



Características dinámicas de 22 maderas determinadas por el método de vibraciones transversales

Javier Ramón Sotomayor Castellanos¹

¹Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

Correo-e: madera999@yahoo.com

Resumen

La industria de la madera requiere información sobre las características tecnológicas del material para que se les incorpore a nuevos productos con valor agregado. El objetivo de la investigación que se describe fue determinar la densidad, el módulo dinámico, el módulo de rigidez y el coeficiente de amortiguamiento de 22 especies. De cada una se prepararon 20 probetas y se realizaron pruebas de vibraciones en condiciones de apoyo libre-libre. Se calcularon el módulo de dinámico, el módulo de rigidez y el coeficiente de amortiguamiento. Para cada variable se calculó la media, desviación estándar y coeficiente de variación. La especie se consideró el factor de variación. Se obtuvieron las regresiones lineales para un nivel de significancia de 95 % y los coeficientes de determinación de las variables en función de la densidad. Cada taxon presentó características dinámicas diferentes, lo que permitió observar el amplio intervalo de valores que se pueden presentar entre diferentes taxa. La densidad se distribuyó en un intervalo amplio con un mínimo de 391 kg m⁻³ (*Gyrocarpus americanus*) y un máximo de 1 096 kg m⁻³ (*Tabebuia chrysantha*). Y se mostró como un buen predictor tanto del módulo dinámico ($R^2 = 0.86$), como del módulo de rigidez ($R^2 = 0.79$). No se registró una correlación significativa del coeficiente de amortiguamiento con la densidad ($R^2 = 0.01$).

Palabras clave: Características tecnológicas, coeficiente de amortiguamiento, densidad de la madera, módulo de rigidez, módulo dinámico, probetas.

Fecha de recepción/Reception date: 9 de diciembre de 2017

Fecha de aceptación/Acceptance date: 20 de junio de 2018

Introducción

La industria de productos forestales requiere de información actualizada sobre las características tecnológicas de las maderas para que se les incorpore a nuevos productos con valor agregado. La ausencia de parámetros físicos y mecánicos de especies con potencial de usos industriales tiene como consecuencia que la madera no sea apreciada como un material estandarizado para integrarlo, racionalmente, a la fabricación de nuevos productos y en la edificación con madera. Una contribución a la solución de este problema es determinar, experimentalmente, sus características útiles para el cálculo y diseño ingenieril (Labonnote *et al.*, 2015).

El módulo dinámico y el módulo de rigidez son características que representan la capacidad de un material para almacenar energía elástica al ser deformado. Cuando un elemento estructural de madera está sometido a una deformación en flexión, ambos parámetros están relacionados con las deformaciones correspondientes a los esfuerzos combinados de flexión y de cortante. De aquí que el módulo dinámico y el de rigidez tengan aplicación en el cálculo probabilístico de estructuras (Köhler *et al.*, 2007) y en su modelado numérico (Sucharda *et al.*, 2015).

El coeficiente de amortiguamiento es una propiedad material que representa la fricción interna ocasionada por sollicitaciones dinámicas. Este parámetro se utiliza como referencia en la caracterización de especies con vocación para la elaboración de artículos, cuya función son el control de ruido, la disminución de vibraciones y la prevención de fatiga en elementos estructurales (Ouis, 2003).

Las vibraciones son un método de evaluación no destructivo para determinar las características mecánicas de la madera (Pellerin y Ross, 2002). Particularmente, las vibraciones transversales se usan para determinar el módulo dinámico (Hamdam *et al.*, 2009), el módulo de rigidez (Da Silva *et al.*, 2012) y el

coeficiente de amortiguamiento (Brémaud *et al.*, 2010). De la misma forma, esa técnica es eficaz para describir los productos compuestos de madera (Jae-Woo *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2012), determinar las propiedades elásticas empleadas en estructuras de madera (Piter *et al.*, 2004; Olsson *et al.*, 2012) y como método no destructivo para hacer predicciones de la resistencia de la madera estructural (Ross, 2015).

Son escasos los precedentes sobre la caracterización mecánica de las 22 maderas en estudio. Tamarit y López (2007) y Silva *et al.* (2010) describen algunas de las características tecnológicas de diversas especies forestales. La revisión de la bibliografía del país exhibe escasa información respecto a las propiedades dinámicas (Sotomayor, 2015). Por lo anterior, el objetivo de la presente investigación consistió en determinar la densidad, el módulo dinámico, el módulo de rigidez y el coeficiente de amortiguamiento de 22 especies de maderas mexicanas.

Materiales y Métodos

Se recolectaron en diversos aserraderos del territorio nacional piezas de madera aserrada provenientes de 22 especies de bosque nativo, con crecimiento natural, las cuales se tomaron de la primera troza del tronco comercial de diferentes árboles. Las especies fueron identificadas en el Laboratorio de Mecánica de la Madera de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (Cuadro 1).



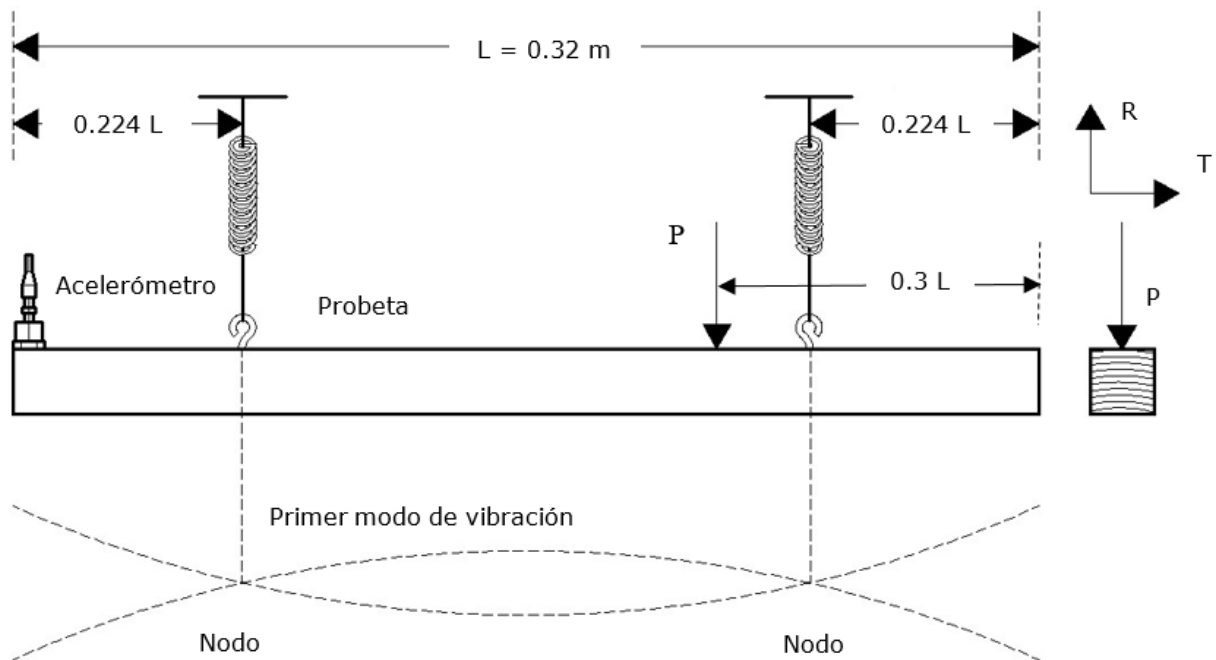
Cuadro 1. Características dinámicas de 22 maderas.

