



Propiedades físicas y mecánicas de tres especies de guaduas mexicanas

(*Guadua aculeata*, *Guadua amplexifolia*

y *Guadua velutina*)

Physical and mechanical properties of three Mexican guaduas
(*Guadua aculeata*, *Guadua amplexifolia* and *Guadua velutina*)

Víctor Rubén Ordóñez-Candelaria¹ y Guadalupe Martha Bárcenas-Pazos¹

¹ Instituto de Ecología, A.C. Red de Ambiente y Sustentabilidad, victor.ordonez@inecol.mx.

RESUMEN

Se determinaron algunas propiedades físicas y mecánicas de tres de las cinco especies del género *Guadua* que crecen en México con la finalidad de fomentar su uso en la construcción, aprovechando su comportamiento estructural. Las especies estudiadas fueron *Guadua aculeata*, *Guadua amplexifolia* y *Guadua velutina* sobre las que es conocido que poseen características adecuadas para la construcción de vivienda tradicional. Se recolectaron en los estados de Veracruz y Tabasco. Para *G. velutina* y *G. amplexifolia* los valores de densidad relativa básica (pa/vv) que se obtuvieron fueron entre 0,399 y 0,393 para la parte basal de los culmos, y de 0,514 y 0,506 para la parte superior. Para esta misma propiedad *G. aculeata* mostró valores ligeramente más altos, 0,429 en la parte basal y 0,653 para la parte superior de los culmos. De manera semejante los valores de resistencia en flexión (MOR), en condición verde, obtenidos fueron, en general, más bajos para la parte basal y más altos en la parte superior. Para *G. velutina* fueron entre 75,5 MPa y 88,3 MPa; para *G. amplexifolia* de 77,0 MPa y 102,1 MPa; y para *G. aculeata* de 59,7 MPa a 89,2 MPa.

PALABRAS CLAVE: bambú, compresión, cortante, flexión, módulo de elasticidad, módulo de ruptura.

ABSTRACT

A test program on some physical and mechanical properties of three out of the five *Guadua* species growing in Mexico was carried out to promote their use in construction taking advantage of their structural behavior. Those species were *Guadua amplexifolia*, *Guadua velutina* and *Guadua aculeata*, which are traditionally well known to have characteristics for vernacular housing. Samples were collected in Veracruz and Tabasco states. Values obtained for *G. velutina* and *G. amplexifolia* basic relative density (ow/gv) range from 0,393 to 0,399 for the lowest part of culms, and from 0,506 to 0,514 for the top. *G. aculeata* showed values slightly higher, 0,429 in the base, 0,653 for top of culms. Values of bending strength (MOR), in green condition, were, generally, lower for base specimens and higher for top specimens. Bending strength values for unseasoned bamboo for *G. velutina* ranged from 7,5 MPa to 88,3 MPa; while *G. amplexifolia* were from 77,0 MPa to 102,1 MPa; and for *G. aculeata*, varied from 59,7 MPa to 89,2 MPa.

KEY WORDS: bamboo, compression, shear, bending, modulus of elasticity, modulus of rupture.

INTRODUCCIÓN

La madera de bambú se utiliza en México, de manera rústica, para edificar viviendas y otras construcciones menores en el medio rural, en donde crece naturalmente (Gutiérrez y Dorantes, 2005a y 2005b). Su uso y técnicas son tradicionales y locales basados en el conocimiento empírico heredado y de la disponibilidad de los bambúes locales (Cortés 2005a y 2005b).

Sin embargo, su calidad y durabilidad se pueden incrementar con la participación de arquitectos, ingenieros, tecnólogos de la madera y otros profesionales que generen o incrementen la información sobre las especies que se utilizan en la construcción, principalmente sobre sus propiedades físicas y mecánicas, su durabilidad natural, y sistemas de preservación o conservación, diseños arquitectónicos, sistemas constructivos, diseño estructural y de uniones (Ordóñez, 1999, Rodríguez, 2006). También se requiere más investigación sobre su distribución geográfica, identificación de especies, taxonomía, anatomía y silvicultura (Cortés, 2000). Muchos de estos temas se desarrollan en otros países como Ecuador, Colombia, Brasil, Costa Rica, China, India, y otros en donde crece naturalmente o ha sido introducido con fines comerciales (Cruz, 1994; Hidalgo, 1978 y 2003; Janssen, 2000; Lindholm y Palm, 2007; Mejía y Castillo, 1987; Tamolang *et al.*, 1980; Villegas, 2003). De los bambúes que crecen en México, entre 20 y 30 especies son consideradas como leñosas (Cortés, 2005), de estas, las guadas tiene tradición de ser utilizadas en la construcción (Gutiérrez y Dorantes, 2005a y 2005b).

La evaluación de las propiedades mecánicas del bambú se ha llevado a cabo utilizando estándares locales o regionales con culmos completos (Mohmod *et al.*, 1993; Luna *et al.*, 2013; Correal y Arbaláez, 2010), o basados en normas para madera con especímenes rectangulares (Cobos y León, 2007; Kamruzzama *et al.*, 2008; Li, 2004; Lindholm y Palm, 2007; Osorio *et al.*, 2007; Valero *et al.*, 2005).

En México es muy escasa la información sobre las características tecnológicas de los bambúes (Ángeles *et al.*, 2005; Gómez, 2002) que presentan condiciones

como para ser utilizados en construcciones permanentes con mejores diseños arquitectónicos y estructurales (Correal y Arbeláez, 2010; Ordóñez, 2005), que permitan mejorar los sistemas constructivos actuales y proponer diseños novedosos utilizando un material vegetal barato, fácil de cultivar, y con reconocida tradición en otros países.

Este trabajo es el primer intento en el nivel nacional para determinar de manera metódica y estandarizada las características de los bambúes que crecen en el país, tomando como base la propuesta de normas para ensayos de laboratorio en el nivel mundial (Janssen 1999a y 1999b). La norma para ensayos de laboratorio con bambú fue emitida en 2005 (ISO, 2005).

Para el estudio se seleccionaron las especies *Guadua aculeata*, *Guadua amplexifolia* y *Guadua velutina* porque sus características de diámetro, altura y forma resultan las más adecuadas para su uso en la construcción de viviendas.

