

Artículo original

Densidad, módulos dinámicos longitudinales e índices de calidad resultantes del densificado de la madera de especies tropicales

[Density, dynamic longitudinal modules and quality indices resulting from the densification of eight tropical woods]

Javier Ramón Sotomayor Castellanos^{*1}, Koji Adachi², Ryuichi Iida³, Tomoyuki Hayashi²

1. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Av. F.J. Múgica s/n, 58030, Morelia, México.

Correo electrónico: madera999@yahoo.com (J. R. Sotomayor * Autor para correspondencia).

2. Akita Prefectural University. Kaidobatanishi-241-438 Shimoshinjonakano, Akita, 010-0195, Japan.

Correos electrónicos: kadachi@iwt.akita-pu.ac.jp (K. Adachi), tomyuki_hayashi@iwt.akita-pu.ac.jp (T. Hayashi).

3. Tokyo Polytechnic University. 2 Chome-9-5 Honcho, Tokyo 164-0012, Japan.

Correo electrónico: r-iida@uitec.ac.jp (R. Iida).

Resumen

El aumento en la magnitud de una característica física de la madera, sin depreciar otras propiedades, se considera un avance tecnológico con posibles aplicaciones en ingeniería. Así, bajo la hipótesis de que el densificado de la madera aumenta su densidad y su módulo dinámico, la investigación tuvo como objetivos, por una parte, determinar estos parámetros, para comparar el comportamiento de la madera sólida frente a la madera densificada, y por otra, calcular a posteriori, los índices de densificado, elástico y de calidad. Se densificaron veinte probetas de las siguientes especies: *Cupressus lusitanica*, *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Tabebuia donnell-smithii*, *Fraxinus uhdei*, *Fagus grandifolia* subsp. *mexicana*, *Dalbergia palo-escrito* y *Guazuma ulmifolia*. Tanto antes como después del tratamiento se realizaron pruebas de vibraciones longitudinales. Como resultado del densificado, las densidades de las maderas aumentaron en promedio 35% y los módulos dinámicos se incrementaron 46%. Los resultados de los índices de densificado, elásticos y de calidad sugieren que el tratamiento de densificado es eficaz para aumentar la densidad y el módulo dinámico de maderas con un amplio rango de densidades.

Palabras clave: Calidad, Característica física, Densificado, Vibraciones.

Abstract

Exponentially increasing the physical characteristics of wood without depreciating its other properties is considered a technological advance with possible applications in engineering and materials science. Under the hypothesis that the process of densifying wood increases the materials density and dynamic modulus of elasticity, our research had the following objectives: to determine the parameters for a comparative analysis of behavior between densified/non densified wood as well as to calculate afterward the densified, elastic and quality indexes. Twenty samples of the following species were densified, *Cupressus lusitanica*, *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Tabebuia donnell-smithii*, *Fraxinus uhdei*, *Fagus grandifolia* subsp. *mexicana*, *Dalbergia palo-escrito* and *Guazuma ulmifolia*. All samples underwent longitudinal vibration tests before and after densification. As a result of the densification, the samples were at average 35% more dense than un treated samples. The dynamic module of elasticity as well increased an average of 45%. The results of the density, elasticity and quality indexes suggest that the densification is effective in increasing the density and elasticity of woods with a wide range of densities.

Keywords: Densified, Physical characteristic, Quality, Vibrations.

INTRODUCCIÓN

La diversidad biológica de México y Centroamérica comprende una gran variedad de especies de madera (Cordero y Boshier, 2003) pero muchas de ellas tienen un bajo aprovechamiento en la industria debido, entre otros factores, al desconocimiento de sus características mecánicas. La biodiversidad en las especies forestales que producen tejido ligno-celulósico representa un amplio potencial en aplicaciones prácticas de la madera como material para diseño e ingeniería (Felton *et al.*, 2017). Es así que con el objetivo de conservar los sistemas ecológicos y de mejorar el empleo de la madera, la tendencia tecnológica contemporánea es modificar sus propiedades naturales y desarrollar productos de alto valor agregado (Mitchell *et al.*, 2018).

El desarrollo tecnológico en ciencias de la madera es notorio, particularmente en el estudio de la madera como material de ingeniería (Pellietier y Doudak, 2019). Por una parte, se observa el desarrollo de materiales compuestos y derivados de madera (Várdai *et al.*, 2019). Por otra parte, la industria de la edificación incorpora elementos estructurales configurados como madera de ingeniería (Markström *et al.*, 2018). Desde otra perspectiva, se desarrollan tecnologías para modificar las características intrínsecas de la madera empleando tecnologías de carácter químico (Keplinger *et al.*, 2018). Además, otras tecnologías emergentes tienen por objeto mejorar las propiedades físicas de la madera (Fang *et al.*, 2019).

La densidad de la madera es el parámetro de referencia en su clasificación como material de ingeniería (Niklas y Spatz, 2010). Por su parte, el módulo dinámico longitudinal de la madera, determinado en pruebas empleando probetas de pequeñas dimensiones, se utiliza principalmente para caracterizar especies de madera y de esta forma promocionar su uso en productos de valor agregado (Sotelo *et al.*, 2017).

El aumento artificial de la densidad de la madera incrementa la resistencia mecánica, mejora

sus propiedades higroscópicas y aumenta su resistencia al ataque de agentes biológicos. No obstante, si la madera densificada se expone a la humedad, tiende a recuperar su forma original (Navi y Pizzi, 2015). El proceso de densificado de la madera puede ser considerado como una tecnología prometedora, amigable para el medio ambiente y que, aprovechando especies de madera de baja densidad, puede elaborar productos con valor agregado (Sheikh *et al.*, 2013), así se disminuye la presión de la extracción de las especies de alta densidad.