	Especie		ρ	E_{vt}	G_{vt}	ζ_{vt}
			(kg m^{-3})	(MN m^{-2})	(MN m^{-2})	-
1	<i>Gyrocarpus americanus</i> Jacq.	\bar{x}	391	6 276	548	0.023
		CV	3.5	18.7	34.6	43.5
2	<i>Tilia mexicana</i> Schltdl.	\bar{x}	442	10 133	491	0.018
		CV	12.6	10.6	37.4	50.0
3	<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb	\bar{x}	448	6 076	582	0.035
		CV	7.9	39.9	37.6	57.1
4	<i>Cupressus lindleyi</i> Klotzsch ex Endl.	\bar{x}	486	9 058	1 031	0.025
		CV	13.4	35.4	41.5	72.0
5	<i>Cedrela odorata</i> L.	\bar{x}	517	10 063	307	0.012
		CV	15.7	39.6	64.4	41.7
6	<i>Alnus acuminata</i> Kunth	\bar{x}	528	10 072	897	0.019
		CV	3.9	11.3	20.8	68.4
7	<i>Swietenia macrophylla</i> King	\bar{x}	531	10 340	624	0.015
		CV	6.5	25.5	60.4	66.7
8	<i>Fraxinus uhdei</i> (Wenz.) Lingelsh	\bar{x}	592	9 693	1 206	0.010
		CV	2.9	7.9	10.9	70.0
9	<i>Tabebuia donnell-smithii</i> Rose	\bar{x}	598	9 726	1 084	0.025
		CV	3.6	29.1	43.9	52.0
10	<i>Dalbergia paloescrito</i> Rzedowski & Guridi Gómez	\bar{x}	624	10 493	1 126	0.023
		CV	7.7	27.4	20.0	34.8
11	<i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) Bertero ex A.DC.	\bar{x}	635	10 425	1 032	0.042
		CV	5.4	15.1	15.5	57.1
12	<i>Fagus mexicana</i> Martínez	\bar{x}	642	12 428	747	0.019
		CV	7.5	36.0	44.4	73.7
13	<i>Andira inermis</i> (W.Wright) DC.	\bar{x}	716	10 071	1 084	0.013
		CV	4.0	12.5	38.2	76.9
14	<i>Psidium sartorianum</i> (O.Berg) Nied.	\bar{x}	789	11 261	1 067	0.025
		CV	3.6	28.4	61.4	52.0
15	<i>Juglans pyriformis</i> Liebm.	\bar{x}	810	14 441	1 369	0.018
		CV	3.3	27.1	54.4	50.0

16	<i>Caesalpinia platyloba</i> S.Watson	\bar{x}	825	15 093	1 511	0.023
		CV	2.6	17.1	24.7	60.9
17	<i>Albizia plurijuga</i> (Standl.) Britton & Rose	\bar{x}	844	15 796	1 792	0.023
		CV	6.7	7.3	16.0	43.5
18	<i>Quercus</i> spp.	\bar{x}	847	18 150	1 318	0.040
		CV	3.5	17.1	22.0	75.0
19	<i>Lysiloma acapulcensis</i> (Kunth) Benth.	\bar{x}	974	15 630	2 114	0.031
		CV	3.7	7.1	13.6	32.3
20	<i>Cordia elaeagnoides</i> A. DC in DC.	\bar{x}	992	18 588	1 449	0.017
		CV	8.2	23.0	46.4	58.8
21	<i>Acosmium panamense</i> (Benth.) Yakovlev	\bar{x}	1 005	18 644	1 622	0.013
		CV	6.2	14.6	50.3	76.9
22	<i>Tabebuia chrysantha</i> (Jacq.) & G.Nicholson	\bar{x}	1 096	18 623	2 320	0.029
		CV	2.2	9.6	12.2	34.5

ρ = Densidad; E_{vt} = Módulo dinámico; G_{vt} = Módulo de rigidez; ζ_{vt} = Coeficiente de amortiguamiento; \bar{x} = Media; CV = Coeficiente de variación en por ciento.

A partir de cinco piezas de madera de cada especie, se prepararon 20 probetas con dimensiones de 0.05 m × 0.05 m en su sección transversal y con longitudes entre 0.4 m y 0.5 m, con madera de albura, libres de nudos y desviaciones de la fibra. Las probetas estuvieron orientadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso (Figura 1). La madera se estabilizó durante 24 meses en una cámara de acondicionamiento *FITECMA* 2006 a 20 °C (± 1 °C) y una humedad relativa de 60 % (± 2 %), hasta que alcanzó un peso constante. El contenido de humedad de la madera se determinó por el método de diferencia de pesos con grupos complementarios de probetas normalizadas, con dimensiones de 0.02 m × 0.02 m × 0.06 m (ISO, 2014a). A partir de ellos, la densidad de la madera se calculó con la relación peso/volumen al momento del ensayo (ISO, 2014b). Para estimar el peso se empleó una balanza electrónica *Ohaus Scout Pro SP2001*, con capacidad de 200 g, y con una precisión de 0.01 g; mientras que, para el volumen se utilizó un calibrador *Truper*® CALDU-6mp, con capacidad de 150 mm y una precisión de 0.01 mm.



Fuente: Sotomayor-Castellanos *et al.* (2015).

P = Impacto; L = Dirección longitudinal y/o largo de la probeta; R = Dirección radial; T = Dirección tangencial.

