

Efecto de la altura de culmo y presencia de nudos en las propiedades mecánicas del bambú *Otatea fimbriata Sonderst*, especie nativa del sur de México

Effect of culm height and presence of nodes on the mechanical properties of the bamboo Otatea fimbriata Sonderst, species native to southern Mexico

Alberto Muciño-Vélez (*), Herwing Zeth López-Calvo (**), Cesar Armando Guillén-Guillén (*), Elia Mercedes Alonso-Guzmán (***), Héctor Daniel Llaven-José (****)

RESUMEN

La especie de bambú *Otatea fimbriata Sonderst* es endémica de la región de Suchiapa Chiapas, México y se propone como recurso constructivo de vivienda rural. Con el fin de determinar el efecto de la altura y presencia de nudos en sus propiedades mecánicas, se prepararon 180 especímenes de bambú considerando las secciones inferior, media y superior del culmo, con y sin nudos. Los especímenes fueron evaluados mediante pruebas de compresión paralela a la fibra, resistencia a la flexión y tensión bajo normas estandarizadas. Los resultados revelaron la existencia de una variabilidad no significativa en las características mecánicas del culmo con respecto a su altura; además, no se evidenció un efecto significativo en sus propiedades de compresión y tensión por la presencia de nudos, excepto en la resistencia a la flexión. Finalmente, los resultados demostraron que la especie de bambú *Otatea F. S.*, cumple con propiedades mecánicas similares o superiores a las de otras especies de bambú típicamente utilizadas en la construcción al obtener en compresión 49.6 MPa y en tensión 110 MPa, comparando a lo reportado en *Guadua angustifolia*: 108 MPa en tensión, 43.6 MPa en compresión. Los resultados de flexión son de 58.47 MPa lo que resultó debajo de lo reportado en *G. angustifolia*, no obstante, el espesor de pared de la *Otatea F. S.* es de 8.6 mm mientras que la *G. angustifolia* llega hasta 40 mm de espesor de pared. Se concluye que la *Otatea F. S.* tiene potencial para su aprovechamiento en la conformación de elementos constructivos.

Palabras clave: bambú; propiedades mecánicas; altura del culmo; efecto del nodo; material de construcción.

ABSTRACT

The bamboo species *Otatea fimbriata Sonderst* is endemic to the town of Suchiapa Chiapas, Mexico and is proposed as a constructive resource for rural housing. To determine its use, averages of compression parallel to the fiber, resistance to bending and tension are reported considering standardized norms. The effect of height and presence of knots was studied in the lower, middle, and upper sections. The results revealed a non-significant effect on its compression and tension properties due to the presence of knots in the different sections of the culm, except in flexural strength. The results show that the bamboo species *Otatea F. S.*, complies with similar or superior mechanical properties when obtaining 49.6 MPa in compression and 110 MPa in tension, compared to what was reported in *Guadua angustifolia*: 108 MPa in tension, 43.6 in compression. The bending results are 58.47 MPa, which resulted from that reported in *G. angustifolia*, however, the wall thickness of the *Otatea F. S.* is 8.6 mm while the *G. angustifolia* reaches up to 40 mm of wall thickness. It is concluded that the *Otatea F. S.* has potential for its use in the formation of construction elements.

Keywords: bamboo; mechanical properties; culm height; node effect; building material.

(*) Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales (LMSE), Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones en Arquitectura, Urbanismo y Paisaje (CIAUP), Facultad de Arquitectura, Ciudad de México (México).

(**) Cuerpo Académico Tecnología y Sustentabilidad, Maestría en Ciencias de la Construcción, Facultad de Arquitectura 5 de mayo, Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, Oaxaca (México).

(***) Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (FIC-UMSNH), Morelia, Michoacán (México).

(****) Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Chiapas (México).

Persona de contacto/Corresponding author: hz.lopez.calvo@gmail.com (H.Z. Lopez-Calvo).

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6386-0249> (A. Muciño-Vélez); <http://orcid.org/0000-0001-6058-0981> (H.Z. López-Calvo); <https://orcid.org/0000-0002-2596-6122> (C.A. Guillén-Guillén); <https://orcid.org/0000-0002-8502-4313> (E.M. Alonso-Guzmán); <https://orcid.org/0000-0001-5237-1629> (H.D. Llaven-José).

Cómo citar este artículo/Citation: Alberto Muciño-Vélez, Herwing Zeth López-Calvo, Cesar Armando Guillén-Guillén, Elia Mercedes Alonso-Guzmán, Héctor Daniel Llaven-José (2022). Efecto de la altura de culmo y presencia de nudos en las propiedades mecánicas del bambú *Otatea fimbriata Sonderst*, especie nativa del sur de México. *Informes de la Construcción*, 74(565): e425. <https://doi.org/10.3989/ic.81403>

Copyright: © 2022 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

1. INTRODUCCIÓN

El bambú aporta múltiples beneficios para el ambiente y el hombre (1-3) y a pesar de ello hay deficiencia en la información tecnológica del bambú endémico en México (4), lo que provoca la introducción de especies leñosas que por sus características físico-mecánicas conocidas en construcción, desplazan a especies nativas que son subutilizadas en regiones en las que se reproducen en forma abundante (2, 5-11). *La Otatea fimbriata Sonderst* es una especie nativa de las 54 que existen en México (10, 11). Dicha especie, ha sido ampliamente utilizada de modo empírico en la construcción de vivienda tradicional en la región de Suchiapa, Chiapas, México (12). El género *Otatea* incluye siete especies (13) y representa el bambú leñoso nativo con mayor población, convirtiéndose en la especie más utilizada en zonas rurales de México para construir paredes de viviendas tradicionales. (14). En la región de Chiapas habitan 33 especies de bambúes distribuidas en 11 géneros (8 leñosos y 4 herbáceos) dentro de las cuales se encuentran 23 especies nativas y 11 endémicas (13, 15). El tallo del bambú se denomina culmo y es la sección más útil para uso constructivo, tiene forma cilíndrica e internamente es separado de manera transversal con entre nudos huecos o macizos (16, 17), los nudos dan dureza, flexibilidad y resistencia (17). La estructura celular del culmo está orientada longitudinalmente y cubierta externamente por una capa de cera que la protege de la penetración de líquidos en forma lateral, las fibras que conforman al culmo crecen de manera concéntrica radial con mayor cantidad en la parte externa (8). El diámetro del culmo disminuye con la altura, alcanzando su máxima resistencia para su uso en construcción entre los 3 y 6 años (16, 17). Los culmos difieren según la especie, en color, altura, espesor de las paredes y forma de crecimiento, así como la variación de los nudos y entrenudos. (16) Es por ello importante conocer las diferentes propiedades mecánicas en las diversas especies de bambú. En la actualidad diversas especies de bambú alrededor del mundo han sido caracterizadas mecánicamente y los resultados han mostrado características estructurales adecuadas para su uso en la industria de la construcción (18-20) Sin embargo, en literatura consultada hasta el momento, no se han encontrado referencias científicas donde se describan las propiedades mecánicas de la especie de bambú *Otatea fimbriata* s. En la Figura 1, se muestra la localización de la región de origen de la especie de bambú en estudio. Es en el contexto antes mencionado, que la presente investigación tiene como objetivo evaluar el efecto de la altura del tallo, inferior, media y superior, así como la presencia de nudos, en las propiedades de compresión, fle-



Figura 1. Localización de la región de origen de la especie de bambú *Otatea fimbriata* Sonderst.

