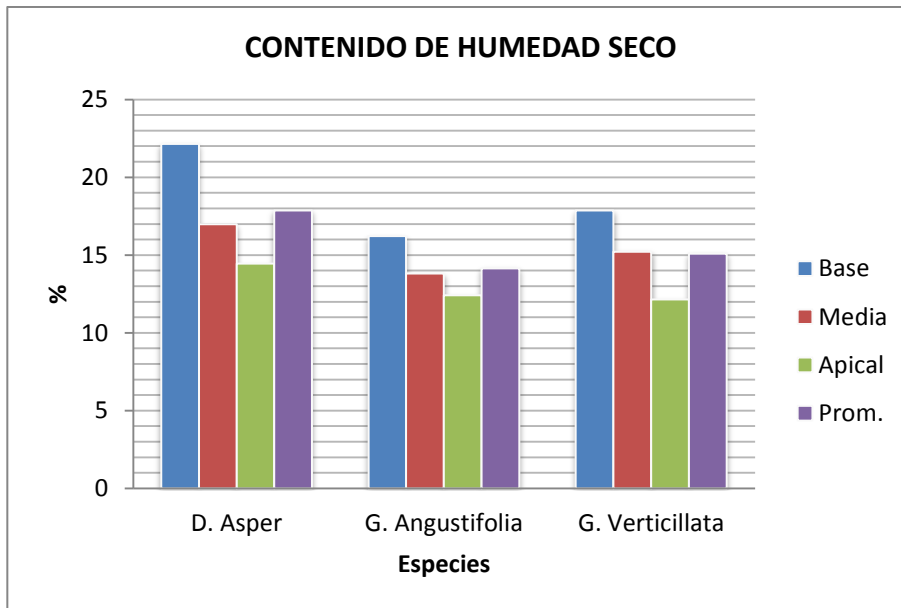
Fuente: elaboración propia.

En esta gráfica se puede observar que la especie con mayor contenido de humedad en estado verde (recién cortado), es el *G. Angustifolia*, con un valor de 79,49 %. Así mismo, se observa que los tres valores se encuentran con un porcentaje mayor al 30 %, que es el punto de saturación de la las fibras. Lo que significa que tiene agua libre que aún no ha sido evaporada. También se puede observar que en las tres especies se repite el mismo patrón: la humedad decrece al aumentar la altura del culmo.

Por lo que no se cortaron ni ensayaron las probetas hasta que estos estuvieron libres de agua, porque si se ensayaban con esta humedad, el bambú no iba a experimentar cambios en sus dimensiones, y los resultados de sus propiedades mecánicas hubieran sido erróneos.



Figura 62. **Diagrama de comparación de resultados del ensayo de contenido de humedad seco**

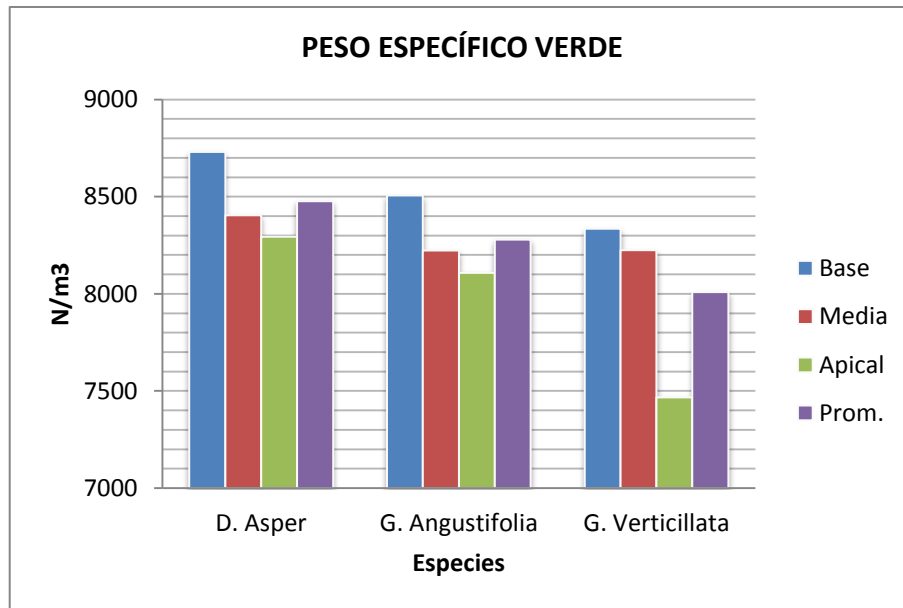


Fuente: elaboración propia.

En esta gráfica podemos observar que la especie *D. Asper* posee el mayor contenido de humedad en estado seco con 17,87 %, mientras que las especies *G. Angustifolia* y *G. Verticillata* contienen 14,15 % y 15,09 % respectivamente. Los tres valores están dentro del rango de contenido de humedad seco permitido (entre 10-21 %). Se repite el mismo patrón que el contenido de humedad húmedo: el contenido de humedad decrece conforme aumenta la altura del culmo.

Al comparar los resultados del contenido de humedad verde y seca, se puede observar que la especie *G. Angustifolia* quien poseía el mayor valor en estado verde perdió un 82,20 % de su peso inicial húmedo, lo que hace suponer que obtendrá mayor contracción.

Figura 63. Diagrama de comparación de resultados del ensayo de peso específico verde

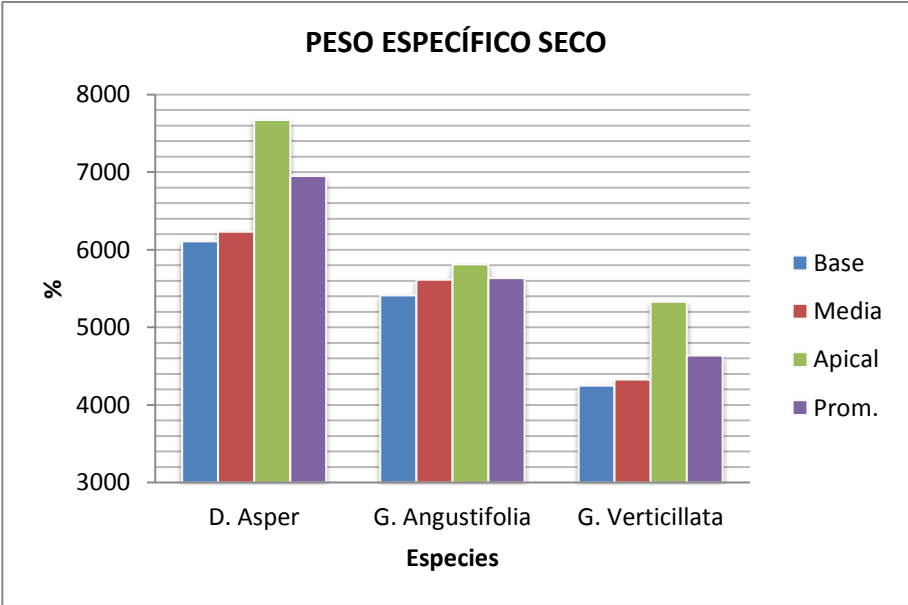


Fuente: elaboración propia.

La especie con mayor peso específico verde es *D. Asper* con 8 477,10 N/m<sup>3</sup> seguidamente se encuentra la *G. Asper* con 8 279,88 N/m<sup>3</sup> y por ultimo *G. Verticillata* con 8 009,64 N/m<sup>3</sup>. Los valores cambian según la parte del culmo analizado, como se puede observar en este diagrama, el peso específico es mayor en la base debido a la cantidad de agua que se concentra en esa parte.

Este dato se utiliza para comparar con los resultados del peso específico seco, para verificar que tan poroso es la especie, y dar un indicio de su comportamiento ante el secado.