Figura 1. Configuración de las pruebas de vibraciones

Las pruebas de vibraciones se realizaron siguiendo el protocolo de Sotomayor-Castellanos *et al.* (2015); para ello, se puso en movimiento la probeta en condición libre-libre y se midieron las dos frecuencias naturales, las cuales corresponden al primer y segundo modo de vibración. Asimismo, se capturaron sus señales de decremento temporal. Para la condición libre-libre se sujetó la probeta a dos elásticos con una rigidez insignificante, colocados en los nodos del primer modo de vibración de la probeta (Figura 1).

Las vibraciones se lograron por medio de un impacto elástico (P) en dirección transversal a la dirección longitudinal (L) de la probeta, mediante un martillo *PCB Piezotronics*[®], modelo 086B05 SN 4160. el desplazamiento de la probeta en la dirección transversal, se midió colocando un acelerómetro marca *PCB*

Piezotronics[®], modelo 353B04 (Peso = 10.5 g) en un extremo de cada pieza de madera, pegado con una cera adhesiva (*Petro Wax 080A109, PCB Piezotronics*[®]).

Una vez que la probeta estuvo en vibración, se midieron las dos primeras frecuencias naturales, a partir del diagrama del dominio de frecuencias obtenido con un algoritmo de la transformada rápida de *Fourier*. Al mismo tiempo, se calculó el decremento logarítmico, con base en la señal del amortiguamiento de las vibraciones. Las frecuencias naturales y el decremento logarítmico fueron estimados por un analizador de señales dinámicas *Brüel and Kjær*[®], modelo 986A0186, provisto con un programa de adquisición y tratamiento de datos *Brüel and Kjær*[®], modelo DSA-104. La intensidad del impacto y la amplitud de las vibraciones se regularon con el sistema de adquisición y tratamiento de datos.

El ensayo dinámico en cada probeta se repitió tres veces y el promedio de los valores medidos fue considerado para su análisis posterior. Durante la prueba, se calculó el momento de inercia de la sección transversal de la probeta correspondiente al ensayo con la fórmula:

$$I = \frac{b h^3}{12} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

I = Momento de inercia de la sección transversal (m⁴)

b = Base de la probeta (m)

h = Altura de la probeta

Todos los parámetros calculados son rubricados con el subíndice "vt" para identificarlos como derivados de pruebas de vibraciones trasversales.

El modelo utilizado para determinar los módulos de elasticidad y de rigidez fue la ecuación de movimiento de una viga en vibraciones transversales (1) propuesta por *Weaver et al.* (1990):

$$E I \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \left(m r^2 + \frac{E I m}{K' A G} \frac{\partial^4 y}{\partial x^2 \partial t^2} \right) + \frac{m^2 r^2}{K' A G} \frac{\partial^4 y}{\partial t^4} = 0 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

E = Módulo dinámico (N m⁻²)

G = Módulo de rigidez (N m⁻²)

I = Momento de inercia de la sección transversal (m⁴)

m = Masa por unidad de longitud (kg m⁻¹)

r = Radio de giro de la sección transversal (m²)

A = Área de la sección transversal (m²)

K' = Factor de forma en cortante

Para resolver la ecuación (1), se usó la solución numérica desarrollada para su aplicación en probetas de madera por Brancheriau y Baillères (2002).

El coeficiente de amortiguamiento se obtuvo en función de la señal del amortiguamiento de las vibraciones con la ecuación (2) (Labonnote *et al.*, 2013):

$$\zeta_{vt} = \frac{\delta}{2} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

ζ_{vt} = Coeficiente de amortiguamiento

δ = Decremento logarítmico

$$\text{Con: } \delta = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

A_n = Amplitud de la vibración en el ciclo n (m)

A_{n+1} = Amplitud en de la vibración en el ciclo $n+1$ (m)

Diseño experimental. Con la finalidad de verificar la normalidad de las distribuciones de las variables de respuesta densidad, módulo dinámico, módulo de rigidez y coeficiente de amortiguamiento, se estimaron el apuntamiento y sesgo de las muestras correspondientes. Después de verificar la normalidad de los datos, se diseñó un experimento bajo las recomendaciones de Gutiérrez y De la Vara (2012).

Para cada variable se calculó su media, desviación estándar y coeficiente de variación en porcentaje. Se consideró a la especie como el factor de variación. Se obtuvieron las regresiones y sus coeficientes de determinación para un nivel de significación de 95 %, de los módulos de elasticidad, de rigidez y de los coeficientes de amortiguamiento, en función de la densidad. Se compararon los resultados con los registrados en la literatura.

Resultados y Discusión

En el Cuadro 1 se muestra la densidad y las características dinámicas de las 22 maderas. Las especies están ordenadas por orden ascendente respecto a su densidad. El contenido de humedad de la madera fue en promedio 11.5 % con un coeficiente de variación de 1 %, y se consideró que fue uniforme en todas las muestras de madera, además que no intervino de manera significativa en los resultados. Los valores de las magnitudes de la primera y segunda frecuencia corresponden a los intervalos de 756 Hz a 1 264 Hz, con un coeficiente de variación de 16 %; y de 1 877 Hz a 2 858 Hz, con un coeficiente de variación de 20 %, respectivamente. Los valores particulares a cada probeta fueron utilizados en la solución de la Ecuación (1).

Para las 22 maderas, los valores de sesgo y apuntamiento comprendidos al interior del intervalo -2, +2, verificaron que los datos de la densidad y de los módulos dinámicos y de rigidez provinieron de distribuciones normales. Caso particular fue el sesgo del coeficiente de amortiguamiento que mostró un valor de 2.46; es decir, se situó fuera del intervalo esperado para datos provenientes de una distribución normal. Igualmente, para el coeficiente de amortiguamiento,

el apuntamiento fue de -0.1863 que corresponde al intervalo esperado para datos provenientes de una distribución normal.

Densidad

Las propiedades dinámicas de la madera dependen, entre otros factores, de su porosidad y del arreglo de sus elementos anatómicos que sirven como estructuras de resistencia mecánica (Spycher *et al.*, 2008; Salmén y Burgert, 2009; McLean *et al.*, 2012). En el mismo contexto, su composición química básica y las sustancias extraíbles de ella influyen en la variabilidad de las propiedades dinámicas intra e interespecífica, así como en la posición y tipo de madera en un árbol (Thibaut *et al.*, 2001; Carlquist, 2012; Se Golpayegani *et al.*, 2012; Brémaud *et al.*, 2013). Sin embargo, es la densidad de la madera el parámetro físico que se considera más útil como predictor de las características mecánicas (Niklas y Spatz, 2010).