xión y tensión de la especie de bambú antes mencionada. Los resultados brindaran información relevante sobre las características mecánicas de la especie de bambú evaluado, lo que contribuirá a su óptimo aprovechamiento como material de construcción en la región de estudio.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Preparación de los especímenes y equipo de prueba

Se identificaron culmos considerados maduros (3-6 años) (16) (17) y se cortaron en su longitud total (4000-4500 mm) (14), descartando la parte superior, denominada “varillón”, debido a que dicha sección no resulta de utilidad para la prueba debido a su diámetro inferior a 10 mm (Figura 2) (21). Cada sección tuvo una longitud de 1100 mm, considerando tres secciones equidistantes, sección inferior, media y superior, a lo largo del tallo de cada tramo. Cada tallo se referenció con un número consecutivo como lo establece la norma ISO 22157 para su correcta identificación (20). Previo a la ejecución de las pruebas mecánicas, se calcularon la densidad básica (D_b) y el contenido de humedad en porcentaje (CH) de cada uno de los especímenes; lo anterior, con el fin de cuantificar la influencia de dichos factores en las características físicas y mecánicas, por la presencia de altos contenidos de humedad en el bambú, como ha sido sugerido por otros (22, 23, 24). Para ello, una vez cortadas las secciones de bambú, fueron protegidas de la lluvia y se dejaron secar sin contacto con el suelo por un periodo de 3 meses a la sombra, a una temperatura aproximada de $21 \pm 3^\circ C$ y una humedad relativa de $60 \pm 5\%$ (14).

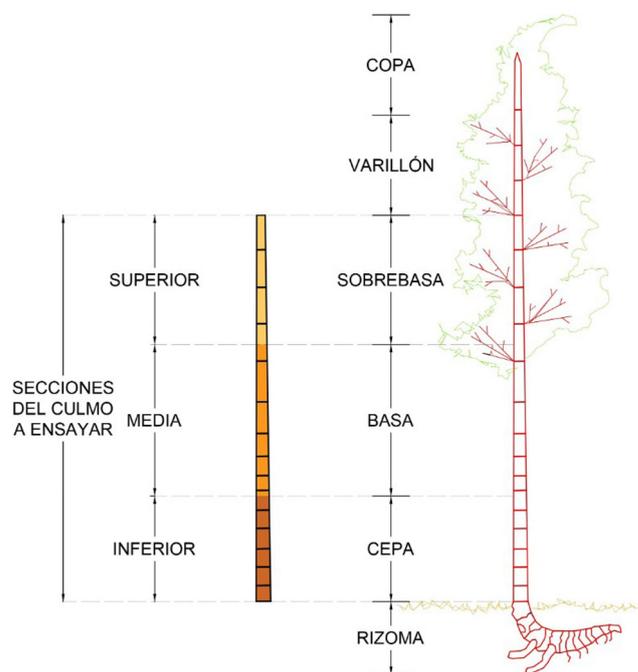


Figura 2. Descripción de las partes de un Bambú. Modificada de Hidalgo López, O. (24).

Previo a su evaluación, cada una de las probetas se pesaron para obtener su peso inicial (m_b) y posteriormente, se secaron utilizando un horno a $103^\circ C \pm 2^\circ C$, durante 24 horas, para obtener su peso seco (m_o). Para poder determinar el volumen de las muestras, en algunas secciones de bambú se midió su volumen (V) por el método de inmersión. Enseguida, se

calcularon los valores correspondientes a la densidad básica (Db) y contenido de humedad (CH) en porcentaje, mediante las ecuaciones [1 y 2]:

$$[1] \quad \rho = m_o / V \times 10^3$$

Donde:

ρ = Densidad (kg/m)
 m_o = Masa seca en horno (g)
 V = Volumen húmedo (ml)

$$[2] \quad CH = (m_h - m_o) / m_o \times 100$$

Donde:

CH = Contenido de Humedad (%)
 m_h = Masa antes del secado (g)
 m_o = Masa después del secado (g)

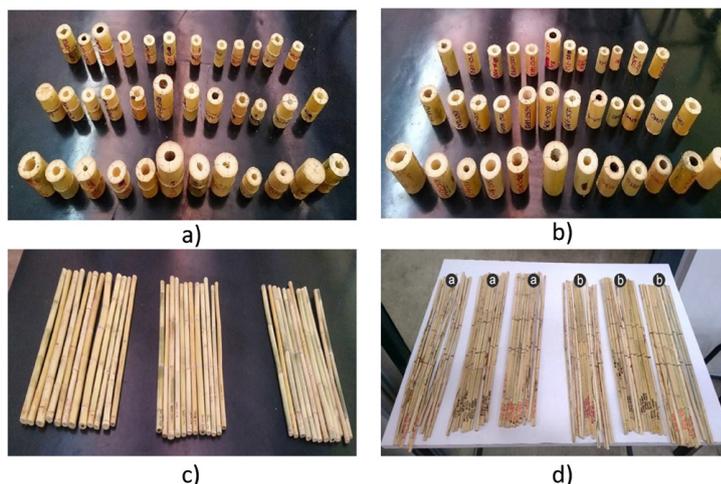


Figura 3. Preparación de especímenes para pruebas mecánicas a) Probetas para compresión con nudo, b) Probetas para compresión sin nudo, c) Probetas para ensayos a flexión, d) Probetas para ensayos a tensión.

Tabla 1. Diseño experimental (tipo de ensayo y número de probetas a evaluar).

Tipo de ensayo	No. de probetas por tipo de ensayo				Dimensiones por ensayo		
	Parte del culmo						
	I	M	S	Total			
No de Probetas para Propiedades físicas					Promedio (mm)		
					ancho	largo	pared
Humedad	20	20	20	60	25	25	8.16
Densidad	20	20	20	60	25	25	8.16
No de Probetas para Propiedades Mecánicas					Promedio (mm)		
Compresión	I	M	S	Total	Diámetro	Pared	Longitud
Con nudo	12	12	12	36	28.97	8.48	57.41
Sin nudo	12	12	12	36	28.69	7.87	56.8
Flexión	I	M	S	Total	Promedio (mm)		
					Diámetro	Pared	Longitud
Con nudo	12	12	12	36	28.97	8.48	705.9
Sin nudo	12	12	12	36	28.76	8.410	706.1
Tensión	I	M	S	Total	Promedio (mm)		
					Ancho	Pared	Área sección mm ²
Con nudo	12	12	12	36	6.05	8.23	49.791
Sin nudo	12	12	12	36	6.40	7.824	50.07

Notas: (I) Sección inferior, (M) Sección media, (S) Sección superior.

Posterior al cálculo de la densidad básica y contenido de humedad, se identificó cada sección del tallo en inferior (I), media (M) o superior (S); posteriormente, como se observa en la Figura 3, se prepararon probetas para pruebas de compresión con y sin

nudo, a flexión y a tensión de acuerdo con la norma ISO 22157 y en concordancia de las normas ISO 22157 (2004a) (25) e ISO (2004b) (26). Las probetas de tensión de la especie *Otatea f. s.* presentan una geometría acorde a sus características morfológicas, (diámetro promedio del culmo 28.97 mm) y acorde a lo discutido en la literatura (3, 6, 25, 26, 27).

En la Tabla 1, se observa a detalle el diseño experimental, donde se enlista el número de probetas a evaluar para cada tipo de ensayo, especificando diámetro, longitud y espesor de pared promedio. Las pruebas mecánicas se realizaron en el Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales (LMSE) de la Facultad de Arquitectura de la UNAM.