Figura 64. Diagrama de comparación de resultados del ensayo de peso específico seco

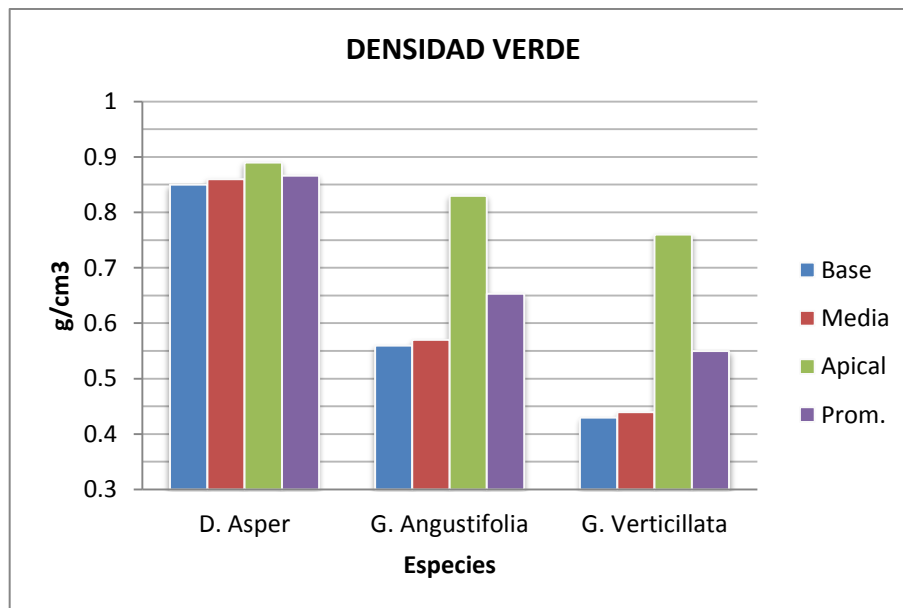


Fuente: elaboración propia.

La especie *D. Asper* presentó los mejores resultados de peso específico secado al aire libre con  $6\,949,99\text{ N/m}^3$ . Mientras que la especie *G. Verticillata* es el que posee menor peso específico con  $4\,636,36\text{ N/m}^3$ . Este resultado es importante para el diseño de elementos estructurales al calcular del peso que aporta el elemento a la estructura.

En cuanto a la diferencia en estado verde y seco, se observa que la especie *D. Asper* sufre una disminución del 18,02 %, *G. Angustifolia*: 31,92 % y *G. Verticillata*: 42,12 %, de su peso específico.

Figura 65. **Diagrama de comparación de resultados del ensayo de densidad verde**

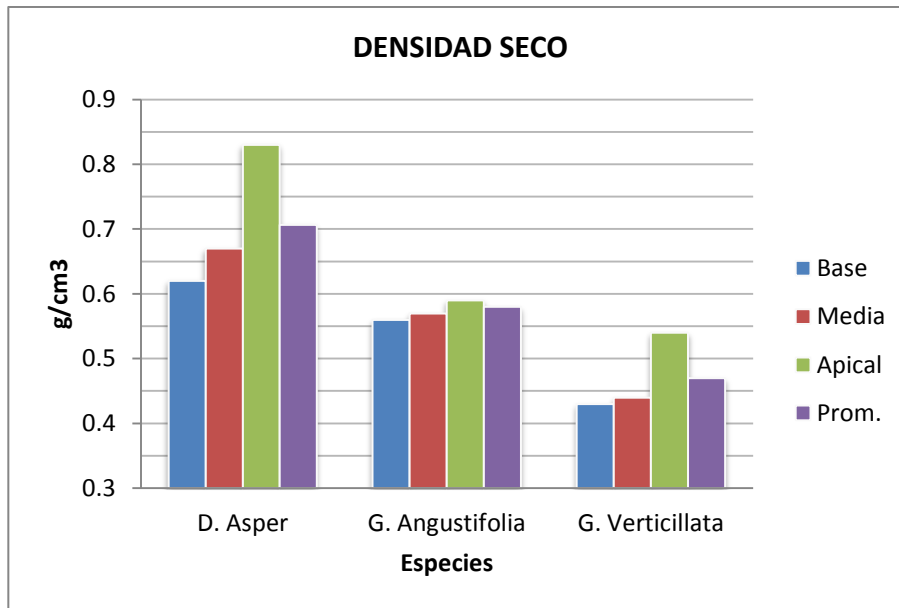


Fuente: elaboración propia.

En esta gráfica se puede observar la especie *D. Asper* posee la mayor densidad con  $0,87 \text{ g/cm}^3$ , en cuanto a la parte del culmo analizado. Posee poca variación a lo largo del culmo, mientras que la especie *G. Verticillata* tiene la menor densidad con  $0,55 \text{ g/cm}^3$ . Para las tres especies, la parte apical es la que presenta mayor valor para esta característica (densidad).

Este dato se utiliza como uno de los guías para su secado, al igual que el peso específico en estado verde, se usa para comparar los resultados luego de que el material elimina el agua libre de sus poros, lo que está altamente relacionado con sus características anatómicas.

Figura 66. **Diagrama de comparación de resultados del ensayo de densidad seco**



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con su densidad, la madera se clasifica como:

Densidad < 0,4 semi-liviana

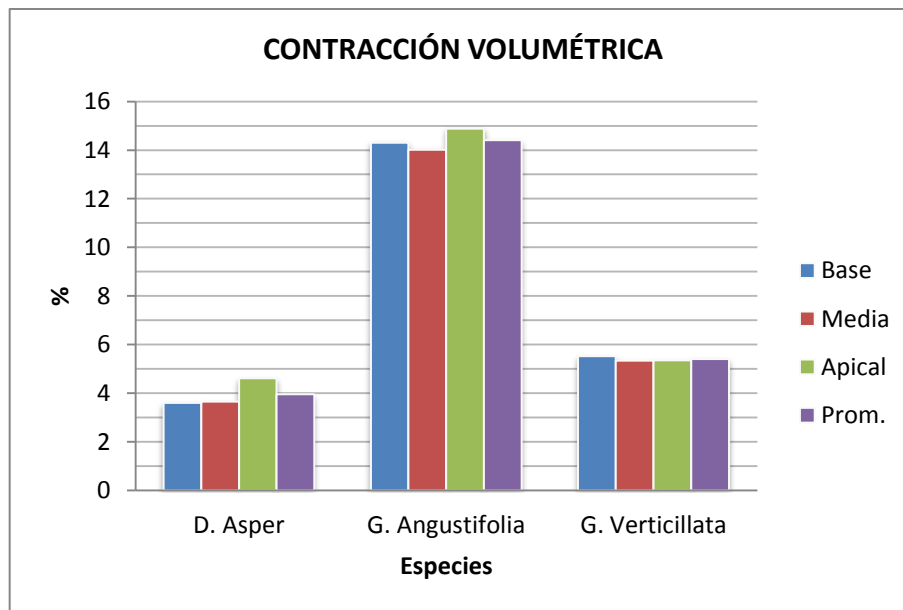
Densidad entre 0,4-0,6 liviana

Densidad 0,6- 0.7 semi-pesada

Densidad > 0,7 pesada

Según la clasificación anterior y como se observa en la gráfica: la especie *D. Asper* se clasifica como pesado por tener una densidad de 0,71 g/cm<sup>3</sup>, la especie *G. Angustifolia* con 0,58 g/cm<sup>3</sup> como liviana, al igual que la especie *G. Verticillata* con 0,47 g/cm<sup>3</sup>.