La magnitud de la densidad de la madera se distribuyó entre un mínimo de 391 kg m^{-3} (*Gyrocarpus americanus* Jacq.) y un máximo de $1\ 096 \text{ kg m}^{-3}$ [*Tabebuia chrysantha* (Jacq.) & G.Nicholson], lo que permitió examinar un amplio intervalo de dicha variable. Con excepción de la madera de *Cedrela odorata* L., el coeficiente de variación de la densidad de cada especie se situó por debajo de 10 %, valor similar al registrado por el Laboratorio de Productos Forestales de los Estados Unidos de América (Forest Products Laboratory, 2010). Este resultado confirma la variabilidad de la densidad propia de cada taxon. La densidad actuó como un buen predictor del módulo dinámico (Figura 2) y del módulo de rigidez (Figura 3). En cambio, no se registró una correlación significativa del coeficiente de amortiguamiento con la densidad (Figura 4).

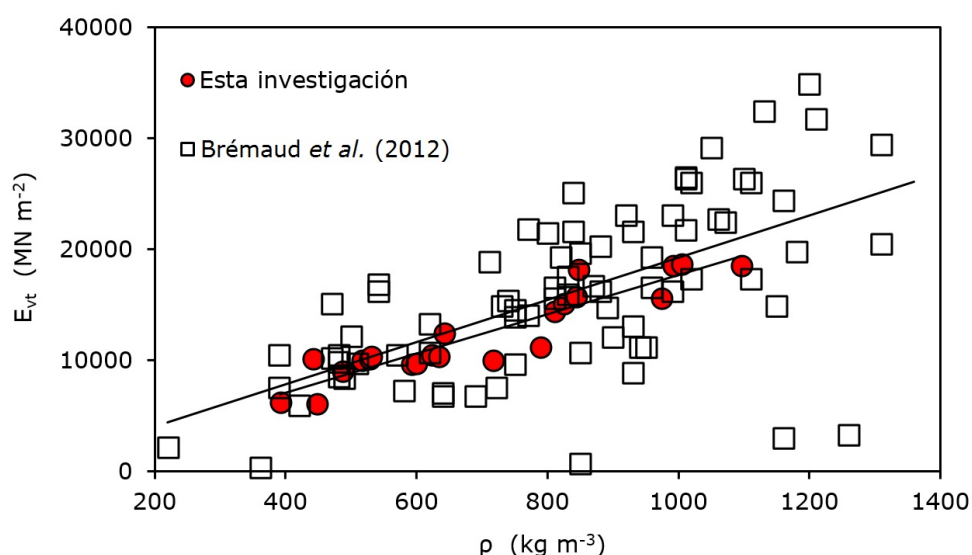


Figura 2. Módulo dinámico en función de la densidad.

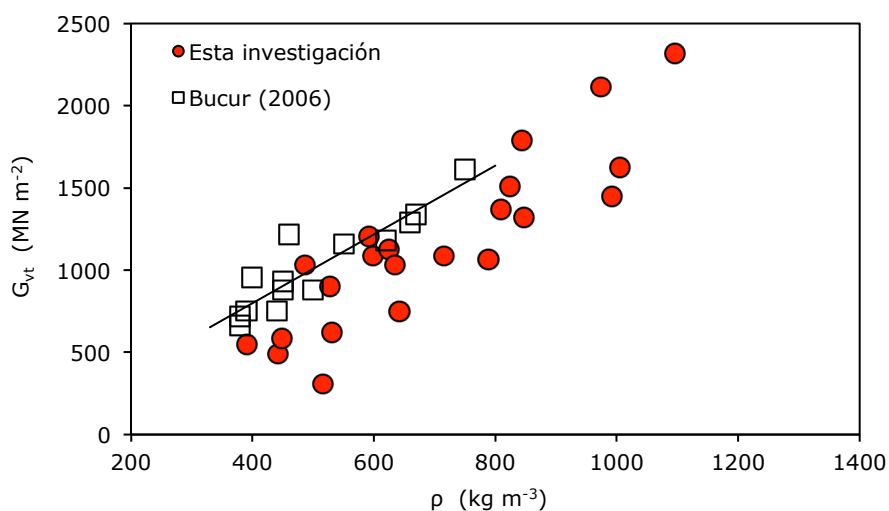


Figura 3. Módulo de rigidez en función de la densidad.

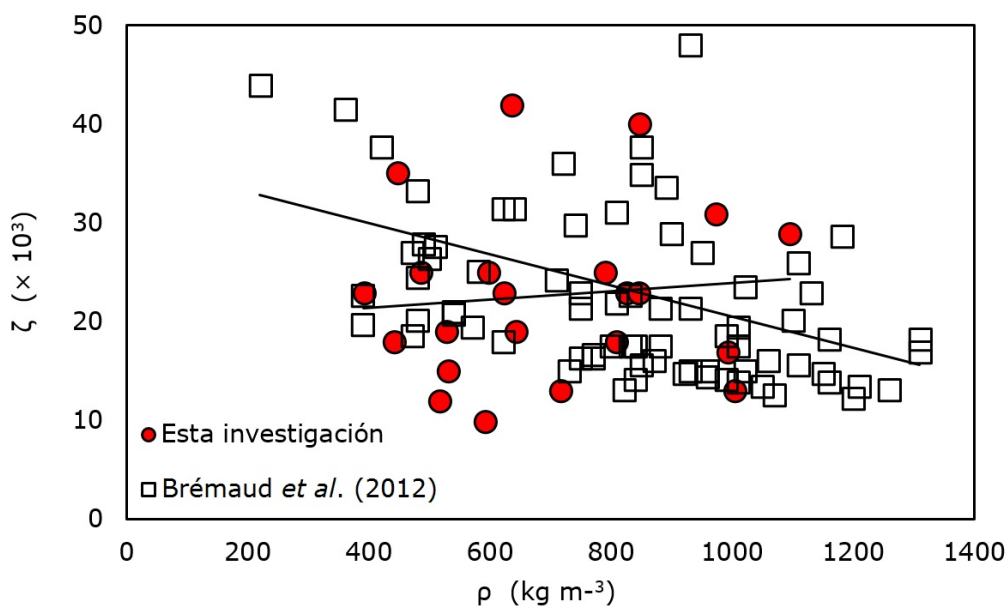


Figura 4. Coeficiente de amortiguamiento en función de la densidad.

