



Ingeniería Mecánica

ISSN: 1815-5944

Facultad de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior
Politécnico "José Antonio Echeverría"

Sotomayor-Castellanos, Javier Ramón; Adachi, Koji; Iida, Ryuichi; Hayashi, Tomoyuki
Verificación con ultrasonido del tratamiento de densificado en ocho maderas mexicanas
Ingeniería Mecánica, vol. 24, núm. 1, 2021, Enero-Abril, pp. 55-62
Facultad de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría"

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=225169340006>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org



Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto



Verificación con ultrasonido del tratamiento de densificado en ocho maderas mexicanas

Ultrasound verification of the densification treatment in eight mexican woods

Javier Ramón Sotomayor-Castellanos^{I,*}, Koji Adachi^{II}, Ryuichi Iida^{III}, Tomoyuki Hayashi^{II}

I. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México

II. Universidad Prefectural de Akita. Noshiro, Japón

III. Universidad Politécnica en Tokio. Tokio, Japón

*Autor de correspondencia: madera999@yahoo.com

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 27 de julio de 2020

Aceptado: 30 de noviembre de 2020

Resumen

El objetivo de la investigación fue evaluar el densificado de ocho maderas mexicanas: *Cupressus lindleyi* Klotzsch ex Endl., *Cedrela odorata* L., *Swietenia macrophylla* King, *Tabebuia donnell-smithii* Rose, *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh., *Fagus mexicana* Martínez, *Dalbergia palo-escrito* Rzed. & Guridi-Gómez, y *Guazuma ulmifolia* Lam. La madera se densificó con un proceso termo-mecánico. Antes y después del densificado, se determinaron experimentalmente, la densidad, la velocidad de onda por ultrasonido en la dirección longitudinal y el módulo dinámico. Además, se calcularon los índices de densificado, elástico y

de calidad del tratamiento. Entre la madera no densificada y la madera densificada, en las ocho especies, se encontraron diferencias estadísticamente significativas para la densidad, la velocidad de onda y el módulo dinámico. Los índices de densificado, elástico y de calidad son similares a los mismos parámetros de las especies reportados en la bibliografía. Estos indicadores sugieren que es posible aumentar la densidad de estas especies y así ampliar sus usos.

Palabras claves: densidad; módulo dinámico; índice de densificado; índice elástico; índice de calidad.

Abstract

The objective of the research was to evaluate the densification of eight Mexican woods: *Cupressus lindleyi* Klotzsch ex Endl., *Cedrela odorata* L., *Swietenia macrophylla* King, *Tabebuia donnell-smithii* Rose, *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh., *Fagus mexicana* Martínez, *Dalbergia palo-escrito* Rzed. & Guridi-Gómez, and *Guazuma ulmifolia* Lam. The wood was densified with a thermo-mechanical process. Before and after densification, the density, the ultrasonic wave speed in the longitudinal direction and the dynamic module were determined experimentally. In addition, the densified, elastic and treatment quality indices were

calculated. Between the non-densified wood and the densified wood, in the eight species, statistically significant differences were found for density, wave velocity and dynamic modulus. The densified, elastic and quality indices are similar to the same parameters of the species reported in the literature. These indicators suggest that it is possible to increase the density of these species and thus expand their uses.

Key words: density; dynamic modulus; density index; elastic index; quality index.

Cómo citar este artículo:

Sotomayor Castellanos JR, Adachi K, Iida R, Hayashi T. Verificación con ultrasonido del tratamiento de densificado en ocho maderas mexicanas. 2020;23(3):e620. ISSN 1815-5944.

Introducción

La madera densificada es un producto con valor agregado y se considera amigable con el medio ambiente. Sin cambiar sus características ecológicas ni obstaculizar su uso en el ciclo de vida total del material, esta tecnología mejora las propiedades intrínsecas de la madera, para adquirir una forma y funcionalidad deseadas por los ingenieros [1, 2]. Además, el densificado de la madera mejora su durabilidad y estabilidad dimensional, así como su resistencia mecánica [3]. El inconveniente de esta técnica es la recuperación de la geometría original de la madera, que aparece cuando la madera densificada se vuelve a humedecer y calentar [4].