Figura 67. **Diagrama de comparación de resultados del ensayo de contracción volumétrica**

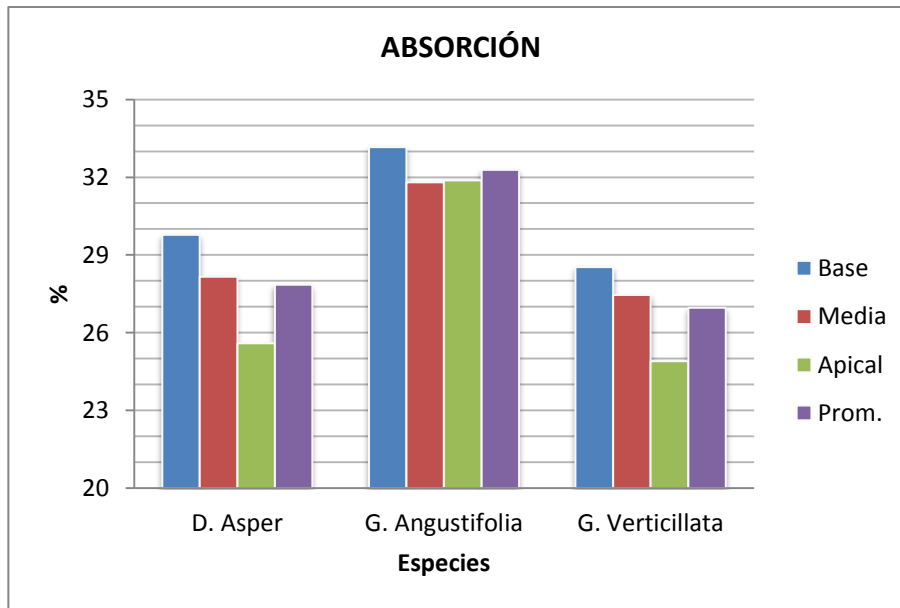


Fuente: elaboración propia.

Como era de esperarse la especie con mayor valor de contracción volumétrica es la *G. Angustifolia*, a causa del nivel de agua que contenía en estado verde. Como se observa en esta gráfica no existe diferencia significativa en los valores a lo largo del culmo de las tres especies.

La especie con menor contracción es *D. Asper* con 3,96 %. Esta especie sufrió poca disminución de sus dimensiones después del secado a comparación de las otras tres especies, esto por ser de densidad pesada.

Figura 68. **Diagrama de comparación de resultados del ensayo de absorción**

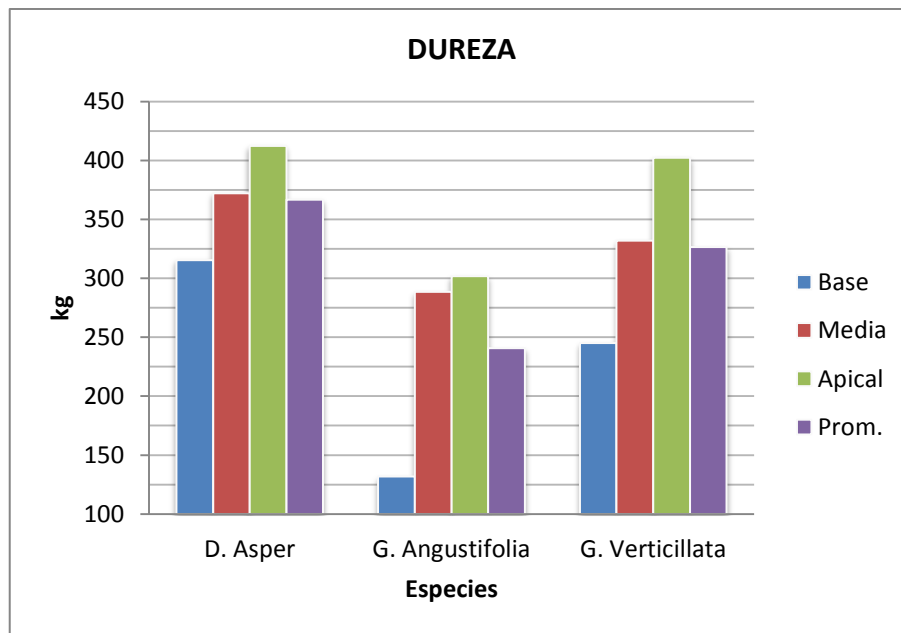


Fuente: elaboración propia.

En este diagrama podemos observar que la especie *G. Angustifolia* es el de mayor porcentaje de absorción teniendo un promedio de 32,29 %. Se aprecia que entre la parte inferior, media y superior del culmo existe poca diferencia, siguiendo siempre el mismo comportamiento de los resultados de los otros ensayos: el valor es más alto en la parte superior (apical) del culmo.

El resultado obtenido para la especie *G. Angustifolia* tiene relación con los obtenidos del ensayo de contracción; sus paredes absorben mucha agua y al secarse se contrae, factor que debe ser tomado en cuenta al momento de ser empleado en lugares con demasiados cambios de humedad relativa.

Figura 69. **Diagrama de comparación de resultados del ensayo de dureza**



Fuente: elaboración propia.

La especie con mayor resistencia a la indentación o presión permanente es *D. Asper* que soportó una carga promedio de 366,76 kg, esta característica da una indicación general de la resistencia mecánica de la especie. Dado que el bambú no es un material homogéneo, los valores varían según la parte del culmo analizado. Como se puede observar en este diagrama la parte superior es el que soporta mayor fuerza a comparación de la base.

La especie *G. Verticillata* presentó buena resistencia al hendimiento de la bola a pesar de ser un material muy delgado, por la flexibilidad de sus fibras. La mayoría de las probetas de esta especie no fallaron por rajadura sino por pequeñas fisuras o porque la bola topaba con el fondo del sistema en el que fueron colocados.



### 5.6.2. Análisis de las propiedades mecánicas

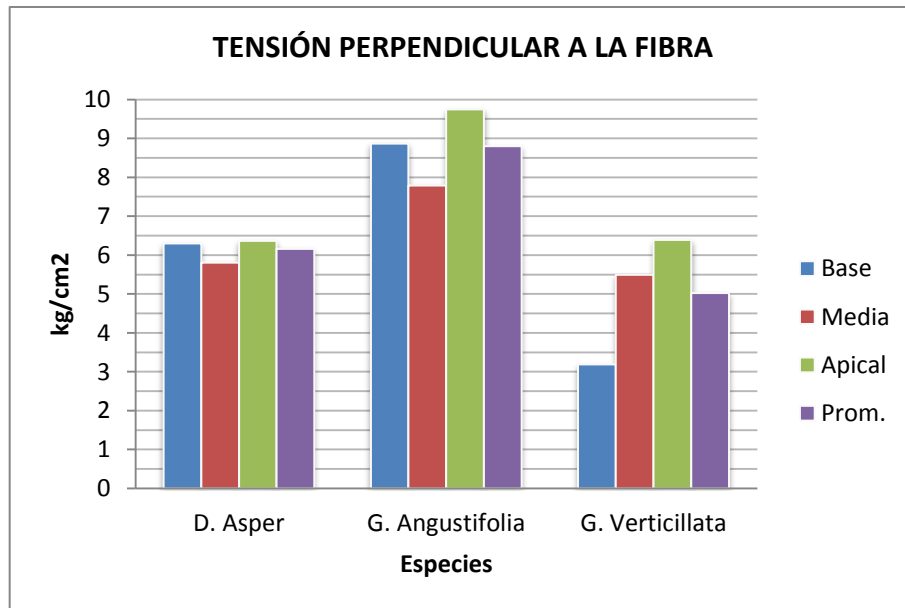
A continuación se realiza el análisis de resultados de cada ensayo realizado a las tres especies. Para ello se hace uso de las tablas de resultados presentados en el inciso 5.3, donde se visualiza el cambio en los valores según la sección del culmo analizado: base, media y apical respectivamente.

Así mismo se hace uso de la tabla LXIX donde se presenta la comparación de los valores promedios entre las tres especies. En base a esta tabla se realizan los diagramas de comparación de resultados que se encuentran a continuación.

Todos los ensayos se realizaron cuando el material se había secado y estaba dentro del rango permitido de humedad. En la mayoría de los ensayos la parte apical del culmo tiene los mejores resultados debido a que el contenido de humedad decrece en esa parte, comprobando de esa forma que su resistencia aumenta conforme la altura útil del culmo.