La intensidad del tratamiento se evalúa con el coeficiente de densificado, que representa el nivel de compactación del volumen respecto a la masa de la pieza en cuestión (Fang *et al.*, 2019). La calidad del tratamiento de densificado es valorada con el índice de densificado que expresa el aumento en la densidad de la pieza de madera en tratamiento y con el índice elástico que explica la mejora en el valor del módulo de elasticidad de la madera densificada en comparación con madera sin tratamiento. Ambos parámetros son necesarios para calcular el índice de calidad que interpreta la relación entre la mejora en densidad con relación al incremento en el módulo de elasticidad del densificado (Ulker *et al.*, 2012).

La caracterización mecánica de la madera contemporánea ha sido posible gracias a la aplicación de métodos que no destruyen las propiedades físicas y no influyen en el comportamiento futuro del material en cuestión (Liang y Fu, 2007). De tal suerte que, el efecto de un proceso de densificado puede ser evaluado en una muestra común de madera antes y después del tratamiento. Particularmente, la técnica que utiliza ondas mecánicas para determinar la frecuencia de resonancia y así estimar su módulo dinámico está documentada recientemente, entre otros, por Holeček *et al.* (2017), Qin *et al.* (2018) y França *et al.* (2019). En México, el uso de técnicas no destructivas en el estudio de la madera está documentada en los trabajos del 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, en Morelia (Sotomayor, 2019).

La síntesis de los trabajos revisados sugiere que el aumento en la magnitud de una característica física, mecánica, o ambos de la madera, sin menoscabo de otras propiedades, se considera un avance tecnológico con posibles aplicaciones en ingeniería. En el mismo contexto, la tecnología de densificado de la madera se orienta hacia la diversificación de usos novedosos de especies de baja densidad natural y las provenientes de plantaciones de rápido crecimiento. Sin embargo, no existe evidencia empírica suficiente para generalizar este razonamiento para todas las especies, ni para diferentes configuraciones experimentales. En el análisis bibliográfico, no se encontraron trabajos publicados que estudien el efecto del densificado sobre el módulo dinámico de maderas tropicales, particularmente utilizando vibraciones en la dirección longitudinal.

La argumentación anterior orienta la presente investigación bajo la siguiente hipótesis: el densificado de la madera aumenta su densidad y su módulo dinámico. Esta mejora tecnológica puede ser evaluada contrastando magnitudes de estas características, antes y después del tratamiento, y así poder calcular índices que relacionen estos parámetros como medidas adimensionales. Igualmente, se considera que la densidad y el módulo dinámico son características intrínsecas de la madera. En cambio, estos mismos parámetros en la madera densificada, son características tecnológicas artificiales.

Esta hipótesis está restringida al densificado por compresión de probetas de pequeñas dimensiones de las maderas de *Cupressus lusitanica* Mill., *Cedrela odorata* L., *Swietenia macrophylla* King, *Tabebuia donnell-smithii* Rose, *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh., *Fagus grandifolia* subsp. *mexicana* (Martínez) A.E. Murray, *Dalbergia palo-escrito* Rzed. & Guridi-Gómez, y *Guazuma ulmifolia* Lam. Estas especies son endémicas de México y Centroamérica y presentan potencial para la fabricación de productos de valor agregado (Cordero y Boshier, 2003). Sus propiedades tecnológicas están reportadas por Tamarit y López (2007) y Silva *et al.* (2010), mientras que

sus densidades y módulos de elasticidad están publicados por Sotomayor (2019).

Para verificar esta propuesta, los objetivos de la presente investigación fueron: a) determinar las densidades y los módulos dinámicos, para comparar el comportamiento de la madera sólida frente a la madera densificada; b) calcular a posteriori, los índices de densificado, elástico y de calidad de varias especies tropicales.

MATERIALES Y MÉTODO

La madera fue adquirida en piezas aserradas en establecimientos comerciales en el estado de Michoacán ($20^{\circ} 24'$ latitud norte y $103^{\circ} 44'$ longitud oeste), México. Las mismas que estuvieron libres de irregularidades de crecimiento. El taxón de las especies fue identificado 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, Morelia, Michoacán, México. Las muestras están depositadas en el mismo laboratorio. Para cada una de las especies, se recortaron veinte probetas con dimensiones de $0,02\text{ m} \times 0,02\text{ m} \times 0,4\text{ m}$ en las direcciones radial, tangencial y longitudinal respectivamente. Las probetas se almacenaron en una cámara de acondicionamiento con temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa del aire de 65% hasta que alcanzaron el contenido de humedad en equilibrio de 10%.

El contenido de humedad de la madera se calculó con un grupo adicional de 20 probetas de cada especie con dimensiones de $0,02\text{ m} \times 0,02\text{ m} \times 0,06\text{ m}$ y se determinó por el método de diferencia de pesos de acuerdo a la norma ISO 13061-1:2014 (International Organization for Standardization, 2014a). En cambio, la densidad aparente de la madera se determinó de acuerdo a la norma ISO 13061-2:2014 (International Organization for Standardization, 2014b).