El equipo utilizado para la ejecución de las pruebas a flexión y tensión consistió en una máquina universal marca INSTRON®, modelo 400HVLB14362-G2A-C3-D28 con capacidad de 200 toneladas. Para las pruebas de compresión, se empleó una Máquina INSTRON® modelo 400RD-E1-H2 con capacidad de 200 toneladas, ambos equipos cuentan con un sistema de adquisición de datos para la obtención de gráficas y de valores para esfuerzo máximo y en punto de ruptura, ya que la sensibilidad de desplazamiento es de 0.05 mm/s, lo que permite trabajar con las probetas elaboradas en el presente estudio (Figura 4 y 5). Para obtener el peso de las muestras se utilizó una balanza analítica ENTRIS822-1S, con una precisión de 0.01 g., un horno eléctrico con un rango de 103 °C ± 2 °C para secado de material y para determinar la longitud se empleó un calibrador vernier digital, con un rango de 150 mm y una precisión de 0.01 mm.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1. Compresión paralela a la fibra

Los especímenes para las pruebas a compresión se obtuvieron de la parte inferior, media y superior de la sección del tallo. La altura de la probeta fue de dos veces el diámetro con nudo y sin nudo (Figura 6). Para obtener el área de la sección transversal se midió y promedió los diámetros exteriores y los espesores de pared en cuatro puntos sobre ejes ortogonales de la sección. Para la obtención de la resistencia a la compresión, se aplicó una carga a una velocidad constante paralela a la dirección longitudinal de la probeta, registrando la carga máxima a la falla (F_{ult}), similar a lo realizado por otros investigadores (3, 27).



Figura 4. Máquina de pruebas universales INSTRON® modelo 400HVLB14362-G2A-C3-D28, Capacidad 200 toneladas.

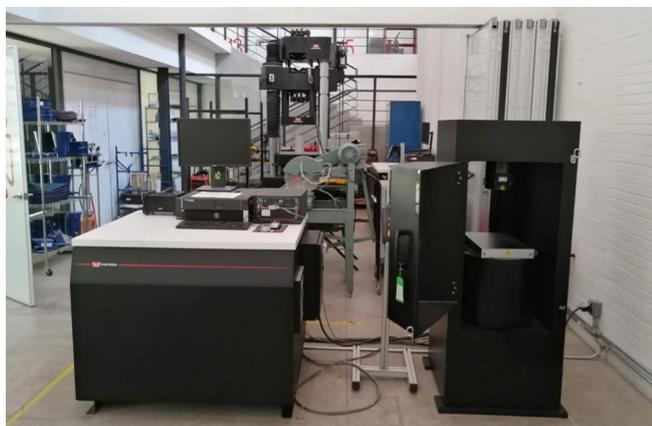


Figura 5. Máquina de Prueba a compresión INSTRON® modelo 400RD-E1-H2 Capacidad 200 toneladas.

Así también, calculó el esfuerzo último de compresión (σ_{ult}) mediante la ecuación [3] y se registró el esfuerzo verdadero (σ_{ver}) de cada ensayo.

$$[3] \quad \sigma_{ult} = F_{ult}/A$$

Donde:

σ_{ult} =Esfuerzo último de compresión (MPa).
 F_{ult} = Carga máxima a la cual falla la probeta (N).
 A = Área sección transversal (mm).

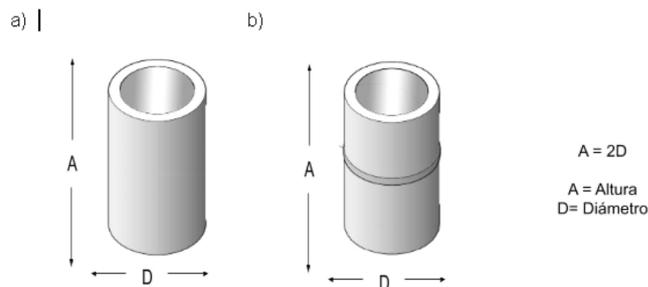


Figura 6. Dimensiones de la probeta en ensayos a compresión. a) sin nudo b) con nudo.

3.2. Flexión paralela a la fibra

Para este ensayo las probetas se ajustaron a lo que establece la norma ISO 22157-1 (25), las cuales se adaptaron a los parámetros de la prueba flexión a 3 puntos con una longitud entre apoyos de 500 mm y una longitud promedio de 700 mm. Para cada uno de los elementos se obtuvo diámetro promedio de 28.76 mm y espesor de pared promedio de 8.41mm (Tabla 1); mediante lecturas en tres secciones en su longitud y de los espesores de pared en cuatro puntos sobre ejes ortogonales de la sección en sus dos extremos. Como se observa en la Figura 4 y 7, la carga se aplicó de manera puntual a la mitad del claro ($L/2$), a una velocidad constante hasta la falla del espécimen. Durante la prueba, se registró la carga máxima aplicada a la falla ($F_{máx}$), con la que fue factible calcular su resistencia última a la flexión, (σ_{ult}) mediante las ecuaciones [4 y 5], respectivamente; obteniendo de igual manera la gráfica de esfuerzo-deformación ($F- \delta$).

$$[4] \quad M = FL/4$$

Donde:

M = Momento máximo flector
 F = Carga máxima aplicada
 L = Claro

$$c = D/2$$

Donde:

c =Distancia perpendicular al eje neutro
 D = Diámetro

$$[5] \quad \sigma_{ult} = (Mc) / I$$

Donde:

σ_{ult} = Resistencia última a la flexión
 M = Momento máximo flector
 c =Distancia perpendicular al eje neutro
 I = Momento de inercia

Con los promedios de diámetros y espesores de pared de la sección transversal del culmo (tallo) se obtiene el momento de inercia (I) de acuerdo con la ecuación [6].

$$[6] \quad I = \pi/64 (D^4 - (D-2t)^4)$$

Donde:

I = Momento de inercia
 t = Espesor de pared

Sustituyendo [4], [6] en [5] se obtiene la resistencia última a la flexión se obtiene:

$$\sigma_{ult} = (M(FL/4) c(D/2)) / (I(\pi/ (D^4 - (D-2t)^4)))$$

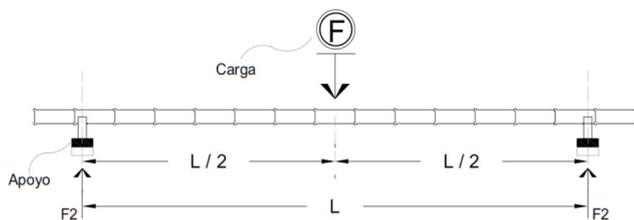


Figura 7. Esquema de las pruebas de flexión estática con bambú.

3.3. Tensión paralela a la fibra

Para ejecutar las pruebas de tensión paralela a la fibra, se cortaron especímenes de la sección transversal, de la parte inferior, media y superior en la dirección radial del tallo. Se obtuvieron 4 probetas de 500 mm de longitud por cada tallo, con nudo y sin nudo, teniendo una longitud efectiva para la probeta de 100 mm y sección transversal igual al espesor de la pared.