Según los resultados obtenidos en general la especie con mayor resistencia es el *D. Asper* que presentó esfuerzos altos en la mayoría de los ensayos realizados, seguidamente de ella encontramos la *G. Verticillata* y *G. Angustifolia*.

Figura 70. **Diagrama de comparación de resultados del ensayo de tensión perpendicular a la fibra**



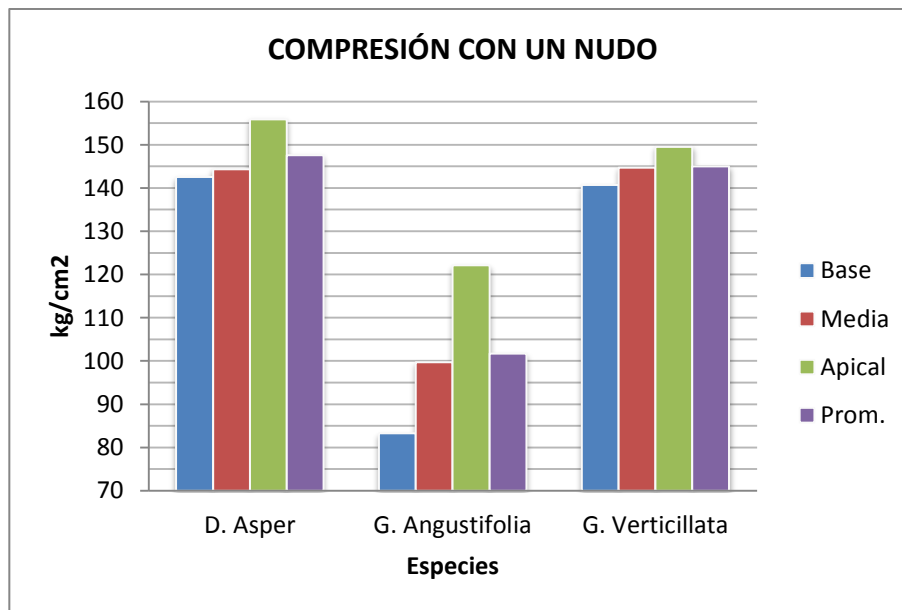
Fuente: elaboración propia.

Según los resultados obtenidos la especie *G. Angustifolia* presentan mayor valor promedio con 8,80 kg/cm<sup>2</sup>. Comparada con las otras especies este valor es mayor a la resistencia de la especie *D. Asper* por un 30 % y mayor a la especie *G. Verticillata* por 42,84 %.

El *D. Asper* es la especie que menos resistencia soporta a comparación de las otras especies.

En cuanto a los valores obtenidos según la porción del culmo analizado, la parte apical presenta mejores resultados, esto se debe al contenido de humedad que presenta el bambú en esta parte del culmo.

Figura 71. **Diagrama de comparación de resultados del ensayo de compresión con un nudo**



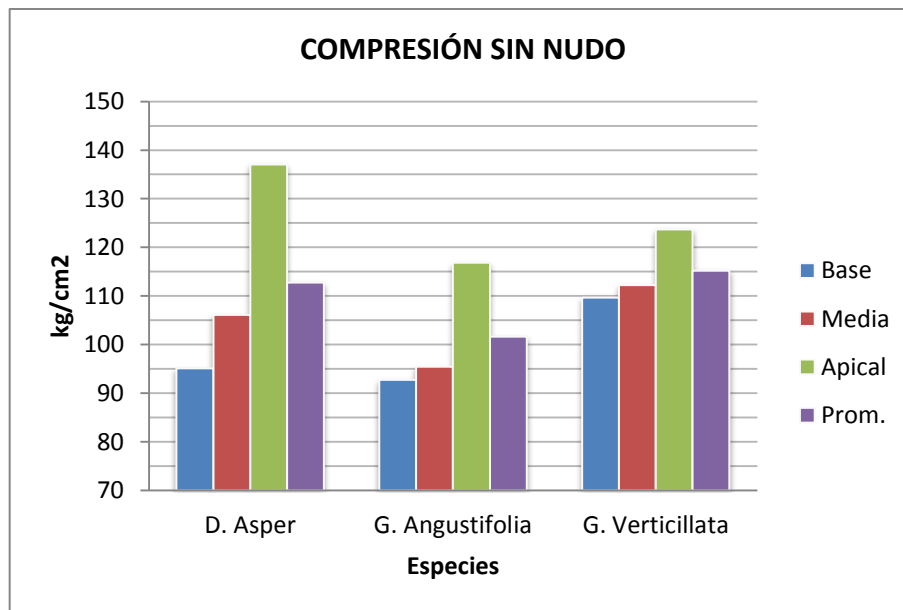
Fuente: elaboración propia.

La especie *G. Angustifolia* es la que menos soportó esta aplicación de carga con, la mayoría de las probetas fallaron por aplastamiento.

Las especies *D. Asper* y *G. Verticillata* no presentan diferencia significativa en sus resultados. La mayoría de las fallas presentadas por la primera especie fue por rajadura, mientras la segunda por corte en el extremo cerca de la aplicación de carga, sin rajarse por completo.

Este ensayo es el más significativo de las tres variaciones del ensayo a compresión, por el hecho de tener un nudo en el centro de la probeta.

Figura 72. **Diagrama de comparación de resultados del ensayo de compresión sin nudo**



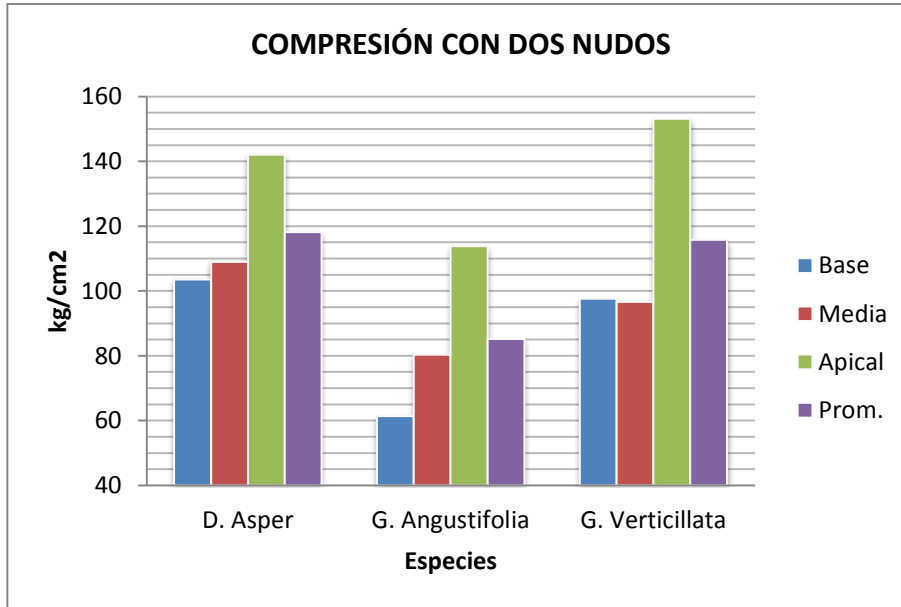
Fuente: elaboración propia.

En este ensayo las probetas se encontraban sin nudo, por lo que la resistencia disminuye a comparación de las que tienen uno y dos. Las especies *D. Asper* y *G. Verticillata* se mantienen con mayor resistencia con 112,76 kg/cm<sup>2</sup> y 115,00 kg/cm<sup>2</sup>.

La especie *G. Angustifolia* es el de menor resistencia con 101,68 kg/cm<sup>2</sup>, la mayoría falló por corte y aplastamiento en los extremos de las probetas. Casi no se nota deformación durante la aplicación de carga para las tres especies.

La parte apical predomina por ser más resistente que las partes basal y media para todas las especies analizadas.