El proceso de densificado se realizó en el Instituto de Tecnología de la Madera de la Universidad Prefectoral de Akita, Japón y consistió en cuatro

etapas. (a) las probetas se colocaron entre dos placas térmicas, con dimensiones de 1 m × 1 m, de una prensa *Shon ai-Tekko*, Modelo TS-100, con capacidad de 100 toneladas. La operación de prensado puede idealizarse como un sistema abierto y libre de restricción geométrica en la dirección transversal a la dirección de la carga. (b) las probetas de espesor inicial de 0,02 m se comprimieron en la dirección radial con una velocidad de prensado de 0,001 m min⁻¹ hasta alcanzar un espesor final de 0,014 m, equivalente a 70% de su dimensión original, que representa un coeficiente de densificado (λ_p) objetivo de 30% (Fórmula (2), Blomberg *et al.*, 2005). La presión aplicada varió de 30 a 50 MN m⁻², dependiendo de la densidad de la madera. (c) las probetas se calentaron en la prensa a 120 °C durante 6 horas. (d) las probetas fueron retiradas de la prensa y enfriadas a temperatura de laboratorio (20 °C) durante 12 horas. Para aligerar el texto, el término tratamiento sustituye al concepto *tratamiento de densificado*.

Las pruebas de vibraciones longitudinales se realizaron en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en México. Los ensayos consistieron en proporcionar un impulso en uno de los extremos de la probeta, apoyada en el nodo del primer modo de vibración y medir su frecuencia natural con la ayuda de un micrófono posicionado cerca del extremo

opuesto conectado al aparato Grindosonic® (Figura 1). Las densidades y los módulos dinámicos se determinaron para los dos estados de la madera: antes y después del densificado. La lista de parámetros, fórmulas y símbolos se presenta en la Tabla 1.

Diseño experimental

El diseño experimental incluyó el cotejo de los resultados de esta investigación con datos reportados en la literatura. La unidad experimental consistió en veinte probetas de cada una de las ocho especies en estudio. Se efectuaron pruebas con veinte réplicas (probetas por especie), totalizando cuarenta observaciones para cada una de las variables de respuesta, las cuales fueron la densidad y el módulo dinámico. Los índices de densificado, elástico y de calidad fueron analizados como variables derivadas, para ello, antes del densificado se consideró el factor de variación que modificó a la madera en dos estados: antes del densificado y después del densificado. Para cada muestra se determinaron la media (\bar{X}), la desviación estándar (σ) y el coeficiente de variación ($CV (\%) = \sigma/\bar{X}$) y se determinó su normalidad en las distribuciones. Del mismo modo se verificó su igualdad de varianzas (Ver-var) y se practicó un análisis de varianza (Anova de un solo factor). La hipótesis nula $H_0: \bar{X}_{AD} - \bar{X}_{DD} = 0$ ($P \leq 0,05$) se contrastó con la hipótesis alterna $H_A: \bar{X}_{AD} - \bar{X}_{DD} \neq 0$.

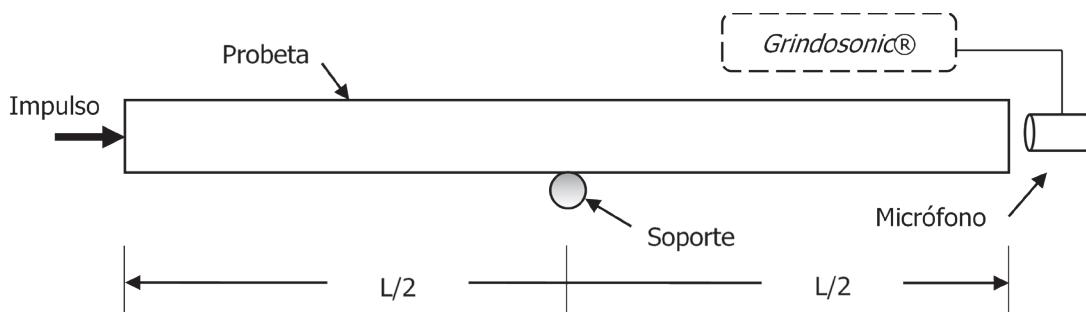


Figura 1. Pruebas de vibraciones longitudinales. L = Dirección longitudinal y largo de la probeta.

Tabla 1. Parámetros, fórmulas y símbolos utilizados para calcular la densidad, el coeficiente de densificado, el módulo dinámico y los índices de densificado, elástico y de calidad.

Parámetros	Fórmulas	No.	Referencias
Densidad	$\rho = \frac{P}{V}$	(1)	ISO 13061-2:2014 (2014b)
Coeficiente de densificado	$\lambda_p = \frac{\rho_{DD} - \rho_{AD}}{\rho_{DD}}$	(2)	Blomberg <i>et al.</i> (2005)
Módulo dinámico	$E = 4 L^2 \rho f^2$	(3)	Segundinho <i>et al.</i> (2012)
Índice de densificado	$I_p = \frac{\rho_{DD}}{\rho_{AD}}$	(4)	Blomberg <i>et al.</i> (2005)
Índice elástico	$I_E = \frac{E_{DD}}{E_{AD}}$	(5)	Blomberg <i>et al.</i> (2005)
Índice de calidad	$I_C = \frac{I_p}{I_E}$	(6)	Blomberg <i>et al.</i> (2005)

ρ = Densidad (kg m^{-3})

λ_p = Coeficiente de densificado (%)

E = Módulo dinámico (N m^{-2})

I_p = Índice de densificado (Sin dimensiones)

I_C = Índice de calidad (Sin dimensiones)

I_E = Índice elástico (Sin dimensiones)

P = Peso de la probeta (kg)

V = Volumen de la probeta (m^3)

L = Longitud de la probeta (m)

f = Frecuencia natural (Hz)

DD = Despues del densificado

AD = Antes del densificado

RESULTADOS

La densidad de las ocho maderas antes del tratamiento muestran un intervalo de densidades, que va desde un mínimo de 461 kg m^{-3} para *C. lusitanica* hasta un máximo de 675 kg m^{-3} para *G. ulmifolia* (Tabla 2). Así, como efecto del tratamiento, las densidades de las ocho maderas se incrementaron en promedio 35%.