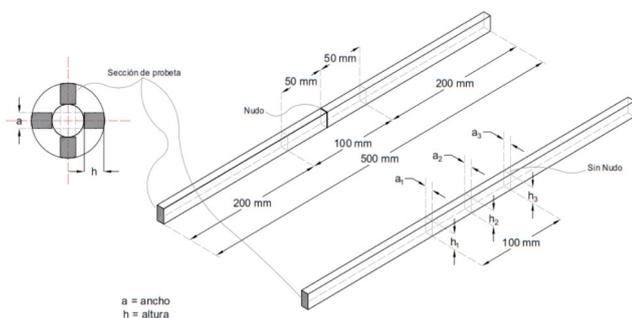


Figura 8. Geometría para las probetas para ensayo a tensión.

De acuerdo con la norma ISO 22157-1 y la NTC 552 2007 (26), se determinó el área de la sección transversal (A), para ello se tomaron medidas de la sección transversal en tres puntos a lo largo de la probeta, obteniendo el promedio en cada caso (Figura 8). Durante la ejecución de las pruebas, se obtuvo la gráfica de carga-deformación y se registró el valor de la carga máxima aplicada a la falla de cada probeta (F_{ult}). Enseguida se calculó el esfuerzo último de tensión (σ_{ult}) mediante la ecuación [1].

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como fue mencionado al inicio de la sección de materiales y métodos, donde se detallan los procedimientos utilizados para la preparación de los especímenes; previo a su evaluación, fue calculada la densidad básica y contenido de humedad en cada una de las probetas de bambú. Los datos derivados de las pruebas de densidad básica (Db), presentados en

la Tabla 2, revelaron que dicho factor se elevó conforme se incrementa la altura del culmo, con valores de 762.96 kg/cm³ (I) a 905.99 kg/cm³ (S), y una media de 886.59 kg/cm³.

Tabla 2. Densidad básica para la *O. fimbriata* de Suchiapa, Chiapas, determinados por sección del culmo inferior, media y superior.

Estadístico	Sección del culmo en kg/m ³		
	Inferior (I)	Media (M)	Superior (S)
Media (X)	762.96	886.59	905.99
Desviación estándar (S)	179.52	294.07	213.35
Coefficiente de Variación (%)	23.53	33.17	23.55

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 3, al hacer una comparación de los valores de Db obtenidos en el presente estudio con los de otras investigaciones (9, 11, 21), es claro que existen discrepancias entre los datos, lo cual, podría atribuirse a las variaciones en las características anatómicas y microestructurales de las diferentes especies de bambú, dicha hipótesis fue comprobada por otros investigadores (28-30), quienes sugieren con base a sus hallazgos que la anatomía y microestructura de las fibras del bambú, influyen de manera determinante en su comportamiento mecánico.

Tabla 3. Valores de densidad básica de otras especies obtenidas de la literatura.

Especie	Db, mínima kg/m ³	Db, máxima kg/m ³	Referencia
<i>Guadua aculeata</i>	370	920	(11)
<i>Guadua angustifolia</i>	620	900	
<i>Dendrocalamus asper</i>	560	700	
<i>Bambusa heterostachya</i>	390	580	
<i>Bambusa vulgaris</i>	690	840	
<i>Bambusa blumeana</i>	390	590	
<i>Chusquea culeou</i>	550	690	
<i>Gigantochloa levis</i>	470	800	(9)
<i>Guadua angustifolia</i>	251	805	
<i>Guadua angustifolia</i>	537	798	(21)
<i>Otatea fimbriata</i>	430	1,580	Datos de los autores

Por otra parte, los resultados del contenido de humedad medido en las probetas de bambú, previo a su evaluación, fluctuaron entre 8 y 12% por lo que no se consideró como un factor que influyera significativamente en los resultados de las pruebas mecánicas; lo anterior, es congruente con lo sugerido por (22) y (23); quienes sugieren, con base a sus hallazgos, que las propiedades mecánicas del bambú tienden a degradarse significativamente cuando el contenido de humedad es superior al 30%.

4.1. Efecto de la altura del culmo en compresión, flexión y tensión

Los resultados de las pruebas de compresión paralela a la fibra, resistencia a la flexión y resistencia a la tensión, obtenidos de probetas de bambú con nudos y sin nudos, se presentan en las Tablas 4-9. Una vez recabados los datos derivados del programa experimental, estos fueron analizados mediante procedimientos estadísticos de acuerdo con (31), empleando el Software R 3.3.2 (32).

Los datos de esfuerzo máximo a la compresión paralela a la fibra se presentan en la Tabla 4. Una revisión más detallada de los datos permite advertir que los especímenes de la parte inferior del culmo presentaron valores promedio de 42.4 MPa, lo que contrasta con los valores obtenidos de especímenes de la parte media y superior, los cuales alcanzaron en promedio 49.60 y 45.47 MPa, respectivamente; pero las diferencias existentes entre los pares de medias no resultan significativas entre las tres secciones analizadas del culmo.

Tabla 4. Esfuerzo máximo en compresión paralela a la fibra (MPa) en *O. fimbriata*, con nudo y sin nudo.

Estadístico Compresión	Sección del Culmo					
	Inferior		Media		Superior	
	Sin Nudo	Con Nudo	Sin Nudo	Con Nudo	Sin Nudo	Con Nudo
Media (X) MPa	42.47	40.42	49.60	46.25	45.47	47.45
Desviación estándar (S)	10.04	9.64	5.96	3.78	6.74	10.01
Coefficiente de variación %	23.63	23.86	12.02	8.17	14.82	21.1
Humedad %	8.76	9.84	9.01	9.13	8.11	10.11
Db kg/m ³	617.75	783.14	880.75	1,119.79	1,177.73	824.38
Xver	42.48	50.45	49.6	57.72	45.47	59.13
XVER = Media de esfuerzo verdadero						

Tabla 5. Comparativa de los valores de resistencia máxima promedio en compresión paralela la fibra de *Otatea fimbriata* y otras variedades de bambú.

Especie	Región	Resistencia (MPa)			Referencia	
		I	M	S		
<i>Guadua aculeata</i>	Puebla	47.9	50.9	56.6	(11)	
<i>Guadua aculeata</i>	Veracruz	42.3	52.5	66.2	(3)	
<i>Guadua Amplexifolia</i>	Veracruz	25.1	33.6	41.8		
<i>Guadua Velutina</i>	Tabasco	29.3	34.9	46.6		
<i>Guadua amplexifolia</i>	Veracruz	25.9	28.8	33.5	(36)	
<i>Guadua angustifolia</i>	Colombia	50.6	56.4	59.7	(10)	
<i>Guadua angustifolia</i>	Colombia	38.1	42.1	42.6	(19)	
<i>Guadua angustifolia</i>	Sin nudo	33.3	43.0	42.2	(37)	
<i>Guadua angustifolia</i>	Con nudo	36.0	39.8	43.6		
Mediana		36.0	42.1	43.6		
<i>Otatea fimbriata</i>	Chiapas	Sin Nudo	42.47	49.60	45.47	Datos de los autores
		Con nudo	40.42	46.25	47.45	

Notas: (I) Sección inferior, (M) Sección media, (S) Sección superior.

Al contrastar los datos obtenidos en el programa experimental mostrados en la Tabla 5, con valores de resistencia a la compresión para diferentes especies de bambú retomados de la literatura (3, 10, 11, 19, 33, 34, 35, 36, 37), es posible constatar que la *Otatea F. S.*, tuvo un comportamiento superior o igual a los valores de resistencia a la compresión obtenidos en experimentaciones similares. Además de lo antes mencionado, los hallazgos también permitieron deducir que, en la mayoría de los casos, entre mayor la altura del culmo, mayor la resistencia a la compresión. De la misma manera, los datos mostraron que no existió un efecto significativo en la resistencia a la compresión de la *Otatea fimbriata* debido a la presencia o no de los nudos.