Figura 73. **Diagrama de comparación de resultados del ensayo de compresión con dos nudos**

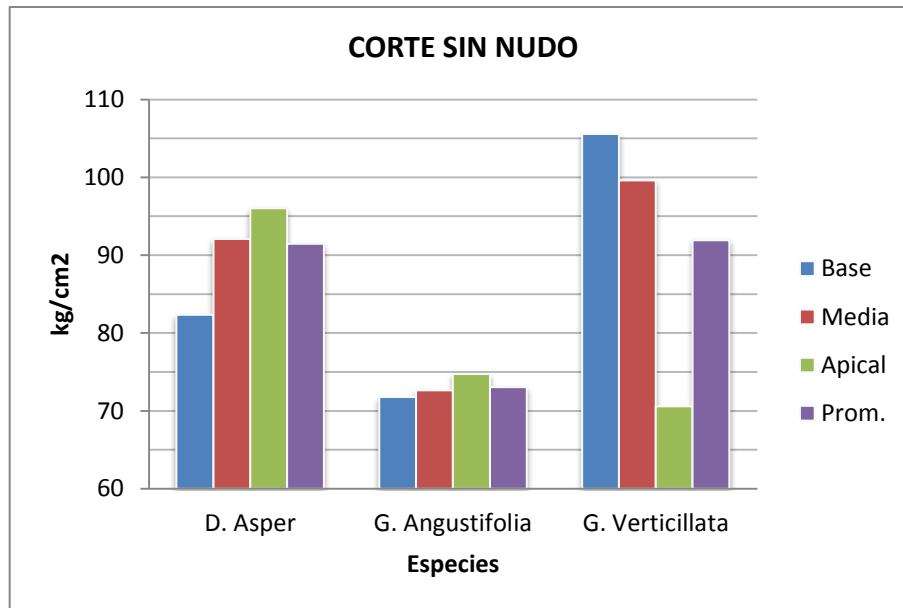


Fuente: elaboración propia.

Esta variación en la probeta de ensayo fue el que presentó mejores resultados para el ensayo de compresión y la deformación fue notoria para las tres especies, las especies *D. Asper* y *G. Verticillata* siguen predominando por tener mayor resistencia, esto los hace ideal para utilizarlo como columnas en la construcción.

La *G. Angustifolia* sigue siendo la especie que menos soporta bajo esta condición de carga. Falló por aplastamiento y corte al igual que el *D. Asper*, mientras que la *G. Verticillata* falló por esbeltez; porque los canutos eran de longitud grande, y por la flexibilidad de sus fibras se deformaban sin rajarse rápidamente como las otras dos especies.

Figura 74. Diagrama de comparación de resultados del ensayo de corte paralelo a la fibra sin nudo



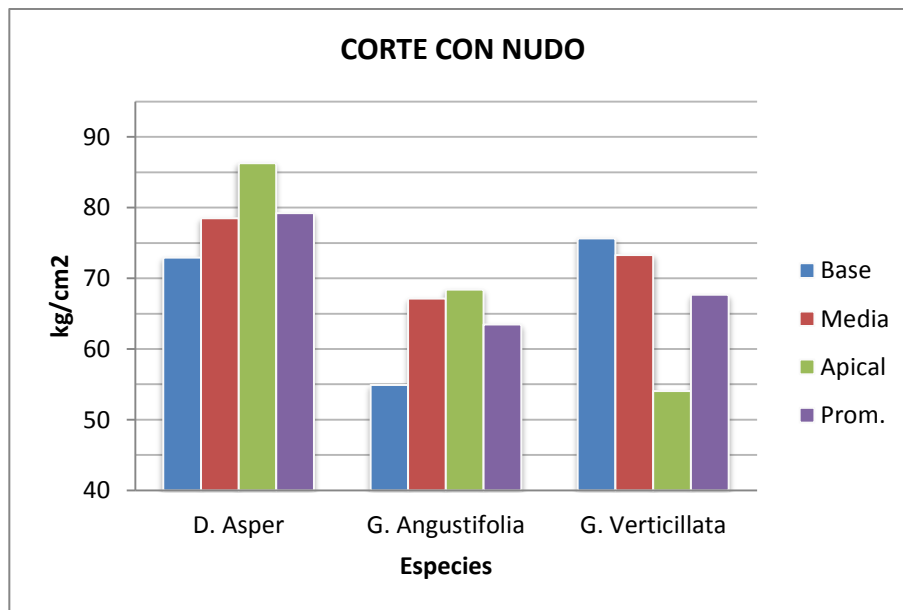
Fuente: elaboración propia.

La especie *D. Asper* tiene buena resistencia al corte, es uno de los que soportó más carga, debido a su dureza y el espesor de sus paredes. La parte apical es el que mejor se comporta bajo esta acción de carga.

Solo en este ensayo (corte con y sin nudo) las secciones de la base y media de la especie *G. Verticillata* soportan mayor carga. En promedio es el que presentó mejores resultados.

La mayoría de las probetas de la especie *G. Angustifolia* fallaron por corte rajándose por completo en cuatro, mientras que el *D. Asper* y algunas de la *G. Verticillata* solo presentaron pequeñas fisuras en el extremo donde los discos de corte tenían contacto con el material.

Figura 75. **Diagrama de comparación de resultados del ensayo de corte paralelo a la fibra con nudo**

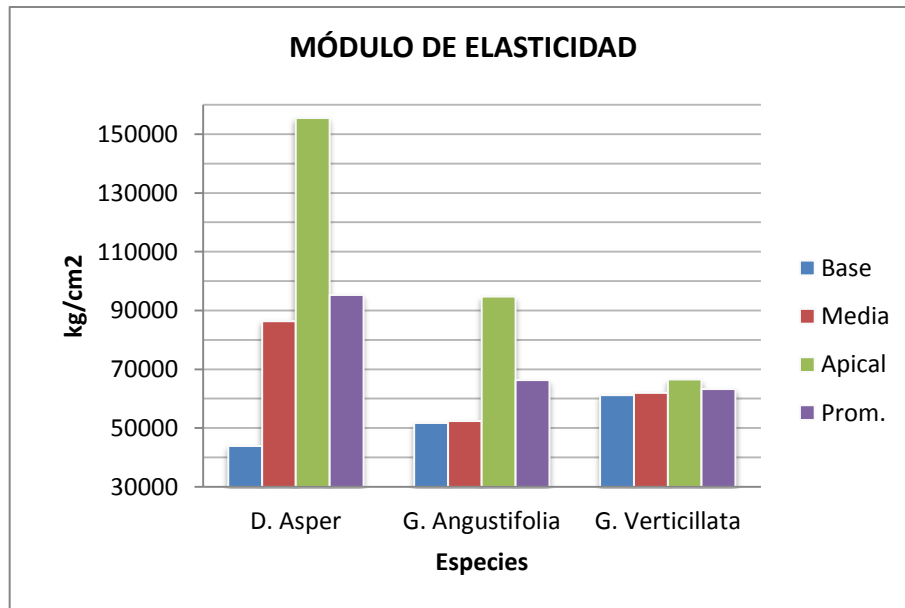


Fuente: elaboración propia.

Como se observa en este diagrama la especie *D. Asper* presentó resultados altos al igual que el ensayo de corte paralelo a la fibra sin nudos, con un promedio de 79,25 kg/cm<sup>2</sup>. Seguidamente después se sitúa la *G. Verticillata* con 67,69 kg/cm<sup>2</sup> y por último está la *G. Angustifolia* con 63,50 kg/cm<sup>2</sup>. Estos últimos datos no están alejado uno de otro, por lo que se puede decir que los valores son similares.

Los valores a lo largo del culmo van cambiando conforme aumenta la altura de este, debido al cambio de humedad que sufre y las características asociadas a la anatomía del bambú.