OBJETIVOS

Determinar algunas propiedades físicas y mecánicas del tallo de tres especies de *Guadua* nativas de México, *Guadua aculeata* (Rupr. ex E. Fourn.) Hitchc., *Guadua amplexifolia* (Presl) R. & S., y *Guadua velutina* Londoño & L. Clark, en su sección tubular.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios de recolecta

Con base en la información de la distribución de las especies nativas de guadas en México (Beetle *et al.*, 1987, Pohl y Davidse, 1994) (Figs. 1 a 3) y el apoyo del Biól. Gilberto Cortés, reconocido por su amplio conocimiento sobre las especies nativas de bambú, se seleccionaron los sitios de recolecta. Los culmos de *Guadua amplexifolia* se recolectaron en el poblado de Monte Blanco, Veracruz; los de *Guadua velutina* en la población de Huimanguillo, Tabasco, y los de *Guadua aculeata* en Misantla, Veracruz. Los datos de los sitios de recolecta se presentan en la tabla 1.



FIGURA 1. Distribución de la *Guadua aculeata* en México (adaptado de Beetle *et al.*, 1987).



FIGURA 2. Distribución de *Guadua amplexifolia* en México (adaptado de Beetle *et al.*, 1987).



FIGURA 3. Distribución de *Guadua velutina* en México (con base en Pohl y Davidse, 1994).

De acuerdo con lo establecido por Janssen (1999a y 1999b), el tamaño de la muestra recolectada fue de 24 culmos (12 para ensayar en condición verde y 12 en condición seca), para lograr un equilibrio entre el costo de los ensayos y la confiabilidad estadística de los resultados, de 95%. En el caso de *G. aculeata* la plantación presentó ataques biológicos que no hicieron posible recolectar el número suficiente de ejemplares (Tabla 1).

Características del material

Los culmos se cortaron hasta una altura en la que su diámetro no fue mayor de 5 cm, considerando que un diámetro menor ya no es útil para la construcción. Cada tallo fue identificado de manera inequívoca por sitio de recolecta y con un número consecutivo. Se midió y registró su longitud aprovechable; y se dividió en tres tramos iguales, identificándolos como tramos basal (B), medio (M) y extremo superior (E).

Preparación de los especímenes y equipos

El material recolectado se transportó inmediatamente al laboratorio de pruebas del Inecol en Xalapa, Ver. Se separaron los 12 culmos para ensayar en condición “verde” sin permitir que perdieran humedad, y los restantes se pusieron a secar protegidos de la acción directa e intermitente de la lluvia y el sol, hasta que alcanzaron un contenido de humedad en equilibrio con las condiciones ambientales de la región de Xalapa, entre 18% y 20%. Se prepararon especímenes para ensayos de flexión estática de cada porción de los culmos (base, media y extremo), de acuerdo con lo establecido en la propuesta de norma de Janssen (1999a y 1999b). Las bases y aplicadores de cargas se diseñaron y fabricaron *ex profeso*, tomando como base los modelos presentados por el mismo autor.

Realización de ensayos

Los ensayos, en dos condiciones de humedad (verde y seca), se realizaron en una máquina universal de ensayos con capacidad de 25 t con un sistema de adquisición de datos para la obtención de gráficas. Para cada ensayo se

TABLA 1. Sitios de recolecta de las guadas mexicanas.

Colecta	Especie	Sitio de recolecta	Coordenadas geográficas		Número total de culmos	Longitud, m		D_b , cm
			Latitud norte	Longitud oeste		Total	Aprovechable	
1	<i>G. amplexifolia</i>	Monte blanco, Ver.	19° 22' 44"	96° 55' 53"	24	15,6	9,8	9,80
2					12	11,7	8,2	6,77
3	<i>G. velutina</i>	Huimanguillo, Tab.	17° 51' 06"	93° 36' 00"	22	12,5	7,6	6,86
4					4	14,5	11,1	7,98
5	<i>G. aculeata</i>	Misantla, Ver.	19° 57' 53"	96° 51' 27"	9	14,4	11,7	7,60
6					8	19,1	12,9	7,68

Db = Diámetro en la base.

obtuvieron los valores de esfuerzo y módulo de elasticidad en flexión y compresión, esfuerzo en cortante, densidad básica relativa (con base en el peso anhidro y el volumen verde (pa/vv) y el contenido de humedad al momento del ensayo. Por tipo de ensayo se estimaron los estadísticos básicos por sección del culmo y especie.

Flexión estática

Se diseñaron y fabricaron un aplicador de carga y los soportes inferiores de manera que se ajustaran a la sección circular del culmo para que no se desarrollaran concentraciones de esfuerzos durante el ensayo en el punto de aplicación de carga ni en las reacciones (Fig. 4). A cada espécimen se le midió el diámetro exterior en tres secciones de su longitud y se obtuvo el diámetro promedio, con este valor se determinó el claro de carga (l), igual a, por lo menos, 30 veces el diámetro promedio de cada uno (Janssen, 1999a y 1999b). El montaje de la prueba se ilustra en la figura 4; la carga se aplicó a los tercios del claro ($l/3$), a velocidad constante hasta la falla total de cada espécimen.

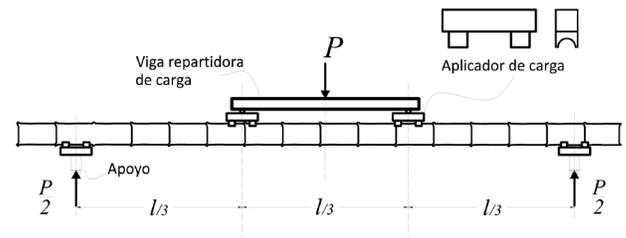


FIGURA 4. Esquema de las pruebas de flexión estática con bambú.

Se registró la carga máxima ($P_{máx}$) a la falla para calcular el módulo de ruptura, MOR (Ec. 1); y se obtuvieron gráficas de carga-deflexión ($P-\delta$), para calcular el esfuerzo en el límite de proporcionalidad f_{lp} (Ec. 2) y el módulo de elasticidad MOE (Ec. 3). Después de cada ensayo, se cortó el espécimen transversalmente lo más cercano a la falla, pero sin incluirla, y se midieron el diámetro exterior (De) y los espesores de sus paredes (e) en dos direcciones ortogonales. Con los promedios de estos valores se estimó el momento de inercia, I (Ordóñez y Salomón, 2009).



$$MOR = \frac{P_{\max} l De_{prom}}{12I} \quad (1)$$

$$f_{lp} = \frac{P_{lp} l De_{prom}}{12I} \quad (2)$$

$$MOE = \frac{23Pl^3}{1296I\delta} \quad (3)$$

Nomenclatura descrita en el Anexo I.