Tabla 6. Resistencia última en flexión paralela a la fibra (MPa), en condición seca.

Estadístico flexión	Sección del culmo					
	Inferior		Media		Superior	
	Sin nudo	Con nudo	Sin nudo	Con nudo	Sin nudo	Con nudo
Media (X) (MPa)	47.63	10.66	58.47	29.17	48.94	27.21
Desviación estándar (S)	11.09	2.01	14.02	1.04	9.89	2.44
Coefficiente de variación %	18.02	0.07	20.31	0.02	20.45	0.05
Humedad %	11.65		12.06		10.84	
Db (kg/m ³)	871.06		838.96		942.08	

Con respecto a los datos generados de las pruebas de resistencia última a la flexión paralela a la fibra, los cuales son presentados en la Tabla 6, es posible deducir que los especímenes obtenidos de las secciones media y superior del culmo, fueron los que presentaron una mayor resistencia a la flexión al compararlos con aquellos obtenidos de la parte inferior.

Un análisis más detallado de los datos presentados en la Tabla 6, reveló que los especímenes obtenidos de la parte media y superior del culmo sin nudo presentaron valores promedio de 58.47 MPa y 48.94 MPa, respectivamente; en contraste, los especímenes obtenidos de la parte inferior alcanzaron

Tabla 7. Comparación de la resistencia última en flexión paralela la fibra por sección de los culmos de *Otatea fimbriata* y otras variedades de bambú.

Especie	Región	Resistencia (MPa)			Referencia	
		I	M	S		
<i>Guadua aculeata</i>	Puebla	76.6	62.8	73.3	(11)	
<i>Guadua amplexifolia</i>	Veracruz	59.7	66.3	89.2	(3)(33)	
<i>Guadua amplexifolia</i>	Veracruz	77.5	90.9	102.1		
<i>Guadua Velutina</i>	Tabasco	75.6	82.8	88.3		
<i>Guadua angustifolia</i>	Colombia	88.8	91.6	97.8	(19)	
<i>Guadua angustifolia</i>	N/A	113.0	106.0	103.0	(3)(34)	
Mediana		77.1	86.9	93.5		
<i>Otatea fimbriata</i>	Chiapas	Sin Nudo	47.63	58.47	48.94	Datos de los autores
		Con nudo	10.66	29.17	27.21	

Notas: (I) Sección inferior, (M) Sección media, (S) Sección superior.

solo 48.94 MPa en promedio. De acuerdo con dichos hallazgos, es posible asumir que en general, la resistencia a la flexión del bambú tendió a disminuir en un rango aproximado de 20 a 30% a medida que se incrementó la altura del tallo. Dicho hallazgo entra en controversia al analizar la información presentada en la Tabla 7, donde se destacan los datos publicados por otros autores sobre la resistencia a la flexión para otras especies de bambú (3, 11, 19, 33, 34, 35, 36, 37).

Al comparar los datos presentados en la Tabla 7, es interesante observar que conforme aumento la altura del culmo, la resistencia a la flexión tendió a aumentar en la mayoría de los casos; está en concordancia con lo observado en esta investigación.

Los resultados de las pruebas de tensión paralela a la fibra, en probetas con nudo y sin nudo, se presentan en la Tabla 8. Al analizar los datos, es posible advertir que existe una diferencia de entre 11 a 14 % en los valores de tensión paralela a la fibra en especímenes sin nudo, obtenidos de las tres secciones de culmo inferior, media y superior.

Tabla 8. Esfuerzo último en tensión paralela a la fibra (MPa), en condición seca con nudo y sin nudo.

Especie	Región	Resistencia (MPa)			Referencia	
		I	M	S		
<i>Guadua aculeata</i>	Puebla	58.50	92.21	63.60	(11)	
<i>Guadua amplexifolia</i>	Veracruz	154.84	183.96	198.58	(36)	
<i>Guadua angustifolia</i>	N/A	52.25	52.43	47.63	(21)	
<i>Guadua angustifolia</i>	N/A	190.70			(38)	
<i>Guadua angustifolia</i>	Sin nudo	162.60	138.3	202.41	(37)	
<i>Guadua angustifolia</i>	Con nudo	108.00	91.91	175.95		
Mediana		131.42	115.25	183.32		
<i>Otatea fimbriata</i>	Chiapas	Sin nudo	95.15	108.02	92.86	Datos de los autores
		Con nudo	110.00	100.63	94.67	

Tabla 9. Comparación del esfuerzo último en tensión paralela a la fibra (Mpa), en especímenes de *Otatea fimbriata*, con nudo y sin nudo, y otras variedades de bambú.

Estadístico Tensión	Sección del culmo					
	Inferior		Media		Superior	
	Sin nudo	Con nudo	Sin nudo	Con nudo	Sin nudo	Con nudo
Media (\bar{X}) (MPa)	96.15 ^a	110.0 ^a	108.02 ^a	100.63 ^a	92.86 ^a	94.67 ^a
Desviación estándar (S)	23.68	27.05	25.43	43.00	24.69	19.52
Coefficiente de variación %	24.63	24.59	23.55	42.73	26.59	20.62
Humedad %	9.50	9.07	9.41	9.44	9.96	9.54
Db (kg/m ³)	1,178.3	741.4	1,096.4	685.4	1,150.0	696.78

En la tabla 9, se presenta una comparativa de los valores promedio obtenidos de las pruebas de tensión paralela a la fibra con respecto a datos recabados de investigaciones similares (11, 21, 21, 36-40). Al comparar dicha información, es posible advertir que, en la mayoría de los casos, existe una disminución de 22 a 48% en la resistencia a la tensión en aquellos especímenes obtenidos de la parte inferior y media del tallo, con respecto a los especímenes de la parte superior.

Los datos presentados en la Tabla 9, muestran un aumento en la resistencia a la tensión de aproximadamente 14% en los especímenes de la parte superior con respecto a los de la parte media e inferior. Dichos hallazgos, confirman la hipótesis de la existencia de una variabilidad en las características mecánicas del culmo con respecto a su longitud, esto debido quizás, a la variabilidad en el espesor de pared a lo largo del tallo, así como a las variaciones microestructurales que podrían presentarse a consecuencia de su edad de maduración. Esta hipótesis está en total concordancia con los resultados presentados en una investigación similar realizada para evaluar las propiedades mecánicas de dos especies de bambú provenientes de la región del sudeste asiático (27). En este trabajo experimental, de acuerdo con los resultados obtenidos, se concluye que es necesario considerar la no uniformidad en el comportamiento estructural del bambú, debido a la variaciones físicas y mecánicas encontradas a lo largo del culmo.

4.2. Efecto de la presencia de nudos en el culmo

El efecto de la presencia de los nudos en las diferentes alturas del culmo (inferior, media y superior), con respecto a las propiedades mecánicas analizadas del bambú *Otatea fimbriata* Sonderst, se presentan en las Figs. 9-11. Las líneas verticales sobre las barras representan el error estándar de la media. De acuerdo con los resultados, es evidente que la presencia de los nudos en las diferentes alturas del culmo influyeron, aunque en distintos grados, en las propiedades mecánicas del bambú evaluadas.