En el densificado termo-mecánico de la madera intervienen calor y compresión mecánica en la dirección transversal, lo que provoca que la relación peso/volumen de la madera aumente al reducir el volumen vacío de los lúmenes en el plano leñoso [5, 6]. Las características mecánicas de la madera así densificada, dependen de

su anatomía, su anisotropía y de su contenido de humedad [7]. Igualmente, el color y la recuperación geométrica de la madera densificada dependen de la temperatura, presión y tiempo del proceso [8, 9].

Los métodos de evaluación no destructivos son una técnica efectiva y rápida para determinar las características de materiales. No destruyen las propiedades físicas y mecánicas ni influyen en el comportamiento futuro del material en cuestión [10-12]. La caracterización mecánica de la madera utilizando ultrasonido, aprovecha la capacidad de este material para transmitir una onda mecánica y así medir la velocidad de transmisión a la que esta viaja. Combinando la velocidad de onda con la densidad, es posible determinar, en probetas de madera, el módulo dinámico de manera no destructiva [13-15].

La calidad del tratamiento de densificado es valorada con los índices de densificado y elástico [16, 17]. El índice de densificado expresa el aumento en la densidad de la pieza de madera en tratamiento. Por su parte, el índice elástico explica la ganancia en el valor del módulo de elasticidad de la madera densificada. El índice elástico es equivalente al índice potencial de resistencia reportado por [16], pero en el caso citado se contrastan las resistencias en compresión, medidas antes y después del Tratamiento. Los índices de densificado y elástico se combinan en el índice de calidad del densificado para explicar la relación entre la ganancia en densidad y el incremento en el módulo de elasticidad.

El objetivo de la investigación fue evaluar el densificado de ocho maderas mexicanas: *Cupressus lindleyi* Klotzsch ex Endl., *Cedrela odorata* L., *Swietenia macrophylla* King, *Tabebuia donnell-smithii* Rose, *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh, *Fagus mexicana* Martínez, *Dalbergia palo-escrito* Rzed. & Guridi-Gómez, y *Guazuma ulmifolia* Lam. Para ello se contrastaron sus densidades, sus velocidades de onda y sus módulos dinámicos, antes y después del tratamiento. Igualmente, se determinaron los índices de densificado, elástico y de calidad del tratamiento.

Métodos y Materiales

El material experimental provino del banco de maderas que forma parte del programa de caracterización física y mecánica de especies mexicanas, 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. La madera aserrada fue adquirida en establecimientos comerciales en el estado de Michoacán, México. La madera consistió en duramen libre de anomalías naturales de crecimiento.

Antes y después del densificado y de las pruebas de ultrasonido, la madera se almacenó en una cámara de acondicionamiento (Temperatura = $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$; humedad relativa de $65\% \pm 5\%$) hasta que su peso fue constante y alcanzó el contenido de humedad en equilibrio. 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.

El contenido de humedad y la densidad aparente se calcularon con un grupo adicional de 20 probetas de cada especie con dimensiones de $0,02\text{ m} \times 0,02\text{ m} \times 0,06\text{ m}$ recortadas de los extremos de las piezas de donde se prepararon las probetas para el densificado. Así el análisis estadístico se realizó con muestras homogéneas. La densidad aparente de la madera, antes y después del densificado, se determinó de acuerdo a la norma *Physical and mechanical properties of wood -- Test methods for small clear wood specimens -- Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests* ISO 13061-2:2014 [18]. El contenido de humedad se determinó por el método de diferencia de pesos de acuerdo a la norma *Physical and mechanical properties of wood -- Test methods for small clear wood specimens -- Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests* ISO 13061-1:2014 y [19]. Para aligerar el texto, el término densidad sustituye al concepto densidad aparente y la palabra proceso o tratamiento siempre hará referencia al proceso de densificado.