Compresión paralela a la fibra

Los especímenes para este ensayo se obtuvieron de secciones de los de flexión estática que no presentaron falla después del ensayo. Se seleccionaron únicamente especímenes sin nudos, con una longitud (l) de 100 mm, que permitiera colocar el medidor de deformaciones holgadamente. Se midieron los diámetros exteriores de sus extremos, y los espesores (e) de sus paredes en cuatro puntos sobre ejes ortogonales de la sección, y se obtuvieron los promedios en ambas dimensiones para obtener el área (A), idealizando la sección como un anillo. Se aplicó carga, en la dirección de la longitud de la probeta, hasta la falla total. Se registraron la carga a la falla ($P_{m\acute{a}x}$) y la gráfica carga-deformación. Se calcularon el esfuerzo máximo, $f_{c_{m\acute{a}x}}$ (Ec. 4) y el módulo de elasticidad, E en compresión (Ec. 5).

$$f_{c_{m\acute{a}x}} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A} \quad (4)$$

$$E = \frac{Pl_c}{\delta A} \quad (5)$$

Nomenclatura descrita en el Anexo I.

Cortante paralelo a la fibra

Los especímenes para estos ensayos se obtuvieron de secciones de los de flexión estática que no presentaron fallas después del ensayo, ni nudos, con una longitud de

10 cm. Se tomaron medidas de las longitudes y espesores de sus paredes en cuatro puntos sobre ejes ortogonales de la sección transversal de cada uno de los extremos de los especímenes, y se obtuvo el promedio de las dimensiones (h, e) para calcular el área de cortante (Av). El aplicador de carga y la colocación del espécimen se ilustran en la figura 5. Se aplicó carga hasta la ruptura ($P_{m\acute{a}x}$) y se calculó la resistencia en cortante paralelo a la fibra, f_v (Ec. 6).

$$f_v = \frac{P_{m\acute{a}x}}{Av} \quad (6)$$

Nomenclatura descrita en el Anexo I.

Contenido de humedad y densidad relativa básica

Se obtuvo una porción de cada espécimen ensayado (flexión, compresión y cortante) al finalizar la prueba correspondiente, la cual fue pesada inmediatamente (PI), después se midió su volumen verde (VV), por el método de inmersión, y finalmente se obtuvo su peso anhidro (PA) secándola en una estufa con circulación forzada de aire, a $103 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, por 48 horas. En el caso de ensayos en condición verde el PI y VV se obtuvo inmediatamente al término de los ensayos. En los ensayos en condición seca, el orden de medición fue PI, PA y finalmente el VV saturando el espécimen en agua hasta que no varió su peso. Se calcularon la densidad básica y el contenido de humedad con las ecuaciones 7 y 8.

$$DB = \frac{PA}{VV} \quad 7$$

$$CH(\%) = \frac{PI - PA}{PA} 100 \quad 8$$

Nomenclatura descrita en el Anexo I.

Para cada propiedad se estimaron el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación, por sección del culmo y contenido de humedad.

RESULTADOS

Los resultados de los ensayos por especie se presentan en las tablas 2 a la 7. Por cada ensayo y especie se presentan el tamaño de muestra ensayada finalmente, ya que por las características propias del material o fallas no aceptadas el número de resultados obtenidos no fue igual para cada especie o sección del culmo.

Los resultados en seco ($CH < 30\%$) se presentan como un índice del comportamiento del bambú seco, ya que el tamaño de muestra es variable y muy pequeño para

ser considerado como válido para el material de toda la especie.

En las figuras 5 a 10 se ilustran la diferencias de los valores promedio por sección del culmo (basal, medio y extremo superior) para cada una de las propiedades obtenidas. Para fines comparativos, se han incluido datos de *G. aculeata* de Hueytamalco, Pue., tomados de Zaragoza (2012).

TABLA 2. Resultados de flexión estática en condición verde de tres *Guadua* nativas de México.

Propiedad	Sección del culmo	<i>Guadua aculeata</i>			<i>Guadua amplexifolia</i>			<i>Guadua velutina</i>		
		μ	σ	cv (%)	μ	σ	cv (%)	μ	σ	cv (%)
Número de especímenes	Basal	14			8			9		
	Medio	14			11			10		
	Extremo	11			10			10		
Contenido de humedad promedio, %	Basal	129			145			184		
	Medio	96			131			162		
	Extremo	67			106			133		
Densidad relativa básica (PA/VV)	Basal	0,473	0,09	19	0,427	0,03	8	0,391	0,05	13
	Medio	0,561	0,09	15	0,476	0,05	10	0,430	0,07	15
	Extremo	0,668	0,11	16	0,546	0,06	12	0,492	0,09	19
Esfuerzo en el límite de proporcionalidad, f_{lp} , MPa	Basal	39,1	13,1	33	46,7	10,4	22	47,6	7,6	16
	Medio	46,1	14,0	30	55,5	12,0	22	51,2	8,1	16
	Extremo	62,2	16,2	26	67,5	16,4	24	61,7	16,5	27
Módulo de ruptura, MOR , MPa	Basal	59,7	16,3	27	77,0	13,8	18	75,6	14,2	19
	Medio	66,3	16,7	25	90,9	10,4	11	82,8	9,4	11
	Extremo	89,2	25,1	28	102,1	17,3	17	88,3	21,1	24
Módulo de elasticidad, MOE , GPa	Basal	13,8	2,1	15	14,5	2,3	16	15,4	3,3	22
	Medio	16,8	2,7	16	18,3	2,1	11	17,3	2,1	12
	Extremo	19,5	3,1	16	22,7	3,7	16	19,6	3,1	16



TABLA 3. Resultados de flexión estática en condición seca de *Guadua velutina* de la región de Huimanguillo, Tab.