Un análisis más detallado de los datos presentados en la Figura 9, donde se comparan los resultados de resistencia a la compresión paralela a la fibra en especímenes de las tres secciones de culmo, con y sin nudos; revelo que, en los especímenes sin nudo, hubo un ligero aumento en la resistencia a la compresión conforme se incrementó la altura del culmo. En cuanto a la resistencia a la compresión medida en las probetas con nudo, el valor promedio obtenido de los especímenes de la sección inferior del culmo fue de 40.4 MPa, lo que representa una reducción de entre 11 al 12% con respecto a los 46.2 MPa y 45.4 MPa, obtenidos de los especímenes de las secciones media y superior, respectivamente. Es interesante destacar que dicho comportamiento fue muy similar a lo encontrado en los especímenes sin nudo, lo que podría indicar una ligera variación en la resistencia a la compresión paralela a la fibra con respecto a su altura, sin importar la presencia o no de nudos a lo largo del tallo.

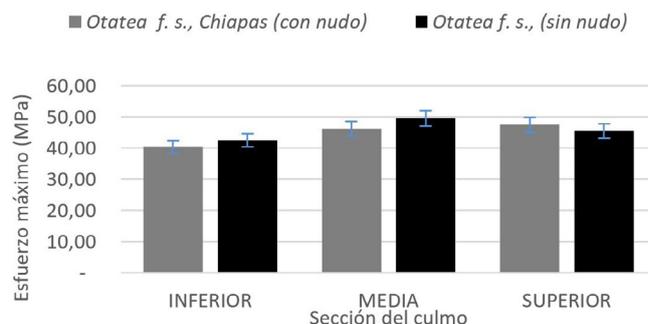


Figura 9. Resistencia máxima a compresión paralela la fibra con respecto a la altura de culmo en especímenes con nudo y sin nudo.

El efecto de la presencia de los nudos en la resistencia última a la flexión, para las tres diferentes alturas del culmo, son reportados en la Figura 10. De acuerdo con los resultados, es evidente que, la presencia de nudos en el culmo influyó de manera negativa en la resistencia a la flexión de la *Otatea fimbriata*. En especímenes con nudo, el promedio obtenido en probetas de la sección inferior fue de 10.66 MPa, para la parte media se obtuvo un promedio de 29.17 MPa y 27.21 MPa para probetas de la sección superior (ver Tabla 6). Al contrastar dichos datos, se observó una disminución mayor al 60% en la resistencia a la flexión en especímenes de la sección inferior con respecto a aquellos obtenidos de la sección media y superior.

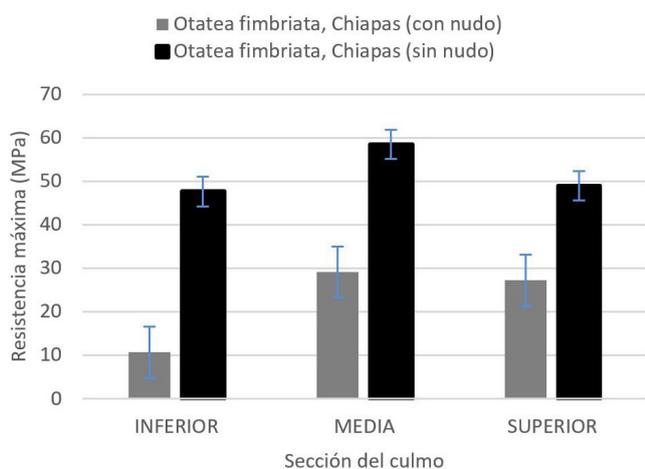


Figura 10. Resistencia última a la flexión paralela la fibra con respecto a la altura de culmo en especímenes sin nudo y con nudo.

Al hacer una revisión de los datos obtenidos de los especímenes con y sin presencia de nudos, los resultados revelaron que en general hubo una reducción en la resistencia a la flexión en las probetas con nudo con respecto a aquellas sin nudos. Específicamente, en los especímenes obtenidos de la sección inferior, su resistencia a la flexión disminuyó en aproximadamente 77%, al comparar los 47.63 MPa obtenidos en promedio para especímenes sin nudos en contraste con los 10.66 MPa obtenidos en aquellos con nudos. En el mismo sentido, al comparar los resultados de especímenes de la sección media, se tuvo una resistencia de 58.47 MPa para probetas sin nudo y 29.17 MPa para probetas con nudo, por lo que la reducción en la resistencia a la flexión fue de aproximadamente 50%. Y para los especímenes de sección superior, la reducción fue de 53%, ya que se obtuvieron valores de 48.94 MPa para especímenes sin nudo y 27.21 MPa para especímenes con nudo. Lo anterior, confirma la hipótesis de que la presencia de nudos en el culmo tuvo un efecto negativo en la resistencia última a la flexión de la *Otatea fimbriata*; sin embargo, dicho efecto se disminuyó aproximadamente en un 25% al incrementarse la altura del culmo.

La longitud efectiva de los culmos es de 4000-4500 mm por lo que para uso a flexión los nudos no pueden ser evitados. Los resultados de las pruebas de esfuerzo último a la tensión paralela a la fibra se reportan en la Figura 11. De acuerdo con los datos, los especímenes con nudos obtenidos para la sección

media alcanzaron 100.6 MPa y 94.6 MPa para los de la superior. Al comparar los datos anteriores con los 110 MPa, obtenidos en los especímenes de la sección inferior, se observa una disminución de 8.5% con respecto a los de la sección media y 14% para los de la sección superior. Ante esto, es posible inferir que, en los especímenes con nudos, el esfuerzo de tensión de la *Otatea fimbriata* disminuyó ligeramente conforme se fue incrementándose la altura del culmo. Lo anterior, contrasta con los resultados obtenidos por (39), quienes concluyeron con base a los resultados de su investigación, que la tensión paralela a la fibra en secciones de bambú con nudo y entre nudo de la especie *gigantochloa atrovioleacea*, aumentó conforme se incrementó la altura del culmo.

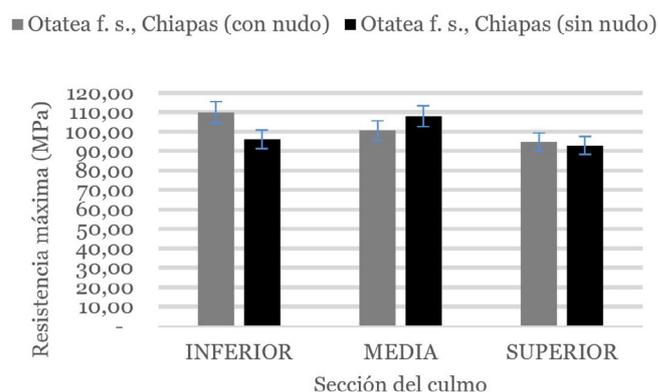


Figura 11. Esfuerzo último en tensión paralela la fibra con respecto a la altura de culmo en especímenes sin nudo y con nudo.