Los resultados de las pruebas de normalidad verificaron la uniformidad de las distribuciones de las variables densidad y módulo dinámico. Al mismo tiempo, los resultados de las pruebas de verificación y análisis de varianza demostraron el efecto del tratamiento sobre la densidad de madera ($P_{(a=0,05)} < 0,001$) y sobre el módulo

dinámico ($P_{(a=0,05)} < 0,001$). Estos resultados indican que para las densidades y los módulos dinámicos existen diferencias estadísticamente significativas entre los estados de la madera antes y después del densificado. Pero un caso particular fue el módulo dinámico de la madera de *C. lusitanica* que no verificó una diferencia estadística ($P_{(a=0,05)} = 0,149$), pero si exhibió una diferencia aritmética de +5%. Cabe mencionar que en la madera densificada de las ocho especies no se observaron fisuras o zonas con madera comprimida en exceso, lo que permite asegurar que el tratamiento de densificado fue uniforme y eficiente.

El tratamiento alcanzo un coeficiente de densificado objetivo de 30%. El mismo que se sitúa

Tabla 2. Densidades, módulos dinámicos, índices de densificado, elásticos y de calidad para ocho especies tropicales.

Species	ρ_{AD}	ρ_{DD}	E_L_{AD}	E_L_{DD}	I_p	I_E	I_c
-	(kg m ⁻³)		(MN m ⁻²)		(Sin dimensiones)		
<i>Cupressus lusitanica</i>	461 (12)	607 (11)	10604 (26)	11100 (29)	1,32 -	1,05 -	1,26 -
<i>Cedrela odorata</i>	473 (20)	645 (17)	8119 (37)	12382 (22)	1,37 -	1,53 -	0,90 -
<i>Swietenia macrophylla</i>	540 (7)	743 (6)	9960 (17)	13874 (22)	1,38 -	1,39 -	0,99 -
<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	602 (7)	783 (5)	9462 (14)	13736 (14)	1,30 -	1,45 -	0,90 -
<i>Fraxinus uhdei</i>	611 (5)	823 (4)	10571 (24)	16256 (14)	1,35 -	1,54 -	0,87 -
<i>Fagus grandifolia</i> subsp. <i>mexicana</i>	621 (5)	853 (5)	11535 (13)	16898 (13)	1,37 -	1,46 -	0,94 -
<i>Dalbergia</i> palo-escrito	662 (10)	878 (9)	13571 (30)	17812 (21)	1,33 -	1,31 -	1,01 -
<i>Guazuma ulmifolia</i>	675 (6)	920 (6)	9437 (30)	14617 (11)	1,36 -	1,55 -	0,88 -

ρ = Densidad; E_L = Módulo dinámico; I_p = Índice de densificado; I_E = Índice elástico; I_c = Índice de calidad; AD = Antes del densificado; DD = Despues del densificado; Coeficientes de variación en porcento y entre paréntesis.

Tabla 3. Coeficientes de densificado, densidades, módulos dinámicos y de elasticidad, índices de densificado, elásticos y de calidad de la madera para seis especies a partir de datos bibliográficos. Donde $\lambda\rho$ = Coeficiente de densificado; I_p = Índice de densificado; I_E = Índice elástico; I_C = Índice de calidad; *Módulos según el tipo prueba: MOE = Módulo de elasticidad estático, Eoe = Ondas de esfuerzo, Eus = Ultrasonido, Evt = Vibraciones transversales.

Species	*	$\lambda\rho$ (%)	I_p	I_E	I_C	Referencias
-	-	(Sin dimensiones)		-		
<i>Pinus radiata</i>	MOE	47	1,78	2,16	0,83	Kamke (2006)
<i>Populus deltoides</i>	MOE	98	2,04	1,84	1,11	Kutnar et al. (2008)
<i>Populus tremuloides</i>	MOE	50	2,09	2,50	0,84	Fang et al. (2012)
<i>Populus maximowiczii</i>	MOE	50	1,97	2,43	0,81	Fang et al. (2012)
<i>Populus tomentosa</i>	MOE	47	1,82	1,73	1,05	Gao et al. (2016)
<i>Girococcus americanus</i>	MOE	50	2,02	2,13	0,95	Sotomayor (2018a)
<i>Girococcus americanus</i>	E _{oe}	50	2,02	1,90	1,06	Sotomayor (2016)
<i>Girococcus americanus</i>	E _{us}	50	2,02	1,92	1,05	Sotomayor (2017)
<i>Girococcus americanus</i>	E _{vt}	50	2,02	2,22	0,91	Sotomayor (2018b)

por debajo del rango de coeficientes de densificado reportado en la bibliografía y presentado en la Tabla 3. En comparación con las investigaciones anteriores orientadas en el efecto del densificado en los módulos de elasticidad (Tabla 3), el tratamiento de esta investigación fue menos intensivo. Sin embargo, es importante hacer notar que otros autores han trabajado con coeficientes de densificado similares a los de esta investigación, pero sus investigaciones están orientadas preferentemente a pruebas de higroscopía (Aleš *et al.*, 2013), de perfil de densidad (Belt *et al.*, 2013) y de flexión estática (Sikora *et al.*, 2017).

DISCUSIÓN

La densidad es un indicador de la variación de la estructura anatómica de la madera (Hofstetter y Gamstedt, 2009) y de la diversidad de sus componentes químicos, los cuales se transforman y modifican las propiedades mecánicas de la madera, particularmente cuando es expuesta a tratamientos térmicos (Kačíková *et al.*, 2013). Al aplicar una compresión mecánica más allá del límite plástico, se produce un reacomodo molecular que provoca nuevos enlaces químicos, que resultan de la deformación excesiva y permanente de las cadenas de los polímeros que constituyen la pared celular (Aimene y Nairn, 2015).