Propiedad	Sección del culmo	<i>Guadua velutina</i>		
		μ	σ	cv (%)
Número de especímenes	Basal	4		
	Medio	2		
	Extremo	3		
Contenido de humedad promedio, %	Basal	17		
	Medio	18		
	Extremo	15		
Densidad relativa básica (PA/VV)	Basal	0,418	0,09	21
	Medio	0,475	0,09	19
	Extremo	0,563	0,05	8
Esfuerzo en el límite de proporcionalidad, f_{lp} , MPa	Basal	38,6	5,1	13
	Medio	--	--	--
	Extremo	50,1	17,7	35
Módulo de ruptura, MOR, MPa	Basal	72,2	10,0	14
	Medio	85,0	16,4	19
	Extremo	93,1	9,1	10
Módulo de elasticidad, MOE, GPa	Basal	14,8	2,6	17
	Medio	18,2	3,7	21
	Extremo	21,1	2,1	10

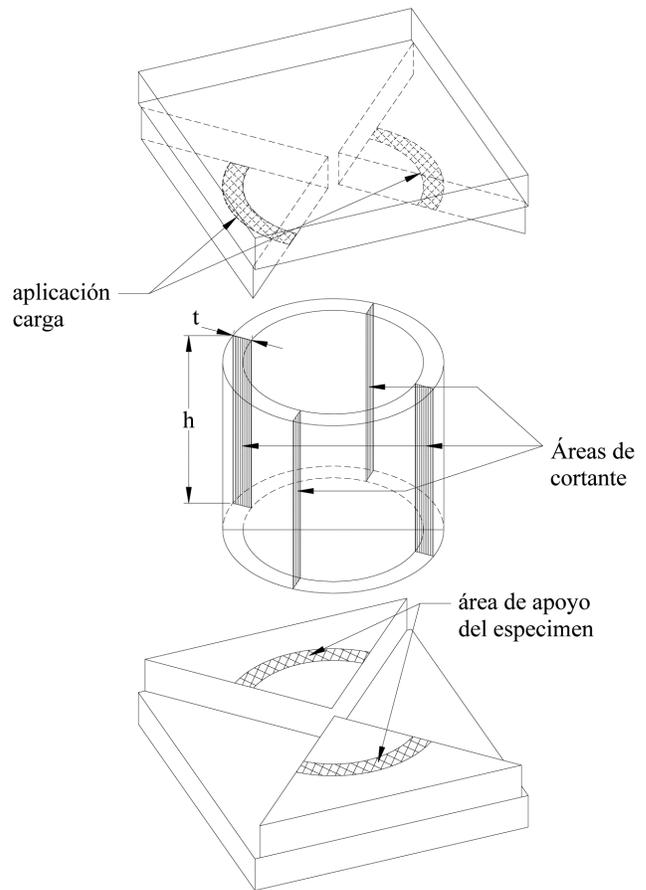


FIGURA 5. Esquema del ensayo de cortante paralelo a la fibra.

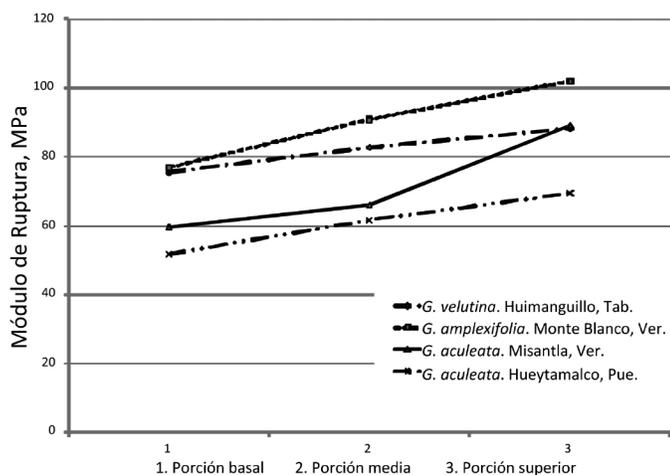


FIGURA 6. Comparación de módulo de ruptura (MOR), promedio por sección de los culmos, en flexión en condición verde de tres *Guaduas* nativas de México.

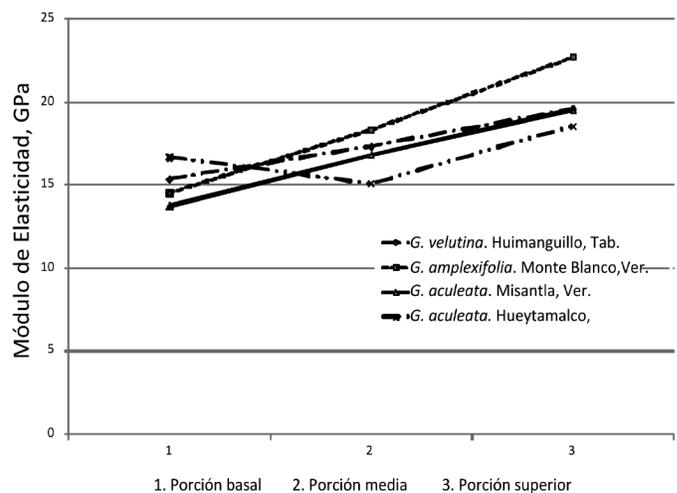


FIGURA 7. Comparación de módulo de elasticidad (MOE), promedio por sección de los culmos, en flexión de tres *Guaduas* nativas de México.

TABLA 4. Resultados de compresión paralela en condición verde de tres *Guaduas* nativas de México.

Propiedad	Sección del culmo	<i>Guadua aculeata</i>			<i>Guadua amplexifolia</i>			<i>Guadua velutina</i>		
		μ	σ	cv (%)	μ	σ	cv (%)	μ	σ	cv (%)
Número de especímenes	Basal	13			13			8		
	Medio	13			11			9		
	Extremo	10			11			12		
Contenido de humedad promedio, %	Basal	146			151			176		
	Medio	113			138			134		
	Extremo	70			114			118		
Densidad relativa básica (PA/VV)	Basal	0,480	0,09	18	0,436	0,07	15	0,386	0,05	12
	Medio	0,542	0,09	17	0,458	0,06	13	0,477	0,075	16
	Extremo	0,677	0,9	13	0,510	0,05	10	0,488	0,10	20
Esfuerzo en el límite de proporcionalidad, f_{lp} , MPa	Basal	16,3	6,9	42	17,5	6,0	35	14,2	3,2	22
	Medio	20,9	9,7	46	22,4	6,4	28	19,3	7,1	37
	Extremo	30,4	6,0	20	26,5	6,8	26	22,3	9,1	41
Esfuerzo máximo en compresión paralela, $f_{c_{max}}$, MPa	Basal	28,5	8,4	29	24,9	4,3	18	18,8	2,3	12
	Medio	33,5	10,0	30	28,5	4,3	15	26,2	7,3	28
	Extremo	45,4	8,4	19	34,1	5,9	17	28,4	11,0	39
Módulo de elasticidad, E , GPa	Basal	8,7	2,4	28	8,4	1,8	22	8,5	4,5	53
	Medio	13,8	5,9	43	10,8	2,7	25	9,9	2,3	23
	Extremo	18,9	4,7	25	12,3	2,9	22	12,6	4,7	37