Al comparar los resultados de los especímenes sin nudo y con nudo, no se observó un efecto claro en la tensión paralela a la fibra, debido a la presencia o no de los nudos; dado que, mientras en los especímenes con nudo de la sección inferior hubo un incremento de aproximadamente 12%, con respecto a los sin nudos; en contraste, en la sección media se observó una disminución de aproximadamente 7%, debido a la presencia de los nudos. Finalmente, en los especímenes de la sección superior, se observó un ligero aumento menor al 2%, al comparar aquellos con y sin nudos. Por lo anterior, se puede inferir que la existencia o no de nudos en la *Otatea fimbriata*, no tuvo un efecto significativo en el esfuerzo de tensión paralela la fibra.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente programa experimental, se pueden emitir las siguientes conclusiones generales:

El promedio de espesor de pared de la *Otatea f. s.* es de 8.16 mm con densidad incremental desde la parte inferior de 762.96 kg/m³, 886.59 kg/m³ en sección media y 905.99 kg/m³ en la parte superior, lo que resulta acorde a lo expuesto en otras especies como la *Guadua angustifolia* que posee un diámetro que va desde 23 mm hasta 40 mm y densidad de 537 kg/m³ a 798 kg/m³ [21]. El contenido de humedad se consideró en estado seco por el rango obtenido que va del 8 al 12% lo que reduce la degradación del culmo. [22] [23]. Se discute

la diferencia del espesor de la pared entre las especies y la similitud en su comportamiento a compresión, considerando la mayor densidad que posee la *Otatea f. s.* con relación a la *Guadua angustifolia*, lo cual explica la similitud en resistencia a compresión, aunque la *Otatea f. s.* posee un diámetro menor. (tabla 5) Así como la longitud del culmo efectivo de la *Otatea f. s.* que es de 4000 a 4500 mm, lo que resulta menor en comparación con la longitud efectiva de las *Guaduas*. Las características en el diámetro promedio, longitud efectiva y densidad de la *Otatea f. s.* requiere ser considerado para determinar su aplicación útil en construcción.

Con respecto a los resultados de resistencia última en compresión paralela a la fibra, en general dicha propiedad tendió a incrementarse, entre 10 y 15%, a medida que aumentó la altura del culmo. De la misma manera, los datos mostraron que no existió un efecto significativo en la resistencia a la compresión de la *Otatea fimbriata* debido a la presencia o no de los nudos a lo largo del culmo.

En lo concerniente a la resistencia a la flexión paralela a la fibra, los resultados revelaron que, en general, la resistencia a la flexión del bambú tendió a disminuirse en un rango de aproximadamente 20 a 30% a medida que se incrementó la altura del tallo. Y al comparar los resultados de las probetas con nudos y sin nudos, en general hubo una reducción de 77% en la sección inferior, 50% en la sección media y 53% para la sección superior en la resistencia a la flexión.

Con respecto a los ensayos a tensión paralela a la fibra, los resultados revelaron que, existió una disminución de 22 a 48% en la resistencia a la tensión en aquellos especímenes obtenidos de la parte inferior y media del tallo, con respecto a los especímenes de la parte superior. Al comparar los resultados obtenidos de especímenes sin nudo y con nudo, se

puede concluir que la existencia o no de nudos en la *Otatea fimbriata*, no tuvo un efecto importante en su resistencia a la tensión paralela la fibra.

Al obtener en los ensayos de compresión un promedio de 45.27 MPa y en tensión un promedio de 100.36 Mpa en probetas con y sin nudo y comparando a lo reportado en *Guadua angustifolia*: 43.6 MPa en compresión y 108 MPa en tensión, se comprueba el potencial para uso estructural de la *Otatea f. s.* Los resultados de flexión promedio con y sin nudo son de 37.01 MPa lo que resultó debajo de lo reportado en *G. angustifolia*, la presencia de nudos afectó el desempeño mecánico, no obstante, con base a la información se concluye que la *Otatea f. s.* tiene potencialidades para su aprovechamiento en la conformación de elementos constructivos. Se requiere estudios de durabilidad y preservación para mejorar la aplicación de la *Otatea f. s.* como recurso regional de construcción.

Finalmente, los resultados obtenidos en este programa experimental permiten concluir que, la *Otatea fimbriata* cuenta con características mecánicas similares o superiores a las de otras especies de bambú, tales como: la *guadua aculeata*, *guadua amplexifolia* y *guadua angustifolia*, ampliamente utilizadas en México y en otros países para la construcción de diversas estructuras.

AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales – LMSE– de la Universidad Nacional Autónoma de México. Mtro. Antonio Tahuiton Mora, Técnico Académico del LMSE. El Dr. Alberto Muciño Vélez, Dra. Elia Mercedes Alonso-Guzmán y el Dr. Herwing Zeth López-Calvo agradecen el apoyo del Sistema Nacional de Investigadores de México (SNI-CONACYT).

REFERENCIAS

- (1) Riquelme, M. Á. B., González, M. Á., Acosta, J. L. (2009). El cultivo del Bambú y sus beneficios al medio ambiente. *Agricultura Orgánica*, 37-38.
- (2) Rodríguez, R.M., Galicia, L., Sánchez, W., Gómez, L., Zarco, A., Ceccon, E. (2009). Usos actuales, distribución potencial y etnolingüística del bambú leñoso en México. *Tradiciones transformaciones en Etnobotánica*, 355-363. <http://scifunam.fisica.unam.mx/mir/el/marinacapitulodelibroRodriguez.pdf>.
- (3) Ordóñez-Candelaria, V.R., Bárcenas-Pazos, G.M. (2014). Propiedades físicas y mecánicas de tres especies de guaduas mexicanas (*Guadua aculeata*, *Guadua amplexifolia* y *Guadua velutina*). *Madera y bosques*, 20(2), 111-125. <http://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v20n2/v20n2a10.pdf>.
- (4) Candelaria, V.R.O. (1999). Perspectivas del bambú para la construcción en México. *Madera y Bosques*, 5(1), 3-12. <https://www.redalyc.org/pdf/617/61750102.pdf>.
- (5) Cortés Rodríguez, G. (2000). Los bambúes nativos de México. *Biodiversitas*, 30, 12-15.
- (6) Cedeño Valdiviezo, A., Irigoyen Castillo, J. (2011). El bambú en México. *Usjt. Arq. Urb* (Brasil), 6, 223-243. <https://revistaarqurb.com.br/arqurb/article/download/317/287>.
- (7) Moreno, M.E.N.D., Jakob, S.I.B. (2012). El aprovechamiento del bambú para impulsar el desarrollo económico sustentable en México. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, 176. <https://www.eumed.net/cursecon/ecolat/mx/2012/desarrollo-economico-sustentable-mexico.pdf>.
- (8) Instituto de Ecología (2013). *Usos del bambú*. Gobierno de México. (En línea, último acceso: 6-3-2018): <http://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/bienesmuebles-inmuebles/17-cienciahoy/137-usos-del-bambu>.
- (9) Osorio, A.F.C., Espinosa, W.J.E. (2012). Resistencia a la compresión paralela a la fibra y determinación del módulo de elasticidad de la *Guadua angustifolia* del municipio de Pitalito-Huila (Trabajo de Grado). Universidad Surcolombiana, Colombia. http://www.usmp.edu.pe/centro_bambu_peru/pdf/Capera_Erazo_Trabajo_grado_USCO.pdf.
- (10) Tam, C.P.T., González, C.E. (2007). Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la *Guadua angustifolia* y determinación del módulo de elasticidad. *Ingeniería y Universidad*, 11(1), 89-104. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2343080.pdf>.
- (11) Zaragoza-Hernández, I., Ordóñez-Candelaria, V.R., Bárcenas-Pazos, G.M., Borja-de la Rosa, A.M., Zamudio-Sánchez, F.J. (2015). Propiedades físico-mecánicas de una guadua mexicana (*Guadua Aculeata*). *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 17(3), 505-516. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000045>.