La información reportada en la bibliografía concerniente al densificado de maderas varía por la temperatura (Gabrielli y Kamke, 2010), la presión del proceso (Navi y Girardet, 2000) y el contenido de humedad de la madera (Navi y Heger, 2004). Los índices de densificado de la bibliografía son mayores en 47% con respecto a los resultados de esta investigación. Por otra parte, la diferencia en los resultados reportados es ocasionada por la diversidad de especies estudiadas y por los diferentes coeficientes de compresión aplicados. Además, Blomberg *et al.* (2005), Kutnar y Kamke (2012) y Sheikh *et al.* (2013) reportaron las modificaciones en la estructura anatómica de la madera ocasionadas por el tratamiento de densificado y su posterior

influencia en las propiedades físicas. Estos autores concluyen que las principales características anatómicas que influyen en la densidad y en el módulo de elasticidad de la madera densificada son la heterogeneidad de la estructura anatómica y la anisotropía material del plano leñoso.

Después del tratamiento, los coeficientes de variación de la densidad disminuyeron en promedio 13%. Por otra parte, la única especie cuyo coeficiente incrementó en un 4% fue *F. grandifolia* subsp. *mexicana*. En general, el tratamiento disminuye la variabilidad natural de la densidad. Para cada especie la densidad de las probetas de madera densificada fue similar entre ellas.

Los índices de densificado fueron en promedio 1,35. La madera de *T. donnell-smithii* presentó el valor mínimo de 1,30 y la de *S. macrophylla* el máximo de 1,38 (Tabla 2). Estos resultados son menores a los reportados en Kamke (2006), Fang *et al.* (2012), Gao *et al.* (2016), Sotomayor (2016), Sotomayor (2017), Kutnar *et al.* (2008), Sotomayor (2018a) y Sotomayor (2018b) en promedio de $I_p = 1,98$ (Tabla 3) pero proporcionales a un coeficiente de densificado promedio de 55%, puesto que, si se comprime más la madera, su índice de densificado aumenta proporcionalmente.

En el mismo orden de ideas, y no obstante que los procesos de densificado y las especies tratadas fueron diferentes a los de esta investigación, estos resultados siguen la misma tendencia que los de trabajos anteriores. Con todo, Yoshihara y Tsunematsu (2007) advierten que el coeficiente de densificado es uno de los principales parámetros que influye en el aumento del módulo dinámico de la madera densificada. De aquí se infiere que, para prospectar posibles aplicaciones prácticas de los resultados de esta investigación, son necesarios estudios particulares para identificar el coeficiente de compresión apropiado para cada especie y el tratamiento específico con el fin de incrementar el módulo de elasticidad de la madera.

Tabla 4. Densidades y módulos dinámicos para 18 especies a partir de datos bibliográficos. Donde ρ = Densidad; EL = Módulo dinámico.

Especies	ρ (kg m^{-3})	EL (MN m^{-2})	Referencias
<i>Afzelia bipindensis</i>	766	12860	Baar et al. (2015)
<i>Intsia bijuga</i>	812	18220	Baar et al. (2015)
<i>Millettia laurentii</i>	840	17920	Baar et al. (2015)
<i>Astronium graveolens</i>	856	16570	Baar et al. (2015)
<i>Microberlinia brazzavillensis</i>	810	19620	Baar et al. (2015)
<i>Mesopsis emmini</i>	357	9250	Chauhan y Sethy (2016)
<i>Bombax ceiba</i>	437	9160	Chauhan y Sethy (2016)
<i>Melia dubia</i>	577	13640	Chauhan y Sethy (2016)
<i>Grevillea robusta</i>	614	10610	Chauhan y Sethy (2016)
<i>Hevea brasiliensis</i>	621	9360	Chauhan y Sethy (2016)
<i>Tectona grandis</i>	632	14700	Chauhan y Sethy (2016)
<i>Acacia auriculiformis</i>	722	16770	Chauhan y Sethy (2016)
<i>Eucalyptus hybrid</i>	726	17310	Chauhan y Sethy (2016)
<i>Balanites aegyptiaca</i>	730	14545	Sotelo et al. (2017)
<i>Combretum glutinosum</i>	798	18947	Sotelo et al. (2017)
<i>Guiera senegalensis</i>	808	17489	Sotelo et al. (2017)
<i>Piliostig mareticulatum</i>	656	14106	Sotelo et al. (2017)
<i>Ziziphus mauritiana</i>	693	15287	Sotelo et al. (2017)

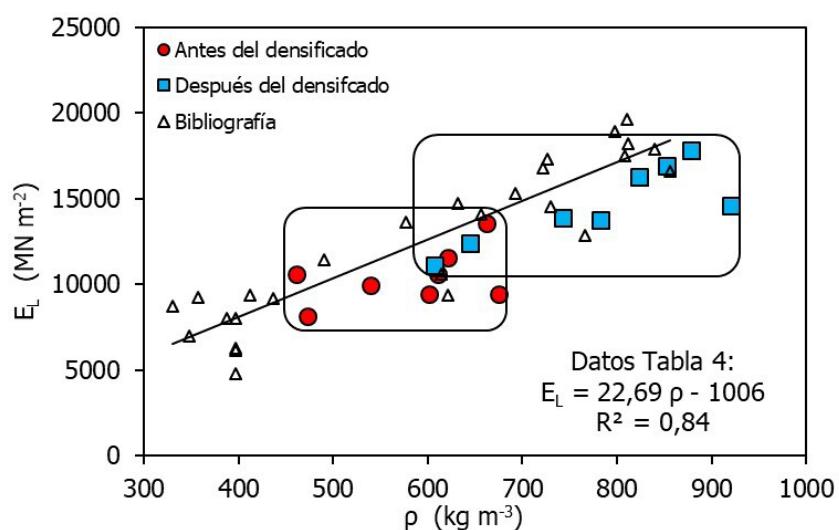


Figura 2. Dispersión y correlación de los módulos dinámicos en función de las densidades.