Figura 76. Diagrama de comparación de resultados del módulo de elasticidad



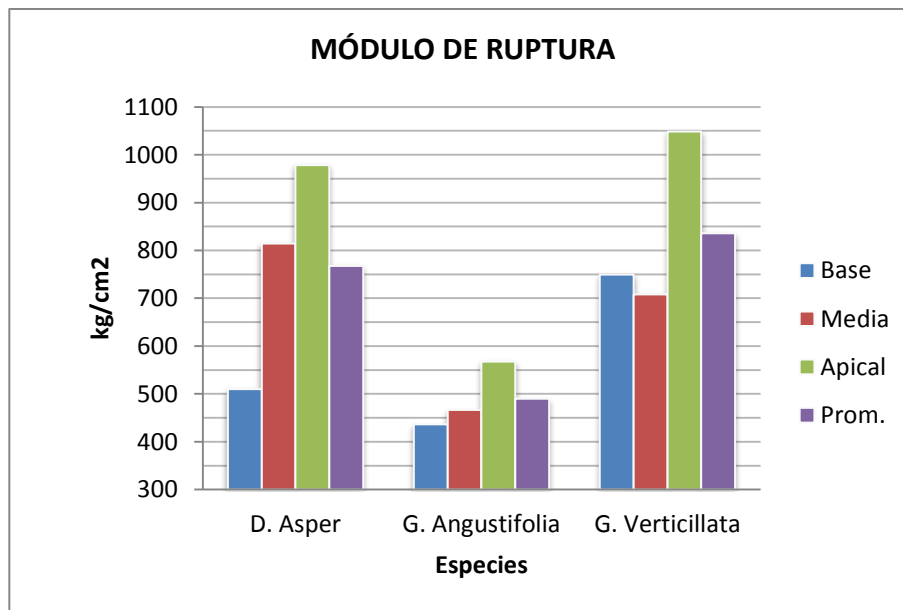
Fuente: elaboración propia.

Estos resultados se obtuvieron a partir del ensayo de flexión, la especie *D. Asper* presenta un valor alto por tener una deformación baja a comparación con la especie *G. Verticillata* debido a que el módulo de elasticidad del material es inversamente proporcional a su deformación. Las secciones de la parte apical presentan mejores resultados como se observa en esta gráfica.

La especie *G. Angustifolia* también presentó un buen resultado con 66 331,68 kg/cm<sup>2</sup> que es un 30,40 % debajo del *D. Asper*. Por último, se encuentra la *G. Verticillata* que está por debajo del valor del *D. Asper* por 33,59 %.



Figura 77. **Diagrama de comparación de resultados del módulo de ruptura**

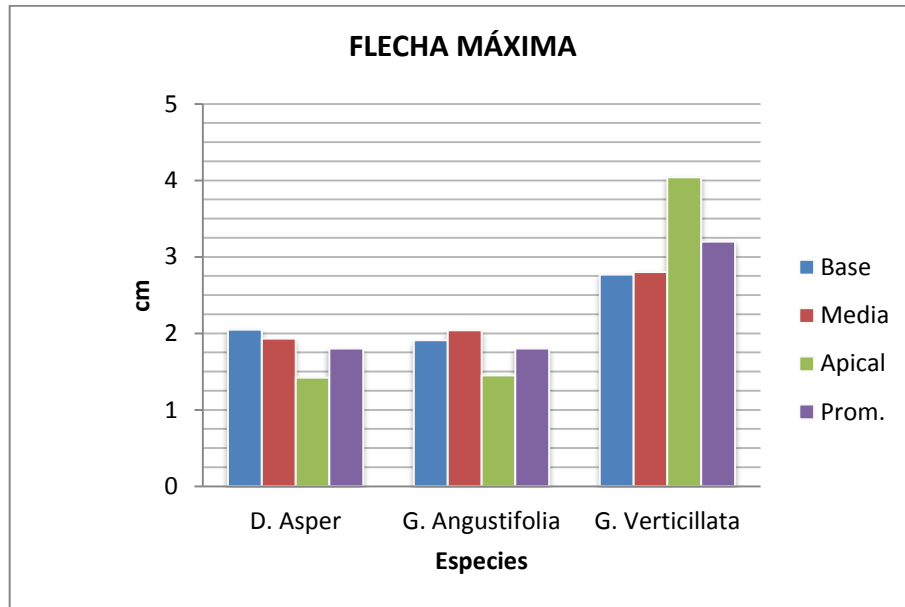


Fuente: elaboración propia.

La especie *G. Angustifolia* es la que menos soportó carga de flexión estática con 490,37 kg/cm<sup>2</sup> presentó fisuras rápidamente antes de llegar a su ruptora total, pese a ser el de menor valor, cumple con el valor del esfuerzo admisible indicado en el inciso 2.6; que es 50 kg/cm<sup>2</sup> para su uso en la construcción.

La especie *G. Verticillata* obtuvo el mejor resultado con 835,83 kg/cm<sup>2</sup>, soportó mucha carga antes de presentar las primeras fisuras, algunas probetas no se rajaron. En cuanto a la variación a lo largo del culmo la sección de la parte apical presenta los mayores valores. La especie *D. Asper* también obtuvo buenos resultados seguidamente del *G. Verticillata*.

Figura 78. Diagrama de comparación de resultados de flecha máxima

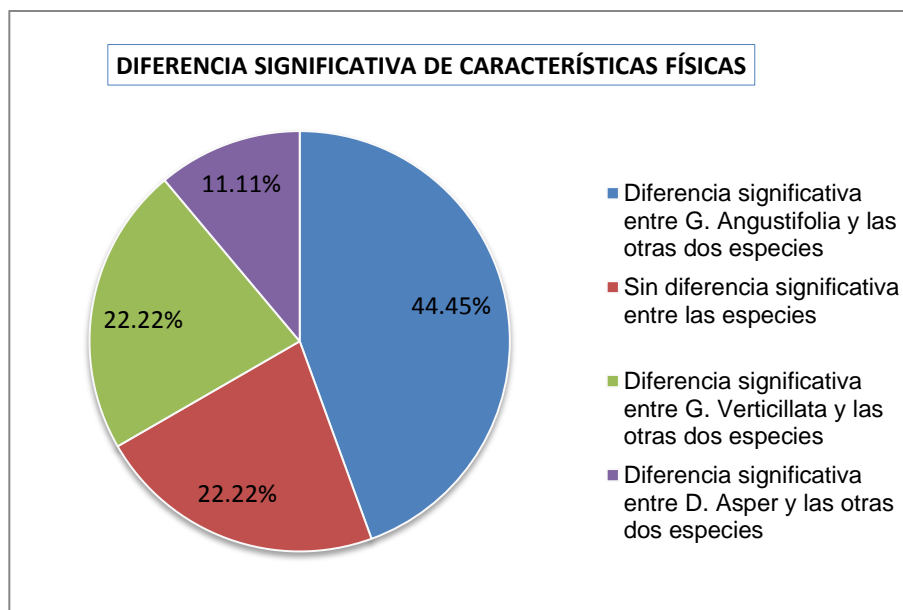


Fuente: elaboración propia.

La especie *G. Verticillata* que es liviano y paredes delgadas presentó bastante deformación al llegar a su ruptura total, la mayoría de probetas se deflectaban sin presentar fallas en sus fibras, recuperando rápidamente su forma original al descargarlo.

La especie *D. Asper* tiene un resultado promedio igual a la de la *G. Angustifolia*, pero soportó mayor carga sin deformarse mucho. Mientras que la segunda mantuvo una relación casi lineal en cuanto a la carga aplicada y su deformación, como se observa en los diagramas de esfuerzo frente a deformación de las figuras 61 al 63.

Figura 79. **Diagrama de diferencia significativa entre los resultados de los ensayos de las características físicas de las tres especies**



Fuente: elaboración propia.