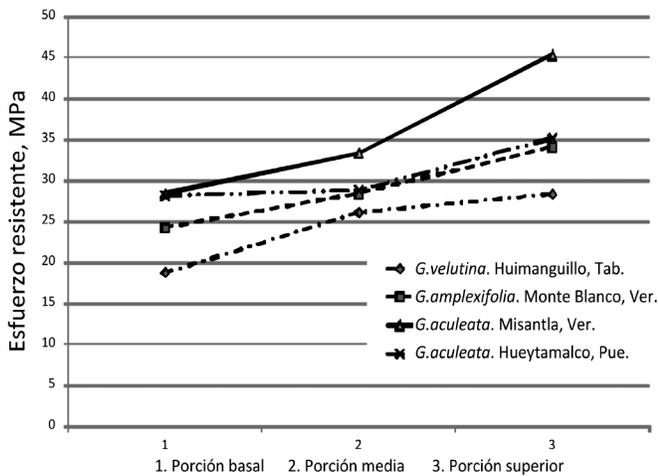


FIGURA 8. Comparación de la resistencia máxima (f_c), promedio por sección, de los culmos en compresión paralela la fibra en condición verde de tres *Guaduas* nativas de México.

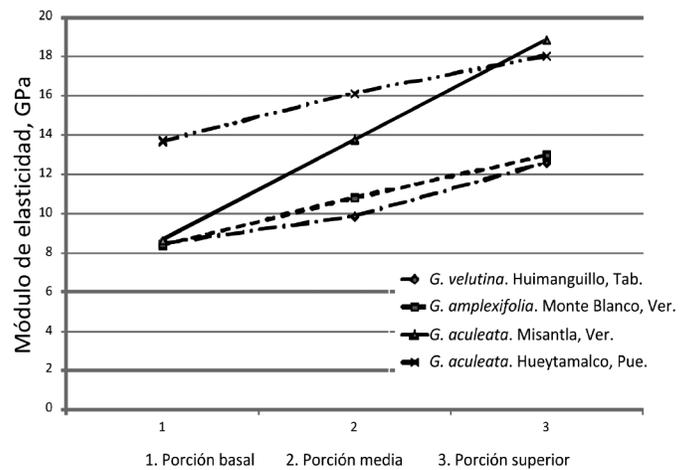


FIGURA 9. Comparación de módulo de elasticidad (E) promedio por sección de los culmos en compresión paralela a la fibra en condición verde de tres *Guaduas* nativas de México.



TABLA 5. Resultados de compresión paralela en condición seca de tres *Guadua* nativas de México.

Propiedad	Sección del culmo	<i>Guadua aculeata</i>			<i>Guadua amplexifolia</i>			<i>Guadua velutina</i>		
		μ	σ	cv (%)	μ	σ	cv (%)	μ	σ	cv (%)
Número de especímenes	Basal	5			17			3		
	Medio	4			18			7		
	Extremo	2			18			2		
Contenido de humedad promedio, %	Basal	24			24			16		
	Medio	23			22			17		
	Extremo	19			21			15		
Densidad relativa básica (PA/VV)	Basal	0,403	0,08	19	0,360	0,06	16	0,420	0,05	12
	Medio	0,483	0,163	34	0,419	0,05	11	0,473	0,06	12
	Extremo	0,605	--	--	0,475	0,063	13	0,488	--	--
Esfuerzo en el límite de proporcionalidad, f_{lp} , MPa	Basal	23,4	9,9	42	19,5	6,6	34	26,9	6,6	25
	Medio	24,1	18,1	75	23,0	6,1	16	25,5	5,4	21
	Extremo	46,14	--	--	29,5	7,5	25	37,1	--	--
Esfuerzo máximo en compresión paralela, $f_{c_{max}}$, MPa	Basal	42,33	10,2	24	25,1	5,8	23	29,3	7,8	27
	Medio	52,55	10,5	20	33,6	5,9	18	34,9	7,3	21
	Extremo	66,2	--	--	41,8	8,7	21	46,6	--	--
Módulo de elasticidad, E , GPa	Basal	15,1	8,4	56	9,4	2,3	24	12,3	1,6	13
	Medio	17,6	11,2	64	13,8	3,8	27	10,1	1,1	11
	Extremo	18,8	--	--	14,2	3,3	23	20,9	--	--

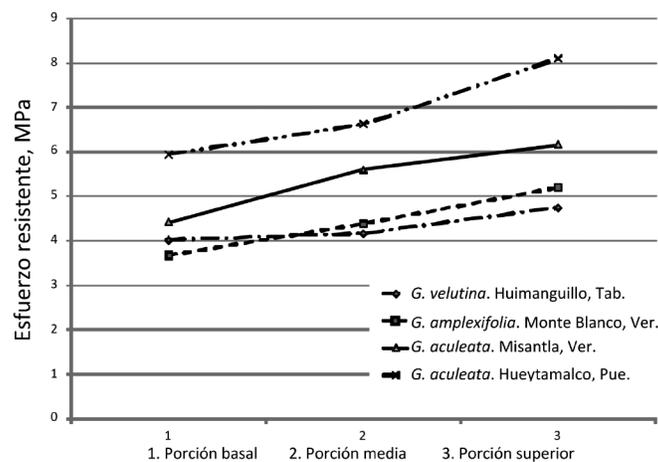


FIGURA 10. Comparación de la resistencia (f_v), promedio por sección de los culmos, en cortante paralelo a la fibra en verde para tres *Guadua* nativas de México.

TABLA 6. Resultados de cortante paralelo en condición verde de tres *Guaduas* nativas de México.

Propiedad	Sección del culmo	<i>Guadua aculeata</i>			<i>Guadua amplexifolia</i>			<i>Guadua velutina</i>		
		μ	σ	cv (%)	μ	σ	cv (%)	μ	σ	cv (%)
Número de especímenes	Basal	15			10			10		
	Medio	15			10			11		
	Extremo	10			10			10		
Contenido de humedad promedio, %	Basal	147			195			189		
	Medio	109			152			158		
	Extremo	85			129			136		
Densidad relativa básica (PA/VV)	Basal	0,447	0,09	20	0,386	0,059	15	0,388	0,071	18
	Medio	0,535	0,107	20	0,449	0,04	9	0,443	0,073	17
	Extremo	0,619	0,131	21	0,500	0,046	9	0,499	0,09	18
Esfuerzo máximo en cortante paralelo, $f_{V_{max}}$ MPa	Basal	4,4	1,8	40	3,7	0,9	25	4,0	1,2	30
	Medio	5,6	2,6	28	4,4	0,9	21	4,2	1,3	30
	Extremo	6,2	1,8	29	5,2	1,0	20	4,8	1,3	27

TABLA 7. Resultados de cortante paralelo en condición seca de tres *Guaduas* nativas de México.