Después del tratamiento los módulos dinámicos aumentaron en promedio 46%, sin considerar para este cálculo el caso de *C. lusitanica*, cuyo módulo dinámico disminuyó 12%. Los valores promedio de los coeficientes de variación obtenidos para los módulos dinámicos sin y con tratamiento (Tabla 2) fueron compatibles con los reportados por los autores enlistados en la Tablas 3 y 4. Como consecuencia de la diferencia en las configuraciones experimentales utilizadas para estudiar el efecto del densificado en el módulo dinámico y elástico, los resultados son difíciles de comparar. De tal forma, la magnitud del incremento en los módulos dinámicos de las ocho especies estudiadas, aplicando un coeficiente de densificado de 30%, es menor respecto a los resultados reportados por los investigadores enlistados en la Tabla 3 cuyas investigaciones, con coeficientes de densificado promedio de 55%, logran incrementos en promedio de 107%.

Los datos de los módulos dinámicos para la madera sin densificar y densificada se posicionan en la tendencia general de la correlación entre los módulos dinámicos y las densidades reportados en la literatura (Tabla 4 y Figura 2). A la correlación de los datos de la Tabla 4 $E_L = 22,69 p - 1006$ se asocia un coeficiente de determinación alto $R^2 = 0,84$. Para los resultados de esta investigación, la correlación correspondiente a las maderas antes del densificado es $E_L = 9,49 p + 4900$ y exhibe un coeficiente de determinación casi nulo $R^2 = 0,22$. En cambio, para los resultados después del densificado, la correlación $E_L = 17,29 p + 1069$ muestra un fuerte coeficiente de determinación $R^2 = 0,70$. Este resultado confirma que la densidad de la madera es el parámetro físico que controla su resistencia mecánica y sugiere una mejora en la madera densificada respecto a la madera sin tratamiento, lo que posiblemente resulte relevante para el diseño y cálculo de productos y estructuras de madera.

Los índices elásticos de las ocho especies fueron superiores a la unidad, resultados que muestran una mejora en la resistencia elástica natural de las maderas después de su densificado. Los índices elásticos de las maderas en estudio

(Tabla 2) son en promedio 48% menores que el promedio de los índices reportados en la bibliografía (Tabla 3). Sin embargo, para el cociente entre los índices elásticos y de densificado ($IE/\lambda p$) esta diferencia es +11%.

Los valores de la bibliografía se agrupan de manera distinta a los de esta investigación y la correlación de todos los valores $IE = -0,0025 p + 3,001$ muestra un coeficiente de determinación bajo ($R^2 = 0,49$) y una tendencia general que sugiere que este parámetro disminuye a medida que las densidades de la madera aumentan. Sin embargo, las dispersiones son muy amplias por la diversidad en las especies observadas y por las diferencias de las configuraciones experimentales para densificar la madera y para determinar sus módulos de elasticidad. Contrastando los resultados de esta investigación (Tabla 2) con los datos reportados en la bibliografía (Tabla 3) se infiere que los índices elásticos de la madera aumentan proporcionalmente a los coeficientes de densificado.

Los índices de calidad de las maderas de esta investigación son mayores en 1% con respecto a los datos de la bibliografía. En cambio, el cociente entre los índices de calidad y los de densificado ($IC/\lambda p$) son de +41%.

CONCLUSIONES

El coeficiente de densificado objetivo de 30% aplicado a las maderas de *C. lusitanica*, *C. odorata*, *S. macrophylla*, *T. donnell-smithii*, *F. uhdei*, *F. grandifolia* subsp. *mexicana*, *D. palo-escrito* y *G. ulmifolia* es suficiente para lograr madera con una densidad mayor, uniforme y sin detrimiento de su estructura material.

El incremento artificial de las densidades de las maderas estudiadas aumenta sus módulos dinámicos longitudinales. Así, al obtener una mejora en la magnitud del módulo dinámico se verifica el paradigma en ciencias, ingeniería y tecnología de la madera que propone que el módulo de elasticidad de la madera es proporcional a su densidad.