Módulo dinámico

La magnitud del módulo dinámico se ubicó entre un valor mínimo de 6 076 MN m^{-2} [*Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb] y un máximo de 18 644 MN m^{-2}

[*Acosmium panamense* (Benth.) Yakovlev] (Cuadro 1). La dispersión del módulo dinámico en función de la densidad de las 22 maderas de esta investigación (Figura 2, Cuadro 2) se contrasta con datos del módulo dinámico determinado por vibraciones transversales de Brémaud *et al.* (2012).

Cuadro 2. Regresiones y coeficientes de determinación.

Esta investigación	R ²	Brémaud <i>et al.</i> (2012)	R ²
$E_{vt} = 17.608 \rho + 50.7$	0.86	$E_{vt} = 23.238 \rho - 2410.6$	0.60
Esta investigación		Bucur (2006)	
$G_{vt} = 2.235 \rho - 406.5$	0.79	$G_{vt} = 2.092 \rho - 37.6$	0.83
Esta investigación		Brémaud <i>et al.</i> (2012)	
$\zeta_{vt} = 0.004 \rho + 19.7$	0.01	$\zeta_{vt} = -0.016 \rho + 36.4$	0.16

ρ = Densidad; E_{vt} = Módulo dinámico; G_{vt} = Módulo de rigidez; ζ_{vt} = Coeficiente de amortiguamiento; R² = Coeficiente de determinación.

Los resultados describen la diversidad de las características mecánicas de las maderas estudiadas y coinciden con las deducciones de Bao *et al.* (2001) y Baillères *et al.* (2005). La variabilidad de las propiedades tecnológicas de la madera, se originan, principalmente, por la diversidad del medio ambiente donde crecen los árboles y por las propiedades morfológicas de las especies.

El coeficiente de determinación de la regresión del módulo dinámico que corresponde a las 22 maderas estudiadas (Figura 2, Cuadro 2) es mayor al de las maderas de Brémaud (2012). La magnitud de dicho estadístico indica que la densidad es un buen predictor de la resistencia elástica de la madera y coincide con las conclusiones de Niklas y Spatz (2010).

El coeficiente de variación del módulo dinámico fluctuó entre 7.1 % [*Lysiloma acapulcensis* (Kunth) Benth.] y 39.9 % (*E. cyclocarpum*). Esta variabilidad al interior de las especies es de la misma magnitud a la consignada por varios investigadores: Cho (2007) registra para cinco especies un coeficiente de variación de 17.3 % a 25.2 %, especies con densidades de 419 kg m⁻³ a 612 kg

m^{-3} ; Hamdam *et al.* (2009) citan para seis especies tropicales coeficientes de variación para el módulo dinámico de maderas tropicales de 9.1 % a 30 % ($240 \text{ kg m}^{-3} < \rho < 440 \text{ kg m}^{-3}$). Brémaud *et al.* (2012) determinaron para 98 taxones un intervalo de densidades entre 210 kg m^{-3} y $1\,380 \text{ kg m}^{-3}$, coeficientes de variación que alcanzan 33 %; Da Silva *et al.* (2012) publican un coeficiente de variación de 19.6 % para madera de *Copaifera langsdorffii* Desf. ($\rho = 844 \text{ kg m}^{-3}$). La variación puede explicarse porque se procuró seleccionar probetas sin defectos de crecimiento, como nudos y desviación de la fibra. Sin embargo, en las maderas estudiadas y clasificadas como tropicales de climas templado y húmedo es difícil encontrar piezas con estas características (Tamarit y López, 2007; Silva *et al.*, 2010). Por otro lado, los establecimientos en donde se adquirieron los trozos de madera con los que se prepararon las probetas reúnen material de diferentes procedencias geográficas, lo que probablemente introdujo una variabilidad por la calidad de la estación donde crecieron los árboles, atributo que se suma a la variación natural del sitio, y que a su vez influye en la variabilidad interespecífica (Forest Products Laboratory, 2010).

Módulo de rigidez

El módulo de rigidez de la madera varió de 307 MN m^{-2} (*C. odorata*), a un valor máximo de $2\,320 \text{ MN m}^{-2}$ (*Tabebuia chrysantha*) (Cuadro 1). Comparativamente, Yoshihara y Kubojima (2002) registraron un módulo de rigidez de $1\,250 \text{ KN m}^{-2}$ para madera de *Pinus densiflora* Siebold. & Zucc. ($\rho = 660 \text{ kg m}^{-3}$) y para *Fraxinus spaethiana* Lingelsh. $G_{vt} = 910 \text{ MN m}^{-2}$ ($\rho = 580 \text{ kg m}^{-3}$); Cho (2007) refiere módulos de rigidez desde 650 MN m^{-2} hasta $1\,070 \text{ MN m}^{-2}$ para cinco especies de madera ($419 \text{ kg m}^{-3} < \rho < 612 \text{ kg m}^{-3}$); Hassan *et al.* (2013) documentan un G_{vt} de 570 MN m^{-2} para madera de *Pinus sylvestris* L. con una densidad de 453 kg m^{-3} ; para el mismo taxon, Roohnia y Kohantorabi (2015) calcularon módulos de rigidez que varían de 594 KN m^{-2} a 941 KN m^{-2} ($342 \text{ kg m}^{-3} < \rho < 420 \text{ kg m}^{-3}$).

La magnitud del módulo de rigidez de las 22 maderas estudiadas es similar a la descrita por Bucur (2006), que exhibe un coeficiente de determinación mayor en

comparación con el de esta investigación (Figura 5). La densidad de la madera es un predictor del módulo de rigidez (Cuadro 2). Su coeficiente de determinación sugiere que es posible estimar con cierta certeza el módulo de rigidez, lo que facilita la obtención de valores numéricos de este parámetro, que es complicado de determinar experimentalmente.