Propiedad	Sección del culmo	<i>Guadua aculeata</i>			<i>Guadua amplexifolia</i>			<i>Guadua velutina</i>		
		μ	σ	cv (%)	μ	σ	cv (%)	μ	σ	cv (%)
Número de especímenes	Basal	4			15			3		
	Medio	4			16			5		
	Extremo	5			16			--		
Contenido de humedad promedio, %	Basal	34			22			18		
	Medio	19			21			17		
	Extremo	17			21			--		
Densidad relativa básica (PA/VV)	Basal	0,341	0,040	12	0,357	0,056	16	0,392	0,089	23
	Medio	0,539	0,117	22	0,425	0,058	14	0,505	0,153	30
	Extremo	0,698	0,107	15	0,500	0,093	19	--	--	--
Esfuerzo máximo en cortante paralelo, $f_{V_{max}}$ MPa	Basal	7,7	2,5	32	4,5	1,1	25	4,5	1,3	29
	Medio	10,3	2,3	22	5,7	1,1	20	6,8	2,9	42
	Extremo	11,6	5,0	43	7,2	2,0	28	--	--	--



DISCUSIÓN

Como se observa en las tablas 2 a 6, el número de especímenes por tipo de prueba y culmos ensayados en condición verde satisface lo establecido por Janssen (1999a y 1999b); lo que no fue posible alcanzar para los ensayos en condición seca, ya que durante el proceso de secado se colapsaron varios de los culmos, presentando características no deseables para ser ensayados. De aquellos que sí se obtuvieron especímenes para ensayo, los resultados obtenidos presentaron una alta dispersión. Algunos se descartaron al momento del ensayo sin incluirlos en el análisis; los que se presentan sólo son un índice del comportamiento del material ensayado, y no representan el comportamiento real del material proveniente de las guaduas estudiadas.

Los resultados de este trabajo muestran las tendencias que se mencionan en casi todas las investigaciones que se realizan con este material, en general la resistencia y la densidad de los culmos se incrementa de la base a la punta. Las proporciones de incremento varían de especie a especie (Mohmod *et al.*, 1993; Luna *et al.*, 2013, Correal y Arbeláez, 2010; Kamruzzama *et al.*, 2008; Lindholm y Palm, 2007).

Durante el periodo de realización de este estudio no se encontró información publicada sobre ensayos mecánicos o físicos para alguna de las tres especies estudiadas. En el nivel nacional Zaragoza (2012) realizó una serie de ensayos con *G. aculeata*, de la región de Hueytamalco, Puebla, obteniendo resultados similares en cuanto a su resistencia y densidad que los obtenidos para las guaduas motivo de este trabajo. Con fines comparativos, en las figuras 6 a 10, se muestran los resultados de los ensayos en condición verde para estas cuatro especies.

En el ensayo de flexión (Tabla 2, Fig. 6), en promedio, los valores de MOR en condición verde de las tres secciones de *G. velutina* y *G. amplexifolia* resultaron ligeramente mayores que los de *G. aculeata*, (70,4 MPa). El valor promedio de MOR de la muestra de *G. aculeata* resultó 17% más alto que el obtenido por Zaragoza (2012) (61,0 MPa) (Fig. 6), y también más alto que el encontrado para la misma especie, en Colombia (Sotela,

1990) y Ecuador (Luna *et al.*, 2013), aunque más bajo que los presentados por Correal y Arbeláez (2010) para la misma especie, todos en condición verde. Los resultados para módulo de elasticidad (MOE) (Tabla 2, Fig. 7), en promedio para condición verde, no mostraron una marcada diferencia entre las tres especies de este estudio y los publicados para *G. aculeata* del estado de Puebla (Zaragoza, 2012). No se encontraron datos para estas especies ensayadas en su forma tubular en condición seca.

Los resultados de las pruebas de compresión paralela a la fibra, en condición verde (Tabla 4, Fig. 8), muestran que los valores de resistencia máxima (F_c), en promedio para *G. aculeata* (34,9 MPa) son más altos que los que presentaron *G. velutina* (25,1 MPa) y *G. amplexifolia* (28,6 MPa); Contrastando los resultados, en condición verde, con los publicados para *G. angustifolia*, Luna *et al.* (2007) presentan valores menores a los que se registraron para las guaduas mexicanas (19,1 MPa a 23,3 MPa) con material recolectado en Ecuador; mientras que Correal y Arbeláez (2010) presentan valores semejantes a los de *G. aculeata* y ligeramente más altos para las otras dos especies estudiadas. La resistencia máxima en compresión (F_c) en verde de *G. aculeata* es semejante a la obtenida para la misma especie y condición de humedad por Zaragoza (2012). En seco, Takeuchi y González (2007), obtuvieron valores promedio de 56,2 MPa para *G. angustifolia* de diversas localidades de Colombia, semejante al obtenido, en promedio, con *G. aculeata* (50,4 MPa) de este trabajo (Tabla 4), y más alto que el que se calculó para las otras dos especies. Zaragoza (2012) a su vez obtuvo valores semejantes para *G. aculeata* de la región de Hueytamalco, Pue. Respecto al módulo de elasticidad en compresión (E), en promedio, el valor obtenido para *G. aculeata* es aproximadamente 30% más alto que los obtenidos para *G. velutina* y *G. amplexifolia*. (Tablas 4 y 5, Fig. 9) en ambas condiciones. Para *G. aculeata* de la región de Hueytamalco, Pue., Zaragoza (2012) presenta valores más altos en ambas condiciones de humedad, Correal y Arbeláez (2010) también presentan valores más altos a los obtenidos en este estudio para la misma especie, en condición

verde. A su vez, Takeuchi y González (2007) obtuvieron valores promedio, similares a los obtenidos en este trabajo para *G. aculeata*, y mayores, en promedio que los obtenidos aquí para *G. amplexifolia* y *G. velutina*.