- (12) Mejía-Saulés, M. (2016). Colección nacional de bambúes nativos de México: Su contribución al conocimiento científico y tecnológico, de 1er Congreso de Bambú, Conocimiento, aplicaciones y oportunidades del bambú., México, 2016. <https://1ercongresobambu.files.wordpress.com/2017/02/teresa-mejc3ada-coleccc3b3n-nacional-de-bambe-3baes-nativos-de-mc3a9xico.pdf>.
- (13) INECOL (2018). Los bambúes en el siglo XXI: Diversidad, especies útiles y conservación, de 11th World Bamboo Congress proceedings, Xalapa, México, 2018. <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/2017-06-26-16-35-48/17-ciencia-hoy/518-los-bambues-de-mexico-en-el-siglo-xxi>.
- (14) Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), (2002). *Manual para la construcción Sustentable con Bambú*. (En línea- último acceso: 6-3-2018). https://www.conafor.gob.mx/biblioteca/documentos/MANUAL_PARA_LA_CONSTRUCCION_SUSTENTABLE_CON_BAMBU.PDF.
- (15) Rodríguez, G.C. (2015). Claves morfológicas de los géneros y especies de bambúes (Poaceae: Bambusoideae) de México. *Phytotaxa*, 236(1), 001-024. <http://dx.doi.org/10.11646/phytotaxa.236.1.1>.
- (16) Mercedes, J.R. (2006). *Guía Técnica Cultivo del Bambú*. Santo Domingo, República Dominicana: CEDAF, 38. <http://190.167.99.25/digital/bambu.pdf>.
- (17) Montiel-Longhi, M. (1998). Cultivo y uso del bambú en el neotrópico. *Revista de Biología Tropical*, 46(3), 11-18.
- (18) Arista-González, G., Cataño-Barrera, A., Ortiz-Ramírez, R. (2014). Exploración de nuevas especies de bambú y su aplicación en el campo de la construcción, de Memorias de las Asambleas Nacionales. ASINEA, Guanajuato.
- (19) Correal D, JF, Arbeláez C.J. (2010). Influencia de la edad y la altura sobre las propiedades mecánicas del bambú *Guadua angustifolia* de Colombia. *Maderas Ciencia y Tecnología*, 12(2), 105-113. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2010000200005>.
- (20) Gauss, C., Savastano Jr, H., Harries, K.A. (2019). Uso de métodos de prueba mecánicos ISO 22157 y caracterización del bambú brasileño *P. Edulis*. *Construcción y Materiales de Construcción*, 228, 116728. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116728>.
- (21) Aponte, A.F.G. (2016). Caracterización físico-mecánica de la guadua en el municipio de Guaduas-Cundinamarca (Magister en Construcción). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/57630/1010187540.2016.pdf?sequence=1>.
- (22) Jakovljević, S., Lisjak, D. (2019). Investigación sobre los efectos de la humedad en las propiedades mecánicas y físicas del bambú. *Construcción y materiales de construcción*, 194, 386-396. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.030>
- (23) Xu, Q., Harries, K., Li, X., Liu, Q., Gottron, J. (2014). Propiedades mecánicas del bambú estructural después de la inmersión en agua. *Estructuras de Ingeniería*, 81, 230-239. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.09.044>.
- (24) Hidalgo-López, O. (1981). *Manual de construcción con bambú*. Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Estudios Técnicos Colombianos LTDA Editores.
- (25) International Organization for Standardization (2004). ISO 2004a. Bamboo - Determination of physical and mechanical properties - Part 1: Requirements. ISO/TR 22157-1. ISO, Switzerland.
- (26) International Organization for Standardization (2004). ISO. 2004b. Bamboo—Determination of physical and mechanical properties —Part 2: Laboratory manual. ISO/TR 22157-2. ISO, Switzerland.
- (27) Chung, K.F., Yu, W.K. (2002). Propiedades mecánicas del bambú estructural para andamios de bambú. *Estructuras de Ingeniería*, 24 (4), 429-442. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00110-9](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00110-9).
- (28) Hao, H., Tam, LH, Lu, Y., Lau, D. (2018). Un estudio atomístico sobre el comportamiento mecánico de los constituyentes de la pared celular del bambú. *Compuestos Parte B: Ingeniería*, 151, 222-231. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.05.046>.
- (29) Akinbade, Y., Harries, K.A., Flower, C.V., Nettleship, I., Papadopoulos, C., Platt, S. (2019). Comportamiento mecánico del bambú a través de paredes de culmo. *Construcción y Materiales de Construcción*, 216, 485-495. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.214>.
- (30) Hu, D., Song, B., Dang, L., Zhang, Z. (2018). Efecto de la velocidad de deformación sobre las propiedades mecánicas del material de bambú en condiciones de carga cuasiestática y dinámica. *Estructuras Compuestas*, 200, 635-646. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.107>.
- (31) Maya Echeverry, J.M., Camargo García, J.C., Mosquera, O.M. (2017). Características de las cañas de *Guadua* según sitio y estado de madurez. *Colombia Forestal*, 20 (2), 180-190. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2017.2.a06>.
- (32) Core Team (2018). *A Language and Environment for Statistical Computing*. Foundation for Statistical Computing.
- (33) Medrano, M.T.S., Mújica, J.A.E., Gutiérrez, R.S.R. (2016). El bambú como elemento estructural: la especie *Guadua Amplexifolia*. *Nova Scientia*, 8 (17), 657-677. <https://doi.org/10.21640/ns.v8i17.451>.
- (34) Moreno, L.A.C., Rojas, W.G.H., Junco, O.J.G. (2012). Caracterización de la *Guadua Angustifolia* Kunth cultivada en Miraflores (Boyacá) de acuerdo con la NSR-10. *Facultad de Ingeniería*, 21(33), 53-71. <https://www.redalyc.org/pdf/4139/413940772006.pdf>.
- (35) Ciro Velásquez, H.J., Osorio Saraz, J.A., Vélez Restrepo, J.M. (2005). Determinación de la resistencia mecánica a tensión y cizalladura de la *Guadua angustifolia* Kunth. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 58(1), 2709-2715. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-28472005000100010.
- (36) Oka, G.M., Triwiyono, A., Awaludin, A., Siswosukarto, S. (2014). Efectos de la posición del nudo, entrenudo y altura sobre las propiedades mecánicas del bambú *Gigantochloa atroviolacea*. *Ingeniería Procedia*, 95, 31-37. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.162>
- (37) Molari, L., Menstrasti, L., Fabiani, M. (2020). Caracterización mecánica de cinco especies de bambú italiano. *Estructuras*, 24, 59-72. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.12.022>.

- (38) Gauss, C., Savastano Jr, H. y Harries, KA (2019). Uso de métodos de prueba mecánicos ISO 22157 y caracterización del bambú brasileño *P. Edulis*. *Construcción y Materiales de Construcción*, 228, 116728. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116728>.
- (39) Ghavami, K. (2005). Bambú como refuerzo en elementos de hormigón estructural. *Compuestos de Cemento y Hormigón*, 27 (6), 637-649. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.06.002>.
- (40) Richard, M.J., Harries, K.A. (2015). Sobre la flexión inherente en las pruebas de tensión del bambú. *Ciencia y Tecnología de la Madera*, 49(1), 99-119. <https://doi.org/10.1007/s00226-014-0681-9>.