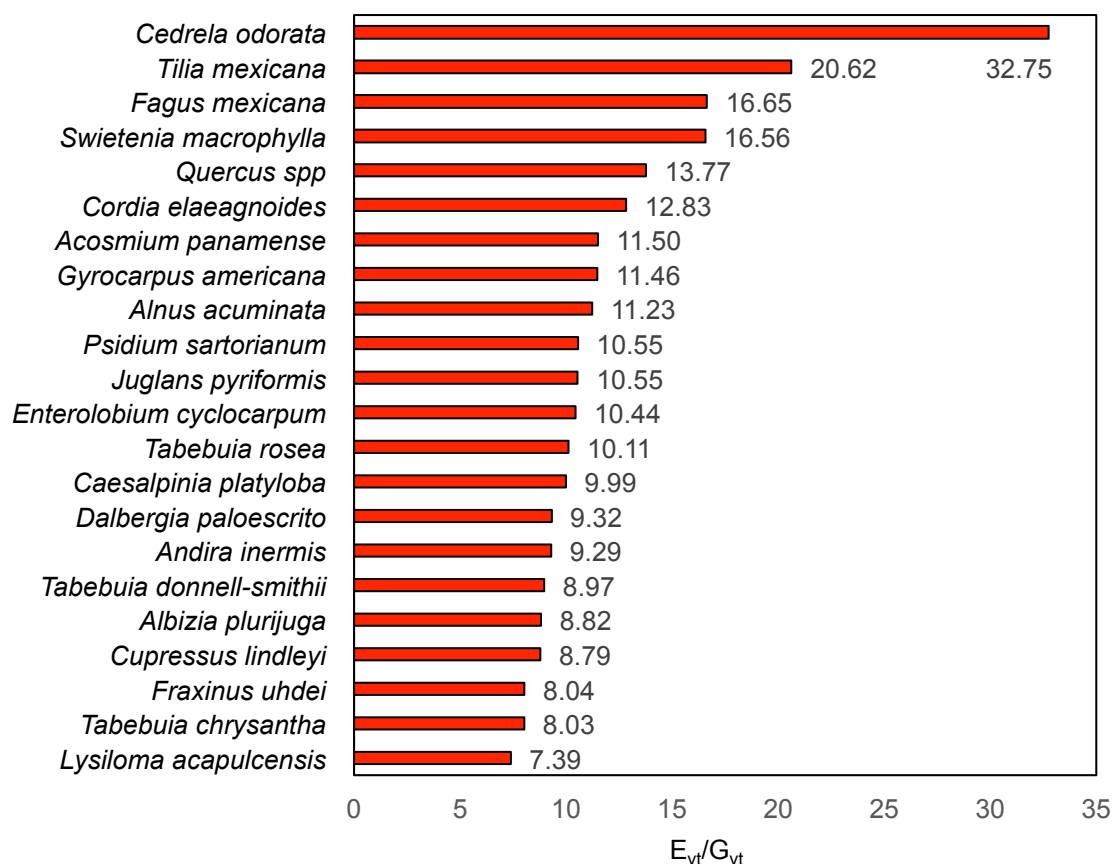


Figura 5. Razón entre el módulo de elasticidad y el módulo de rigidez (E_{vt}/G_{vt}).

El menor coeficiente de variación para el módulo de rigidez se presentó en *F. uhdei*, con 10.9 %; y el máximo en *C. odorata*, con 64.4 % (Cuadro 1). Asimismo, Cho (2007) consigna valores de 13.6 y 24.6 % para cinco especies; mientras que Da Silva *et al.* (2012) de 43.3 % para madera de *Copaifera langsdorffii* Desf. ($\rho = 844 \text{ kg m}^{-3}$). Hassan *et al.* (2013) registran un coeficiente de variación de 21.3 % para *Pinus sylvestris* ($\rho = 453 \text{ kg m}^{-3}$). Roohnia y Kohantorabi (2015) obtuvieron variación en los módulos de rigidez

ocasionada por las diferencias en la modalidad del ensayo empleado en su determinación; así como por la variabilidad interespecífica.

Coeficiente de amortiguamiento

El coeficiente de amortiguamiento varió entre un mínimo de 0.010 (*F. uhdei*) y un máximo de 0.042 [*Tabebuia rosea* (Bertol.) Bertero ex A.DC.] (Cuadro 1), valores muy similares a los registrados por Brémaud *et al.* (2012) (Figura 4).

Los coeficientes de variación del coeficiente de amortiguamiento se situaron entre 32.3 % y 76.9 % y son mayores que los consignados en la literatura. Los coeficientes de variación de Sedik *et al.* (2010) van de 9.5 % a 29.4 % ($210 \text{ kg m}^{-3} < \rho < 350 \text{ kg m}^{-3}$). Valores del coeficiente de variación entre 16 % y 44 % corresponden a Da Silva *et al.* (2012) para madera de *Copaifera langsdorffii* ($\rho = 844 \text{ kg m}^{-3}$). Brémaud *et al.* (2011) y Brémaud *et al.* (2012) indican coeficientes de variación hasta de 41 % ($210 \text{ kg m}^{-3} < \rho < 1\,380 \text{ kg m}^{-3}$).

La Figura 4 representa las dispersiones del coeficiente de amortiguamiento en función de la densidad de 22 maderas de esta investigación y se contrastan con los datos de Brémaud *et al.* (2012). La regresión lineal entre ζ_{vt} y ρ es muy débil (Cuadro 2) y los resultados se mezclan con los de dicho autor; este número es similar al de Brémaud *et al.* (2011) y Brancheriau *et al.* (2010). Del análisis de los resultados de la presente investigación y con base en los autores citados, se deduce que, para las maderas estudiadas el coeficiente de amortiguamiento en vibraciones transversales es independiente de la densidad.

Variabilidad de las características

La variación determinada en los valores de las características dinámicas de las 22 taxa es similar a la de las maderas en general (Tamarit y López, 2007; Silva *et al.*, 2010; Sotomayor, 2015). Resultado que puede ser explicado desde varias perspectivas.

La primera de ellas, por la amplia heterogeneidad material en diferentes escalas de observación (Hofstetter *et al.*, 2005) y por la diversidad en los tipos y acomodo de su estructura anatómica (Guitard y Gachet, 2004). Además, la madera es un material anisotrópico; es decir, la magnitud de sus características difiere según la dirección de observación (Brémaud *et al.*, 2011).

En efecto, en la madera de las angiospermas, es común observar hilo entrecruzado, fibra ondulada y en espiral, lo que, posiblemente, aumentó la variabilidad de los resultados (Harris, 1989). La porosidad propia de cada especie, así como los diferentes porcentajes de rayos en el plano leñoso de cada una de las maderas estudiadas, es probable que influyera en las magnitudes de las características dinámicas determinadas (Obataya *et al.*, 2000; Brancheriau *et al.*, 2006).