En cortante paralelo a la fibra (Tablas 6 y 7, Fig. 10), en promedio, se observa que *G. aculeata* en condición verde tuvo una resistencia (5,31 MPa) casi 25% mayor, que la obtenida para *G. velutina* (4,03 MPa) y *G. amplexifolia* (4,40 MPa). En esta misma condición, Luna *et al.* (2013) obtuvieron, en promedio una resistencia menor para *G. angustifolia* (3,5 MPa a 4,3 MPa) que la obtenida aquí para *G. aculeata* y semejante a la de las otras dos especies incluidas en este trabajo. Correal y Arbeláez (2010), obtuvieron valores más altos (7,3 MPa a 7,9 MPa) para *G. angustifolia*, mientras que los valores determinados por Zaragoza (2012) para *G. aculeata* de Hueytamalco, Pue., en especímenes sin nudo y en ambas condiciones de humedad son similares, en promedio, a los presentados por *G. aculeata* y ligeramente mayores que los de las otras dos especies de este trabajo. Pantoja (2005) presenta valores de resistencia en cortante para *G. angustifolia* con especímenes sin nudo en condición seca, con material de diferentes localidades de Colombia: de Armenia 7,09 MPa, de Tierradentro 6,72 MPa y de Sylvania 7,33 MPa; en promedio ligeramente mayores que los encontrados para las guadas mexicanas. Sotela (1990) presenta valores de resistencia en cortante para especímenes de *Guadua angustifolia* con entrenudo y en condición seca (6,40 MPa) menores que los determinados aquí para *G. aculeata* (10,0 MPa) y semejantes a los obtenidos para *G. amplexifolia* y *G. velutina*.

En general el comportamiento de las tres especies fue semejante al encontrado para *G. angustifolia* y *G. chacoensis* por Luna *et al.* (2013); Correal y Arbeláez (2010) y Flores, 2008, quienes realizaron los ensayos en las mismas condiciones que las del presente estudio, es decir en culmos completos. Se hizo la comparación con los resultados de trabajos realizados principalmente con *G. angustifolia* por ser una especie con características parecidas a las de *G. aculeata*.

CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo representan una base para futuras investigaciones sistematizadas para generar mayor información sobre las características de los bambúes, especialmente para su uso en la construcción, sobre las que no existe información similar.

Con base en los resultados obtenidos se puede afirmar que las especies de guada que crecen en México, sobre todo *G. aculeata* tiene propiedades similares y en algunos casos superiores a los de *G. angustifolia*, que está identificada como una especie excelente para ser usada en construcciones, y que por no contar con información de las especies nativas, se está utilizando en las plantaciones que se han venido estableciendo en México.

Es necesario realizar más trabajos de investigación y transferencia de sistemas y prácticas de manejo de las plantaciones y cultivares de las guadas mexicanas que crecen de manera natural para poder obtener culmos más rectos que los que se encuentran actualmente, esto permitirá utilizarlo sin los problemas que presenta un tallo curvo.

Además de la caracterización tecnológica de los bambúes que crecen en México y que se están usando en construcciones por quienes están entusiasmados con este material es necesario ampliar la investigación a otros temas como uniones, comportamiento de elementos de tamaño real (pandeo de columnas), vigas compuestas, muros de carga sujetos a acciones laterales, armaduras, etcétera

Con más estudios como este, se incrementará la base estadística para obtener valores de diseño confiables para una propuesta de norma de diseño y construcción con bambú.

RECONOCIMIENTOS

Los fondos para este trabajo fueron del Proyecto Conafor-Conacyt 2002-C01-567 Caracterización tecnológica de las especies mexicanas de guada (*Poaceae bambusoideae*) y sus aplicaciones en la construcción. Los autores reconocen el apoyo de José Luis Martínez Castillo en la recolecta y preparación de material de ensayo, de Ignacio



Salomón Quintana en la recolecta, preparación de material y realización de los ensayos y de Paula Zárate Morales en la preparación de los ensayos. También agradecen a dos revisores anónimos por sus aportaciones para mejorar este manuscrito.

REFERENCIAS

- Ángeles A., G., C. Madero V. y F. Ortega-Escalona. 2005. Anatomía de especies mexicanas de bambú. 1er Congreso Mexicano del bambú. Xalapa de Enríquez, Ver. México. 8 a 10 de diciembre. p:102-103.
- Beetle, A.A., E. Manrique F., V. Jaramillo L., P. Guerrero S., A. Miranda S., I. Núñez T. y A. Chimal H. 1987. Las gramíneas de México. Tomo II. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, COTECOCA. México. 344 p.
- Cobos F., J.A. y X.A. León R. 2007. Propiedades físicas-mecánicas de la *Guadua angustifolia* Kunth y aplicación al diseño de baterías sanitarias del IASA II. Tesis Licenciatura. Carrera de Ingeniería Civil. Escuela Politécnica del Ejército. Ecuador. 134 p.
- Correal D., J.F. y J. Arbeláez C. 2010. Influence of age and height position on Colombian *Guadua angustifolia* bamboo mechanical properties. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 12(2):105-113.
- Cortés R., G.R. 2000. Los bambúes nativos de México. *Conabio. Biodiversitas* 30:12-15.
- Cortés R., G.R. 2005a. El bambú en Veracruz. Bambúes de México. Bio Bambú, Revista Electrónica www.bambumex.org. 1 p. Consultada 2013-02-20.
- Cortés R., G.R. 2005b. Viviendas de Bambú en México. Bambúes de México. Bio Bambú, Revista Electrónica www.bambumex.org. 1 p. Consultada 2013-02-20.
- Cruz R., H. 1994. La Guadua: Nuestro Bambú. Corporación Autónoma Regional del Quindío. Centro Nacional para el Estudio del Bambú Guadua. Colombia. 293 p.
- Flores R., J. 2008. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la tacuara (*Guadua chacoensis*), Santa Cruz-Bolivia. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Gabriel Rene Moreno. Facultad de Ciencias Agrícolas. Carrera de Ingeniería Forestal.
- Gómez S., E. 2002. Determinación de la resistencia del bambú en flexión. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería de la Universidad Veracruzana. Xalapa, Ver. 93 p.
- Gutiérrez C., L., J. Dorantes L. 2005a. Especies forestales de uso tradicional en Veracruz: el tarro amarillo *Guadua aculeata*. 1er Congreso Mexicano del bambú. Xalapa de Enríquez, Ver. México. 8 a 10 de diciembre. p:108-109.
- Gutiérrez C., L. y J. Dorantes L. 2005b. Especies forestales de uso tradicional en Veracruz: el oate *Guadua amplexifolia*. 1er Congreso Mexicano del bambú. Xalapa de Enríquez, Ver. México. 8 a 10 de diciembre. p:110-111.
- Hidalgo L., O. 1978. Nuevas técnicas de construcción con bambú. Estudios Técnicos Colombianos Ltda. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 137p.
- Hidalgo, O. 2003. Bamboo the gift of the gods. 1ª ed. Editorial D'VINNI Ltda. Colombia. 553 p.
- Janssen, J.A., J. 1999a. Laboratory manual on testing methods for determination of physical and mechanical properties of bamboo. International Network on Bamboo and Rattan, INBAR, 3rd Draft. 29 p.
- Janssen, J.A., J. 1999b. INBAR Standard for determination of physical and mechanical properties of bamboo International Network on Bamboo and Rattan, INBAR, 3rd Draft. 26 p.
- Janssen J.A., J. 2000. Design and building with bamboo. Technical report No. 20, INBAR. Technical University of Eindhoven. Eindhoven. Países Bajos. 211 p.
- Kamruzzama, M., S.K. Saha, A.K. Bose y M.N. Islam. 2008. Effects of age and height on physical and mechanical properties of bamboo. *Journal of Tropical Forest Science* 20(3):211-217.
- Li, X. 2004. Physical, chemical, and mechanical properties of bamboo and its utilization potential for fiberboard manufacturing. Tesis de maestría. Agricultural and Mechanical College. Luisiana State University. School of Renewable Natural Resources. 76 p.
- Lindholm, M., y S. Palm. 2007. *Guadua chacoensis* in Bolivia - an investigation of mechanical properties of a bamboo species. Tesis de Maestría. Department of Management and Engineering. Centre for Wood Technology & Design. University of Linköping. 145 p.