Los índices de densificado, elásticos y de calidad obtenidos permiten concluir que el tratamiento de densificado es eficaz para aumentar la densidad de maderas en un amplio rango de densidades. En prospectiva, las especies son potencialmente candidatas al tratamiento de densificado para mejorar la densidad de la madera y el módulo dinámico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aimene, Y.E. y Nairn, J.A. (2015) Simulation of transverse wood compression using a large-deformation, hyperelastic-plastic material model. *Wood Science and Technology*, 49 (1), 21-39. doi: <https://doi.org/10.1007/s00226-014-0676-6>
- Aleš, U., Kamke, F.A., Sernek, M., Pavlič, M. y Kutnar, A. (2013) The wettability and bonding performance of densified VTC beech (*Fagus sylvatica* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) bonded with phenol-formaldehyde adhesive and liquefied wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 71 (3), 371-379. doi: 10.1007/s00107-013-0669-4
- Baar, J., Tippner, J. y Rademacher, P. (2015) Prediction of mechanical properties - modulus of rupture and modulus of elasticity of five tropical species by nondestructive methods. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 17 (2), 239-252. doi: 10.4067/S0718-221X2015005000023
- Belt, T., Rautkari, L., Laine, K. y Hill, C.A.S. (2013) Cupping behaviour of surface densified Scots pine wood: the effect of process parameters and correlation with density profile characteristics. *Journal of Materials Science*, 48 (18), 6426-6430. doi: 10.1007/s10853-013-7443-1
- Blomberg, J., Persson, B. y Blomberg, A. (2005) Effects of semi-isostatic densification of wood on the variation in strength properties with density. *Wood Science and Technology*, 39 (5), 339-350. doi: 10.1007/s002
- Chauhan, S. y Sethy, A. (2016) Differences in dynamic modulus of elasticity determined by three vibration methods and their relationship with static modulus of elasticity. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 18 (2), 373 - 382. doi: 10.4067/S0718-221X2016005000034
- Cordero, J. y Boshier, D.H. (2003) *Árboles de Centroamérica*. Turrialba: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Fang, C.H., Mariotti, N., Cloutier, A., Koubaa, A. y Blanchet, P. (2012) Densification of wood veneers by compression combined with heat and steam. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70 (1), 155-163. doi: <https://doi.org/10.1007/s00107-011-0524-4>
- Fang, C.H., Cloutier, A., Jiang, Z.H., He, J.Z. y Fei, B.H. (2019) Improvement of Wood Densification Process via Enhancing Steam Diffusion, Distribution, and Evaporation. *BioResources*, 14 (2), 3278-3288. doi: 10.15376/biores.14.2.3278-3288
- Felton, A., Ranius, T., Roberge, J.M., Öhman, K., Lämås, T., Hynynen, J., Juutinen, A., Mönkkönen, M., Nilsson, U., Lundmark, T. y Nordin, A. (2017) Projecting biodiversity and wood production in future forest landscapes: 15 key modeling considerations. *Journal of Environmental Management*, 197, 404-414. doi: 10.1016/j.jenvman.2017.04.001
- França, F.J.N., Seale, R.D., Shmulsky, R. y França, T.S.F.A. (2019) Modeling Mechanical Properties of 2 by 4 and 2 by 6 Southern Pine Lumber Using Longitudinal Vibration and Visual Characteristics. *Forest Products Journal*, 68 (3), 286-294. doi:10.13073/FPJ-D-17-00069
- Gabrielli, C.P. y Kamke, F.A. (2010) Phenol-formaldehyde impregnation of densified wood for improved dimensional stability. *Wood Science and Technology*, 44 (1), 95-10. doi: 10.1007/s00226-009-0253-6
- Gao, Z., Huang, R., Lu, J., Chen, Z., Guo, F. y Zhan, T. (2016) Sandwich compression of

- wood: control of creating density gradient on lumber thickness and properties of compressed wood. *Wood Science and Technology*, 50 (4), 833-844. doi: 10.1007/s00226-016-0824-2
- Hofstetter, K. y Gamstedt, E.K. (2009) Hierarchical modelling of microstructural effects on mechanical properties of wood. A review. *Holzforschung*, 63 (2), 130-138. doi: 10.1515/HF.2009.018
- Holeček, T., Gašparík, M., Lagaňa, R., Borůvka, V. y Oberhofnerová, V. (2017) Measuring the Modulus of Elasticity of Thermally Treated Spruce Wood using the Ultrasound and Resonance Methods. *BioResources*, 12 (1), 819-838. doi: 10.15376/biores.12.1.819-838
- International Organization for Standardization. (2014a) ISO 13061-1:2014. *Wood. Determination of moisture content for physical and mechanical tests*. Geneva: International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization. (2014b) ISO 13061-2:2014. *Wood. Determination of density for physical and mechanical tests*. Geneva: International Organization for Standardization.
- Kačíková, D., Kačík, F., Čabalová, I. y Ďurkovič, J. (2013) Effects of thermal treatment on chemical, mechanical and colour traits in Norway spruce wood. *Bioresource Technology*, 144, 669-674. doi: 10.1016/j.biortech.2013.06.110
- Kamke, F.A. (2006) Densified radiata pine for structural composites. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 8 (2), 83-92. doi: 10.4067/S0718-221X2006000200002
- Keplinger, T., Frey, M. y Burgert, I. (2018) Versatile strategies for the development of wood-based functional materials. *Proceedings of SPIE 10593, Bioinspiration, Biomimetics, and Bioreplication VIII*, 1059313. doi: 10.1117/12.2296537
- Kutnar, A. y Kamke, F.A. (2012) Influence of temperature and steam environment on set recovery of compressive deformation of wood. *Wood Science and Technology*, 46 (5), 953-964. doi: 10.1007/s00226-011-0456-5
- Kutnar, A., Kamke, F.A. y Šernek, M. (2008) The mechanical properties of densified VTC wood relevant for structural composites. *Holz Roh Werkst*, 66 (6), 439-446. doi: 10.1007/s00107-008-0259-z
- Liang, S. y Fu, F. (2007) Comparative study on three dynamic modulus of elasticity and static modulus of elasticity for Lodgepole pine lumber. *Journal of Forestry Research*, 18 (4), 309-312. doi: 10.1007/s11676-007-0062-4
- Markström, E., Kuzman, M.K., Bystedt, A., Sandberg, D. y Fredriksson, M. (2018) Swedish architects view of engineered wood products in buildings. *Journal of Cleaner Production*, 181, 33-41. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.01.216
- Mitchell, G., Gaspar F., Mateus, A., Mahendra, V. y Sousa, D. (2018) Advanced Materials from Forests. En: *Handbook of Ecomaterials*. Ed. por Martínez L., Kharissova O., y Kharisov B. Cham: Springer. 01-02
- Navi, P. y Girardet, F. (2000) Effects of thermo-hydro-mechanical treatment on the structure and properties of wood. *Holzforschung*, 54 (3), 287-293. doi: <https://doi.org/10.1515/HF.2000.048>
- Navi, P. y Heger, F. (2004) Combined Densification and Thermo-Hydro-Mechanical Processing of Wood. *MRS Bulletin*, 29 (5), 332-336. doi: 10.1557/mrs2004.100
- Navi, P., y Pizzi, A. (2015) Property changes in thermo-hydro-mechanical processing. *Holzforschung*, 69 (7), 863-873. doi: 10.1515/hf-2014-0198
- Niklas, K.J. y Spatz, H.C. 2010. Worldwide correlations of mechanical properties and