Una segunda explicación de la variación se refiere a que los parámetros que describen el comportamiento dinámico de la madera están relacionados con la configuración de las pruebas realizadas, particularmente, con las frecuencias de excitación (Chui y Smith, 1990). Los intervalos de los resultados de esta investigación para la primera y segunda frecuencia de resonancia: 756 Hz a 1 234 Hz y 1 877 Hz a 2 858 Hz, respectivamente son similares a los registrados por Brancheriau *et al.* (2010) para las pruebas de flexión dinámica con probetas de dimensiones parecidas a las aquí realizadas, cada ensayo representa un sistema de movimiento particular y, en consecuencia, las mediciones varían.

Estas particularidades en la estructura material de la madera y en su comportamiento mecánico se reflejan en una importante diferencia entre su módulo de elasticidad y su módulo de rigidez. En la Figura 5 se ilustra la razón entre los módulos de elasticidad y rigidez E_{vt}/G_{vt} para las 22 maderas, la cual varía entre 7.39 (*L. acapulcensis*) y 32.75 (*C. odorata*). Relaciones que son similares a las señaladas por Brémaud *et al.* (2011) ($5.3 < E_{vt}/G_{vt} < 26.5$) y Cha (2015) ($9.6 < E_{vt}/G_{vt} < 21.3$), con excepción de *C. odorata* que presenta un valor extremo y excepcional. Esta perspectiva permite posicionar relativamente a cada especie, con respecto al conjunto de maderas estudiadas. La razón E_{vt}/G_{vt} distingue la forma del modo de vibración de una pieza de madera y la magnitud

de su frecuencia Brémaud *et al.* (2011). A mayor razón Evt/Gvt menor será su frecuencia.

A manera de prospectiva, las características dinámicas de las 22 maderas estudiadas pueden ser útiles para su valoración en usos estructurales, particularmente, si se emplean como métodos no destructivos para estimar su la resistencia. Esta clasificación debe ser establecida a partir de parámetros medibles en la madera e independientes de la especie, como son las características dinámicas aquí determinadas (Ravenshorst *et al.*, 2013).

Conclusiones

Por medio de pruebas de vibraciones, se determinaron la densidad, el módulo dinámico, el módulo de rigidez y el coeficiente de amortiguamiento de 22 especies leñosas. Cada taxon presenta magnitudes diferentes de sus características dinámicas. Sus coeficientes de variación son diversos y se ubican dentro de la escala para maderas tropicales citados en la bibliografía. El conocimiento de las características dinámicas permite diferenciar cada especie para un posible uso particular. Si se comparan con los resultados publicados, probablemente, las maderas se valorizan para su empleo en funciones en las que la resistencia mecánica es importante. Los modelos de regresión para el módulo dinámico y de rigidez en función de la densidad explican favorablemente la variabilidad de la muestra estudiada. De manera que la densidad es un buen predictor del módulo dinámico y del módulo de rigidez. En contraste, no se obtuvo una correlación significativa del coeficiente de amortiguamiento con la densidad.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

El autor único es responsable de la investigación que sustenta la presente contribución y del manuscrito en su cabalidad.

Referencias

- Baillères, H., O. Vitrac and T. Ramananantoandro. 2005. Assessment of continuous distribution of wood properties from a low number of samples: application to the variability of modulus of elasticity between trees and within a tree. *Holzforschung* 59(5):524-530.
- Bao, F. C., Z. H. Jiang, X. M. Jiang, X. X. Lu, X.Q. Luo and S. Y. Zhang. 2001. Differences in wood properties between juvenile wood and mature wood in 10 species grown in China. *Wood Science and Technology* 35(4):363-375.
- Brancheriau, L. and H. Baillères. 2002. Natural vibration analysis of clear wooden beams: a theoretical review. *Wood Science and Technology* 36(4):347-365.
- Brancheriau, L., H. Baillères, P. Détienne, J. Gril and R. Kronland. 2006. Key signal and wood anatomy parameters related to the acoustic quality of wood for xylophone-type percussion instruments. *Journal of Wood Science* 52(3):270-273.
- Brancheriau L., C. Kouchade and I. Brémaud. 2010. Internal friction measurement of tropical species by various acoustic methods. *Journal of Wood Science* 56(5):371-379.
- Brémaud, I., K. Minato, P. Langbour and B. Thibaut. 2010. Physico-chemical indicators of inter-specific variability in vibration damping of wood. *Annals of Forest Science* 67(7):707-714.
- Brémaud, I., J. Gril and B. Thibaut. 2011. Anisotropy of wood vibrational properties: dependence on grain angle and review of literature data. *Wood Science and Technology* 45(4):735-754.
- Brémaud, I. 2012. Acoustical properties of wood in string instruments soundboards and tuned idiophones: Biological and cultural diversity. *Journal of the Acoustical Society of America* 131(1):807-818.

- Brémaud, I., Y. El Kaïm, D. Guibal, K. Minato, T. Thibaut and J. Gril. 2012. Characterization and categorization of the diversity in viscoelastic vibrational properties between 98 wood types. *Annals of Forest Science* 69(3): 373-386.
- Brémaud, I., J. Ruelle, A. Thibaut and B. Thibaut. 2013. Changes in viscoelastic vibrational properties between compression and normal wood: roles of microfibril angle and of lignin. *Holzforschung* 67(1):75-85.
- Bucur, V. 2006. *Acoustics of Wood*. 2nd edition. Springer. Heidelberg, Germany. 394 p.
- Carlquist, S. 2012. How wood evolves a new synthesis. *Botany* 90(10):901-940.
- Cha, J. K. 2015. Determination of true modulus of elasticity and modulus of rigidity for domestic woods with different slenderness ratios using nondestructive tests. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 43(1):36-42.
- Cho, C. L. 2007. Comparison of Three Methods for Determining Young's Modulus of Wood. *Taiwan Journal of Forest Science* 22(3):297-306.
- Chui, Y. H. and I. Smith. 1990. Influence of rotatory inertia, shear deformation and support condition on natural frequencies of wooden beams. *Wood Science and Technology* 24(3):233-245.
- Da Silva L., E. R., P. R. Gherardi H., T. Moreira D. and G. F. Rabelo. 2012. Estimation of the dynamic elastic properties of wood from *Copaifera langsdorffii* Desf using resonance analysis. *CERNE* 18(1):41-47.
- Forest Products Laboratory .2010. *Wood handbook. Wood as an Engineering Material*. Forest Products Laboratory. Madison, WI, USA. 508 p.
- Guitard, D. and C. Gachet. 2004. Paramètres structuraux et/ou ultrastructuraux facteurs de la variabilité intra-arbre de l'anisotropie élastique du bois. *Annals of Forest Science* 61(2):129-139.
- Gutiérrez P., H. y R. De la Vara S. 2012. *Análisis y diseño de experimentos*. Mc Graw Hill. México, D.F., México. 590 p.
- Hamdam, S., Y. Sedik, I. Jusoh, M. Hasan and Z. A. Talib. 2009. Dynamic Young's modulus and glass transition temperature of selected tropical wood species. *Materials Science and Technology* 25(6):805-808.
- Harris, J. M. 1989. *Spiral grain and wave phenomena in wood formation*. Springer. Berlin, Germany. 215 p.