- Luna, P., J. Lozano, y C. Takeuchi. 2013. Determinación experimental de valores característicos de resistencia para *Guadua angustifolia*. *Maderas, Ciencia y Tecnología*. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2014005000007>. Consultado 2013-12-16.
- Mejía S., M.T. y G. Castillo C. 1987. El Bambú. Inireb Informa, Comunicado No. 81. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos. Xalapa, Ver. México. 4 p p.
- Mohmod, A.L., A.H. Amin, J. Kasim, y M.Z. Jusuh. 1993. Effects of anatomical characteristics on the physical and mechanical properties of *Bambusa blumeana*. *Journal of Tropical Forest Science* 6(2):159-170.
- Ordóñez C., V.R. 1999. Perspectivas del bambú para la construcción en México. *Madera y Bosques* 5(1):3-12.
- Ordóñez C., V.R. e I. Salomón Q. 2009. Consideraciones geométricas en la determinación de las propiedades en flexión estática de bambú. *Madera y Bosques* 15(1):91-100.
- Osorio, J.A., J.M. Vélez y H.J. Ciro. 2007. Estructura interna de la guadua y su incidencia en las propiedades mecánicas. *Dyna* 74(153):81-94.
- Pantoja T., N. H. y J. Acuña, D.F. 2005. Resistencia al corte paralelo a la fibra de la *Guadua angustifolia*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Bogotá D.C. 94 p.
- Pohl. R.W. y G. Davidse. 1994. Subtribus Guaduinae. In: G. Davidse, M. Sousa Sánchez y A.O. Chater, eds. *Alismataceae a Cyperaceae. Flora Mesoamericana* Vol. 6. UNAM, México, D.F. p:194-196.
- Rodríguez R., J.C. 2006. El bambú como material de construcción. *Conciencia Tecnológica* 031:67-69.
- Sotela M., J. 1990. Determinación de propiedades físicas y mecánicas del bambú de la especie *Guadua* de dos zonas de Costa Rica. Informe final para el proyecto Nacional de Bambú (Proyecto PNUD-COS 87/001 Aprovechamiento del bambú en la construcción de vivienda de interés social), mayo 1990. Gobierno de Holanda, MIVAH, PNUD, HABITAT, OIT, BCIE. Universidad de Costa Rica. Laboratorio de Productos Forestales, Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales. 65 p.
- Tamolang, F.N., F.R. López, J.A. Semana, R.F. Casin y Z.B. Espiloy. 1980. Properties and utilization of Philippine erect bamboo. *Forpride Digest* IX(3-4):14-27.
- Takeuchi T., P.C. y C.E. González. 2007. Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la *Guadua angustifolia* y determinación del módulo de elasticidad. *Ingeniería y Universidad* 11(001):89-103.
- Valero, S.W., E. Reyes y W. Contreras. 2005. Estudio de las propiedades físicas y mecánicas del bambú (*Bambusa vulgaris*), de tres años de edad y proveniente de las plantaciones ubicadas en la ribera de la margen derecha del río Chama, municipio Francisco Javier Pulgar, estado Zulia, Venezuela. *Revista Forestal Latinoamericana* 37:87-107.
- Villegas, M. 2003. Guadua, arquitectura y diseño. 1ª ed. Villegas asociados S.A. Colombia. 207 p.
- Zaragoza H., I. 2012. Anatomía y propiedades físico-mecánicas del culmo de bambú (*Guadua aculeata* Rupr.) de la región nororiental del estado de Puebla. Tesis de Maestría. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Chapingo. Texcoco. Edo, de México. 58 p.

Manuscrito recibido el 8 de agosto de 2013.

Aceptado el 2 de mayo de 2014.

Este documento se debe citar como:

Ordóñez-Candelaria, V.R. y G.M. Bárcenas Pazos. 2014. Propiedades físicas y mecánicas de tres especies de guadas mexicanas (*Guadua aculeata*, *Guadua amplexifolia* y *Guadua velutina*). *Madera y Bosques* 20(2):111-125.



Anexo 1

Descripción de términos

$$I = \text{momento de inercia de la sección, mm}^4 \quad I = \frac{[De_{prom}^4 - (De_{prom} - 2t)^4]}{64}$$

PA = peso anhidro, g

PI = peso inicial, g

VV = volumen verde, cm³

Ac = área en compresión, mm²

Av = área de cortante, mm² $Av = 4(eh)$

De_{prom} = diámetro exterior promedio, mm

P_{lp} = carga en el límite de proporcionalidad, N

P_{max} = carga máxima, N

c.v. = coeficiente de variación

h = longitud promedio del espécimen de cortante, mm

l = claro de carga, mm

l_c = longitud de medición de deformación en compresión, mm

e = espesor promedio de las paredes del espécimen, mm

δ = deformación en el límite de proporcionalidad medido al centro de la viga, mm

μ = promedio

σ = desviación estándar