- green wood density. *American Journal of Botany*, 97 (10), 1587-1594. doi: <https://doi.org/10.3732/ajb.1000150>
- Pelletier, B. y Doudak, G. (2019) Investigation of the lateral-torsional buckling behavior of engineered wood I-joists with varying end conditions. *Engineering Structures*, 187, 329-340. doi: 10.1016/j.engstruct.2019.03.003
- Qin, J., Liu, X., Van Den Abeele, K. y Cui, G. (2018) The study of wood knots using acoustic nondestructive testing methods. *Ultrasonics*, 88, 43-50. doi: 10.1016/j.ultras.2018.01.004
- Segundinho, P.G.D., Cossolino, L.C., Pereira, A.H.A. y Calil, C. (2012) Analysis of the natural vibration frequency test method to obtain the modulus of elasticity of wood structural components. *Revista Arvore*, 36 (6), 1155-1161. doi: 10.1590/S0100-67622012000600016
- Sheikh, A.A., Morén, T., Hagman, O., Cloutier, A., Fang, C. y Elustondo, D. (2013) Anatomical properties and process parameters affecting blister/blow formation in densified European aspen and downy birch sapwood boards by thermo-hydro-mechanical compression. *Journal of Materials Science*, 48 (24), 8571-8579. doi: 10.1007/s10853-013-7679-9
- Sikora, A., Gaffová, Z., Rajnoha, R., Šatanová, A. y Kminiak, R., (2017) Deflection of Densified Beech and Aspen Woods as a Function of Selected Factors. *BioResources*, 12 (2), 3192-3210. doi: 10.15376/biores.12.2.3192-3210
- Silva Guzmán, J.A., Fuentes Talavera, F.J., Rodríguez Anda, R., Torres Andrade, P.A., Lomelí Ramírez, M.A., Ramos Quirarte, J., Waitkus, C. y Richter, H.G. (2010) *Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas*. México: Comisión Nacional Forestal.
- Sotelo Montes, C., Weber, J.C., García, Rosilei A., Silva, Dimas A. y Muñiz, G.I.B. (2017) Variation in growth, wood stiffness and density, and correlations between growth and wood stiffness and density in five tree and shrub species in the Sahelian and Sudanian ecozones of Mali. *Trees - Structure and Function*, 31 (3), 833-849. doi: 10.1007/s00468-016-1508-0
- Sotomayor, J.R. (2016) Efecto del densificado de la madera de *Gyrocarpus americanus* Jacq. en su módulo dinámico determinado por ondas de esfuerzo. *Ciencia amazónica (Iquitos)*, 6 (2), 162-171. doi: 10.22386/ca.v6i2.117
- Sotomayor, J.R. (2017) Densificado higro-termo-mecánico de madera de *Gyrocarpus americanus*. Evaluación por ultrasonido. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 43 (2), 156-164. Disponible en <http://ria.inta.gob.ar/>
- Sotomayor, J.R. (2018a) Evaluación del densificado de la madera de *Gyrocarpus americanus* Jacq. en su densidad y módulo de elasticidad. *Revista Científica*, 32 (2), 1-21. doi: 10.14483/23448350.128330
- Sotomayor, J.R. (2018b) Módulo dinámico por vibraciones transversales de madera densificada de *Gyrocarpus americanus*. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 22 (64), 31-38. Disponible en http://www.utm.mx/edi_anteriores/temas64/T64_E03_Modulo.pdf
- Sotomayor, J.R. (2019) Módulos de elasticidad e índices de calidad de maderas mexicanas. Síntesis de datos del Laboratorio de Mecánica de la Madera. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 15 (1), 4-64. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/335665376_Modulos_de_elasticidad_e_indices_de_calidad_de_maderas_mexicanas_Sintesis_de_datos_del_Laboratorio_de_Mecanica_de_la_Madera
- Tamarit Urias., J.C. y López Torres, J.L. (2007) *Xilotecnología de los principales árboles tropicales de México*. México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

Ulker, O., Imirzi, O. y Burdurlu, E. (2012) The effect of densification temperature on some physical and mechanical properties of scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *BioResources*, 7 (4), 5581-5592. doi: 10.15376/biores.7.4.5581-5592.

Várdai, R., Lummerstorfer, T., Pretschuh, C., Jerabek, M., Gahleitner, M., Pukánszky, B. y Renner, K. (2019) Impact modification of PP/wood composites: A new approach using hybrid fibers. *eXPRESS Polymer Letters*, 13 (3), 223-234. doi; 10.3144/expresspolymlett.2019.19

Yoshihara, H. y Tsunematsu, S. (2007) Bending and shear properties of compressed Sitka spruce. *Wood Science and Technology*, 41 (2), 117-131. doi: 10.1007/s00226-006-0091-8

Conflictos de interés

Los autores declaramos que no existe ningún conflicto de interés.