Hassan, K. T. S., P. Horáček and J. Tippner. 2013. Dynamic tests of wood. *BioResources* 8(2):1634-1645.

Hofstetter, K., C. Hellmich and J. Eberhardsteiner. 2005. Development and experimental validation of a continuum micromechanics model for the elasticity of wood. *European Journal of Mechanics A/Solids* 24(6):1030-1053.

International Organization for Standardization (ISO). 2014a. ISO 13061-1:2014 Wood. Determination of moisture content for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland. 4 p.

International Organization for Standardization (ISO). 2014b. ISO 13061-2:2014 Wood. Determination of density for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland. 5 p.

Jae-Woo, K., D. P. Harper and A. M. Taylor. 2009. Effect of wood species on the mechanical and thermal properties of wood-plastic composites. *Journal of Applied Polymer Science* 112(3):1378-1385.

Köhler, J., J. D. Sørensen and M. H. Faber. 2007. Probabilistic modeling of timber structures. *Structural Safety* 29(4):255-267.

Labonnote, N., A. Rønquist and K. A. Malo. 2013. Experimental evaluations of material damping in timber beams of structural dimensions. *Wood Science and Technology* 47(5):1033-1050.

Labonnote, N., A. Rønquist and K. A. Malo. 2015. Prediction of material damping in timber floors, and subsequent evaluation of structural damping. *Materials and Structures* 48(6):1965-1975.

McLean, J. P., O. Arnould, J. Beauchêne and B. Clair. 2012. The effect of the G-layer on the viscoelastic properties of tropical hardwoods. *Annals of Forest Science* 69(3):399-408.

Niklas, K. J. and H. C. Spatz. 2010. Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density. *American Journal of Botany* 97(10):1587-1594.

Obataya, E., T. Ono and M. Norimoto. 2000. Vibrational properties of wood along the grain. *Journal of Materials Science* 35(12):2993-3001.

Olsson, A., J. Oscarsson, M. Johansson and B. Källsner. 2012. Prediction of timber bending strength on basis of bending stiffness and material homogeneity assessed from dynamic excitation. *Wood Science and Technology* 46(4):667-683.

- Ouis, D. 2003. Effect of structural defects on the strength and damping properties of a solid material. *European Journal of Mechanics A/Solids* 22(1):47-54.
- Pellerin, R. F. and R. J. Ross. 2002. *Nondestructive Evaluation of Wood*. Forest Products Society. Peachtree Corners, GA, USA. 210 p.
- Piter, J. C., R. L. Zerbino and H. J. Blaß. 2004. Effectiveness of fundamental resonant frequency for determining the elastic properties of Argentinean *Eucalyptus grandis* in structural sizes. *Holz Roh Werkst* 62(2) 88-92.
- Ravenshorst, G. J. P., W. F. Gard and J. W. G. Van De Kuilen. 2013. The importance of characterisation and sampling of tropical wood species with regard to strength and durability classification. *Heron* 53(2-3):201- 228.
- Roohnia, M. and M. Kohantorabi. 2015. Dynamic methods to evaluate the shear modulus of wood. *BioResources* 10(3):4867-4876.
- Ross, R. J. (Ed.). 2015. *Nondestructive evaluation of wood: second edition*. General Technical Report FPL-GTR-238. Forest Products Laboratory. Madison, WI, USA. 169 p.
- Salmén, L. and I. Burgert. 2009. Cell wall features with regard to mechanical performance. A review. *Holzforschung* 63(2):121-129.
- Se Golpayegani, A., I. Brémaud, J., Gril, M-F. Thevenon, O. Arnould and K. Pourtahmasi. 2012. Effect of extractions on dynamic mechanical properties of white mulberry (*Morus alba*). *Journal of Wood Science* 58(2):153-162.
- Sedik, Y., S. Hamdan, I. Jusoh and M. Hasan. 2010. Acoustic Properties of Selected Tropical Wood Species. *Journal of Nondestructive Evaluation* 29(1):38-42.
- Silva G., J. A., T., F. J. Fuentes, R. Rodríguez A., P. A. Torres A., M. A. Lomelí R., J. Ramos Q., C. Waitkus and H. G. Richter. 2010. *Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas*. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jal., México. 186 p.
- Sotomayor C., J. R. 2015. *Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Mich., México. 65 p.
- Sotomayor-Castellanos, J. R., G. Suárez-Béjar y J. B. Olgúin-Cerón. 2015. Efecto del tratamiento higo-térmico en las características acústicas de la madera de *Quercus scytophylla*. *Madera y Bosques* 21(1): 139-156.

Spycher, M., F. W. R. Schwarze and R. Steiger. 2008. Assessment of resonance wood quality by comparing its physical and histological properties. *Wood Science and Technology* 42(4):431-440.

Sucharda, O., D. Mikolasek and J. Brozovsky. 2015. Finite element analysis and modeling of details timber structure. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences* 9:380-388.

Tamarit U., J. C. y J. L. López T. 2007. *Xilotecología de los principales árboles tropicales de México*. CIRGOC Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agropecuarias y Pecuarias. Libro Técnico Núm. 7. San Martinito Tlahuapan, Pue., México. 264 p.

Thibaut, B., J. Gril and M. Fournier. 2001. Mechanics of wood and trees: some new highlights for an old story. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Séries IIB Mechanics* 329(9):701-716.

Wang, Z., L. Li and M. Gong. 2012. Measurement of dynamic modulus of elasticity and damping ratio of wood-based composites using the cantilever beam vibration technique. *Construction and Building Materials* 28(1):831-834.

Weaver, W. Jr., S. Timoshenko and D. H. Young. 1990. *Vibration problems in engineering*. Wiley. New York, NY, USA. 624 p.

Yoshihara, H. and Y. Kubojima. 2002. Measurement of the shear modulus of wood by asymmetric four-point bending tests. *Journal of Wood Science* 48(1):14-19.