Se realizó una prueba de Tukey en cada uno de los ensayos realizados, para comparar las medias de los resultados obtenidos y determinar si existen diferencias significativas entre las tres especies según las propiedades analizadas

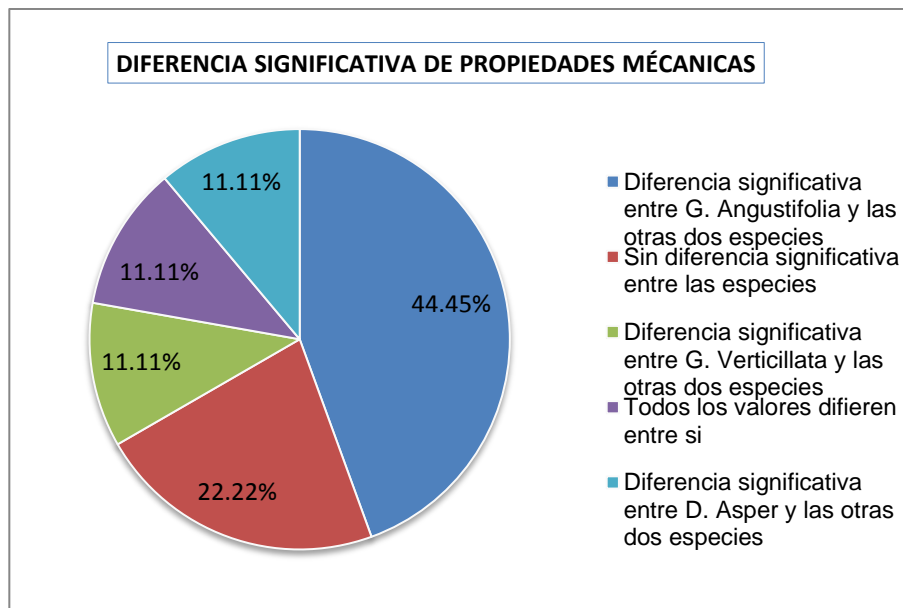
Un 44,45 % de los resultados obtenidos la especie *G. Angustifolia* presentó diferencia significativa con las otras dos especies. Obtuvo mayores valores en el contenido de humedad húmeda, contracción, absorción, y el menor valor para ensayo de dureza. Las otras dos especies tuvieron valores parecidos.

La especie *G. Verticillata* tuvo diferencia significativa con las otras dos especies en los ensayos de densidad y peso específico seco, en conjunto suman un 22,22 % del total de los ensayos. En estas pruebas sus valores fueron muy bajos comparados con las otras especies, clasificándolo como un material liviano.

Un 22,22 % del total de los ensayos físicos no presentó diferencia significativa en sus resultados, estos consisten el peso específico verde y densidad verde, en el que los valores se mantuvieron parecidos.

Únicamente en el ensayo de contenido de humedad seca la especie *D. Asper* presentó diferencia significativa sobre las otras especies, este consiste en un 11,11 %. Este valor fue el más elevado para esta característica física.

Figura 80. **Diagrama de diferencia significativa entre los resultados de los ensayos de las propiedades mecánicas de las tres especies**



Fuente: elaboración propia.

La mitad de los ensayos realizados para las propiedades mecánicas (44,45 %) la especie *G. Angustifolia* presenta diferencias significativas con las otras especies. Estas consisten en las pruebas de compresión con un nudo, compresión con dos nudos y corte sin nudo. Para las tres propiedades los resultados fueron bajos en comparación de las otras dos especies, que se mantuvieron con valores parecidos.

El 22,22 % de los ensayos mecánicos no tuvo diferencias significativas en sus resultados para las tres especies. Estos consisten en la prueba de compresión sin nudo, y el módulo de elasticidad.

Para el ensayo de compresión sin nudo no se presentaron diferencias significativas para las tres especies. Esto representa un 11,11 % del total de ensayos mecánicos.

En el ensayo de tensión paralela a la fibra, todos los resultados obtenidos para las tres especies difieren entre sí, representando un 11,11% de los ensayos realizados.

Para el ensayo de flecha máxima tal y como se observa en figura No. 80 la especie *G. Verticillata* tuvo valores elevados comparados con las otras dos especies, lo que ocasiona que tenga diferencia significativa con ellas. Esto también representa un 11,11 % del total de ensayos realizados.



## CONCLUSIONES

1. Se logró realizar una caracterización física y mecánica de tres especies de bambú aptas para la construcción en Guatemala. Con ella se podrá aprovechar mejor este material, eligiendo la especie más adecuada que cumpla con los requisitos de resistencia mecánica y aptitudes físicas en el elemento estructural que lo requiera, y así realizar un mejor diseño en las edificaciones.
2. Con la recopilación bibliográfica se lograron describir las características de las especies utilizadas para la construcción; los culmos de la *G. Angustifolia* alcanzan 30 metros de altura, y hasta 25 centímetros de diámetro. El *D. Asper* alcanza de 20 a 39 metros de altura, diámetro de 20 a 30 centímetros y espesor de 0,5 a 2 centímetros, sus entrenudos son cortos. La especie *G. Verticillata* es la de menor diámetro (10 centímetros), sus entrenudos son largos y llegan a tener hasta 2 centímetros de diámetro. Todos ellos alcanzan su madurez entre los 4 a 6 años.
3. Se dio a conocer los procedimientos de cada uno de los ensayos para determinar las características físicas y propiedades mecánicas del bambú, según las especificaciones de las normas ASTM D-143, ISO22157 e ISO/TC N315, que describen las medidas de las probetas, especificaciones de carga, ecuaciones para realizar los respectivos cálculos así como el equipo por utilizar.



4. Las regiones identificadas con disponibilidad de las especies de bambú estudiadas en este trabajo son: la costa sur, especialmente en los departamentos de Escuintla, Suchitepéquez, Retalhuleu, Santa Rosa, San Marcos y en áreas de la franja transversal del Norte pero con presencia menor, aunque esta área cuenta con la precipitación para el desarrollo del bambú. El tipo de suelo es distinto, debe ser arenoso con buena retención de humedad.
5. Determinadas las características físicas de las distintas especies analizadas se obtuvo como resultado que la *G. Angustifolia* es el que sufre mayores cambios significativos en sus dimensiones debido a la pérdida de agua durante el proceso de secado. Esto se ve reflejado en los valores obtenidos en los ensayos de contenido de humedad verde y seco, porcentaje de contracción y absorción. En cuanto al peso específico verde y seco el mayor valor lo registró el *D. Asper* con 8 009,64 N/m<sup>3</sup> y 6 949,99 N/m<sup>3</sup>, respectivamente. Esta especie también obtuvo la mayor dureza. Según su densidad el *D. Asper* se clasificó como pesado y las otras dos especies como livianas.
6. Los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas muestran que los mayores valores los presenta la especie *D. Asper* quien registró un módulo de elasticidad de 95 308,72 g/cm<sup>2</sup>. Su resistencia a corte con nudo fue de 79,25 kg/cm<sup>2</sup> así como los mayores esfuerzos de compresión junto a la *G. Verticillata*, mientras que la especie *G. Angustifolia* registró la mayor resistencia de tensión perpendicular a la fibra: 8,80 g/cm<sup>2</sup>. La especie *G. Verticillata* registró los mayores valores para el módulo de ruptura de 835,83 kg/cm<sup>2</sup>, esfuerzo de corte sin nudo de 91,93 kg/cm<sup>2</sup> y una deformación de 3, 20 cm.

7. Luego de obtener los resultados de los diferentes ensayos, se realizaron pruebas de *Tukey* y se determinó que sí existen diferencias significativas entre la *G. Angustifolia* con las otras dos especies estudiadas en un 44,45 % de los ensayos realizados, mientras que en un 22,22 % no existen diferencias significativas. Es decir, los resultados son casi parecidos para las tres especies, 16,66 % para el *D. Asper*, que superó a los otras dos especies, 11,11 % para la *G. Verticillata* que predominó y solamente un 5,56 % del total las tres especies difiere entre sí.



## RECOMENDACIONES

1. Es importante que el bambú tenga un manejo correcto desde la preparación del terreno, cultivo y hasta su corte; que debe ser entre edades de 4 a 6 años, periodo en el cual el bambú ha sazonado y adquirido resistencia física y mecánica para su uso en la construcción. Se recomienda adquirir el material en fincas y lugares donde se le dé un manejo correcto durante su cultivo y eligiendo los bambús que sean lo más recto posible.
2. Debido a que la durabilidad natural del bambú es baja, es necesario aplicarle un tratamiento preventivo después del corte para que no se deteriore o se pudra y para protegerlo de agentes externos como insectos y hongos, prolongando así su tiempo de vida. No es recomendable almacenarlo con contacto con el suelo, ni a la intemperie, sino bajo techo y bien ventilado, en posición vertical.
3. Se debe secar el bambú antes de realizarle las pruebas correspondientes, ya que la resistencia disminuye al estar en estado verde, y no se reflejaría realmente el esfuerzo que soporta. Esto se debe a que el tallo recién cortado trae consigo un alto grado de humedad. Se recomienda reducir al máximo el contenido de humedad utilizando el método de secado más conveniente.

4. Se recomienda seguir las especificaciones de las medidas estipuladas de cada una de las probetas teniendo en cuenta que el material sea de espesores y diámetros aproximadamente constantes para evitar la variabilidad en los resultados. También eliminar las probetas que tengan grietas en los extremos debido al corte o por el proceso de secado, que tengan musgo, perforaciones y cualquier otro tipo de defecto.
5. Para el ensayo a flexión se recomienda cortar las cañas con luces intermedias (1,50m – 2,00m) debido a que si se cortan más pequeñas estas fallan por corte y aplastamiento en los apoyos, y luces mayores por deflexión. Mientras que para este rango, falla por flexión que es el objetivo en este caso; para verificar su comportamiento con este tipo de carga. También se recomienda asegurar el deformímetro para evitar que se dañan al ocurrir la falla, utilizando anillos de soporte evitando medir la deformación cerca de los bordes.
6. Se recomienda que se continúe con investigaciones de las características físicas y propiedades mecánicas del bambú, y aumentar la cantidad del número de muestras de cada una de las tres especies. Esto para realizar un análisis completo en donde se tome como variable la región de donde proviene el bambú, debido a que este proviene de la costa sur y creció con las mismas condiciones de humedad y suelo, lo que redundará en un mayor número de especímenes por ensayar.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ARMIRA, Pedro. *Evaluación de seis tipos de esquejes para la propagación de Arundinaria Willd, Bambusa vulgaris var. Striata Schard ex wendell, Gigantochloa verticillata (will) munro*. Trabajo de graduación de Agronomía. Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1989. 98 p.
2. CALDERÓN CORDÓN, Nilda Lucrecia. *Evaluación del desarrollo de plántulas de bambú a partir de brotes procedentes de yemas primarias y secundarias de las especies Gigantochloa apus y G. verticillata, Patulul, Suchitepéquez*. Trabajo de graduación de Agronomía. Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas, Universidad Rafael Landívar, 2012. 63 p.
3. CASTILLÓN VALDEZ, Brigitte y MALAVER ZAPATA, Diego. *Procedimientos de ensayo para la determinación de las propiedades físico mecánicas de la guadua*. Trabajo de graduación de Ing. Civil y Agrícola. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, 2012. 94 p.
4. FIGUEROA CALDERÓN, Marco Tulio. *El bambú y fibrocemento en la vivienda económica de Mazatenango*. Trabajo de graduación de Arquitectura. Facultad de Arquitectura, Universidad de San Carlos de Guatemala. 143 p.

5. ORDOÑEZ, Víctor Rubén. et al. *Manual para la construcción sustentable con bambú*. México: Comisión Nacional Forestal, 2002. 98 p.
6. LONDOÑO, Ximena. *Distribución, morfología, taxonomía, silvicultura y uso de los bambúes del nuevo mundo*. [en línea] <<http://www.hof-landlust.de/scb/taller.html>> [consulta: 1 de junio de 2016].
7. MENÉNDEZ CAHUEQUE, Raúl. *Caracterización de 11 cultivares de bambú en la finca Chocotá, Suchitepéquez*. Trabajo de graduación de Agronomía. Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1983. 122 p.
8. Ministerio de Vivienda, construcción y saneamiento de Perú. Norma Técnica Peruana E-100, Bambú. Lima. 58 p.
9. Misión Técnica Agrícola de Taiwán - Fondo Internacional de Cooperación y Desarrollo (ICDF-Taiwán). *Guía básica para el cultivo de bambú en Guatemala*. Guatemala, 2014. 59p.
10. MONTERROSO SALAZAR, Josué Jonattan. *Diseño y evaluación de vigas Joist para estructuras de techos livianos, fabricadas con bambú*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2014. 185 p.

11. MORALES JOLÁ, Hernán Eduardo. *Propiedades físico-mecánicas del bambú: 6 especies recolectadas en los departamentos de Guatemala, Santa Rosa y Jutiapa*). Trabajo de graduación de Ing. civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1985. 64 p.
12. OLIVA MAYORGA, Gustavo Adolfo. *Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de cuatro especies de bambú*. Trabajo de graduación de Agronomía. Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1989. 97 p.
13. Proyecto CORPEI-CBI “Expansión de la oferta exportable del Ecuador”. *Perfil de producto bambú (Caña Guadua Angustifolia) “caña brava”*. Ecuador, 2003. 33 p.
14. Proyecto Industrialización del Bambú en Guatemala.
15. SAGASTUME ANDRADE, Francisco. *Muestreo y caracterización preliminar de las especies de la subfamilia Bambusoideae (Poaceae) en la región de la vértice del océano Pacífico*. Trabajo de graduación de Agronomía. Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1986. 140 p.
16. TEJADA VÁSQUEZ, Julio Héctor. *Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de cuatro especies de bambú*. Trabajo de graduación de Agronomía. Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1990. 84 p.



17. UBIDIA, Jorge. *Construir con bambú (Caña de Guayaquil) Manual de construcción*. 3ª. Ed. Perú: Red Internacional de Bambú y Ratán, INBAR, 2015. 98 p.
18. URRUTIA REVILLA, Juan Francisco. *Propiedades Físico-Mecánicas del bambú (estudio preliminar de 6 especies de la finca Chocolá, Suchitepéquez)*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1983. 92 p.
19. VALDEZ CANCINOS, David; CALEL, Leopoldo; GUERRA, Rony; SIS, Juan Carlos. *Evaluación del crecimiento y desarrollo del bambú *Dendrocalamus asper* en cuatro centros de investigación del ICTA*. Guatemala. 2011.
20. VALDEZ CANCINOS. David. *Manual para el cultivo de bambú experiencias en Guatemala*. Guatemala: Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA), 2013. 49 P.

## APÉNDICES

### Apéndice 1. Prueba de Tukey para el ensayo de contenido de humedad verde

Tabla I. **Resumen de promedio y varianza**

Grupos	Tamaño de muestra	Suma	Promedio	Varianza
<i>D. Asper</i>	12	488,97	40,74	26,24
<i>G. Angustifolia</i>	12	953,93	79,49	27,99
<i>G. Verticillata</i>	12	586,95	48,91	82,35

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Análisis de varianza**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	10 013,03	2	5 006,52	39.05	1,998E-09	3,28
Dentro de los grupos	4 230,42	33	128,19			
Total	14 243,45	35				

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Cálculo del diferencia honestamente significativa (HSD)**

HSD	11,41
Multiplicador $q\alpha$	3,49
MSE	128,19
N	12

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Matriz de diferencias entre las especies**

	D. Asper	G. Angustifolia	G. Verticillata
<i>D. Asper</i>		-38,75	-8,16
<i>G. Angustifolia</i>			30,58
<i>G. Verticillata</i>			

Fuente: elaboración propia.

Nota: se realizó el mismo procedimiento para determinar si existe diferencia significativa entre las medias de cada uno de los ensayos de las tres especies