Proceso de densificado

El proceso de densificado se realizó en la Universidad Prefectoral de Akita, Japón y consistió en las siguientes etapas:

1. Las probetas se colocan entre dos placas térmicas de una prensa *Shon ai-Tekko*, Modelo TS-100 (Japón), con capacidad de 100 toneladas y con dimensiones de las placas térmicas de $1\text{ m} \times 1\text{ m}$. 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.
2. Las probetas de espesor inicial de $0,02\text{ m}$ se comprimen en la dirección radial con una velocidad de prensado de $0,001\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ hasta alcanzar un espesor objetivo de $0,014\text{ m}$, equivalente a 70% de su dimensión original. La presión aplicada varía de 30 a $50\text{ MN} \cdot \text{m}^{-2}$, dependiendo de la densidad de la madera.
3. Las probetas en la prensa son calentadas a $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 6 horas.
4. Posteriormente, las probetas son retiradas de la prensa y enfriadas a temperatura de laboratorio ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) durante 12 horas.

Pruebas de ultrasonido

Las pruebas de ultrasonido se realizaron en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y consistieron en suministrar un impulso ultrasónico en transmisión directa a lo largo de la probeta (dirección longitudinal) con el equipo de medición de tiempo de transmisión de ultrasonido Sylvatest-duo (22 kHz de

frecuencia de emisión) fabricado por Concepts Bois Structure (Francia). Con la longitud de las probetas y el tiempo de transmisión del ultrasonido, se calculó la velocidad de transmisión del ultrasonido.

Usando la ecuación (1) se calcularon los módulos dinámicos [12]:

$$E_{us} = \rho_{CH} v_{us}^2 \quad (1)$$

Donde:

E_{us} = módulo dinámico (N·m-2)

ρ_{CH} = densidad de la madera (kg·m-3)

v_{us} = velocidad de onda (m·s-1)

Usando la ecuación (2) fue calculado el índice de densificado [16]:

$$I_p = \frac{\rho_{CH\ dd}}{\rho_{CH\ ad}} \quad (2)$$

Donde:

I_p = índice de densificado (sin dimensiones)

$\rho_{CH\ dd}$ = densidad después del densificado (kg·m-3)

$\rho_{CH\ ad}$ = densidad antes del densificado (kg·m-3)

Usando la ecuación (3) fue calculado el índice elástico [16]:

$$I_E = \frac{E_{us\ dd}}{E_{us\ ad}} \quad (3)$$

Donde:

I_E = índice elástico (sin dimensiones)

$E_{us\ dd}$ = Módulo dinámico después del densificado (N·m-2)

$E_{us\ ad}$ = Módulo dinámico antes del densificado (N·m-2)

El índice de calidad fue calculado con la ecuación (4) [16]:

$$Q_{p/E} = \frac{I_p}{I_E} \quad (4)$$

Donde:

$Q_{p/E}$ = Índice de calidad (sin dimensiones)

I_p = índice de densificado (sin dimensiones)

I_E = índice elástico (sin dimensiones)

Diseño experimental

Cada grupo de probetas de las ocho especies se considera una muestra independiente. El tratamiento de densificado es el factor de variación. Las variables de respuesta son la densidad y la velocidad de onda. El módulo dinámico, así como los índices de densificado, elástico y de calidad se analizan como variables derivadas. El contenido de humedad es un parámetro de referencia.

Se efectuaron pruebas con 20 réplicas por especie (probetas), por lo que en total se realizaron 160 observaciones para cada una de las variables de respuesta. Se realizaron pruebas de normalidad de la distribución de las muestras y se calcularon el sesgo estandarizado y el apuntamiento estandarizado; de igual forma, se calcularon la media y el coeficiente de variación. También, se realizaron pruebas de verificación y análisis de varianza, las cuales tienen un nivel de confianza del 95 %.

Resultados y Discusión

El contenido de humedad de la madera antes del densificado varía desde un mínimo de 8,5 % (*C. lindleyi*) hasta un máximo de 11 % (*F. mexicana*). El coeficiente de variación máximo fue de 9,3 % para *D. palo-escrito*. Estos resultados implican que la variación máxima en el contenido de humedad es de 1 %. El contenido de humedad de la madera densificada disminuye comparativamente con el de la madera sin densificar [18] y de acuerdo a los resultados reportados por [19] para un proceso de densificado similar al de esta investigación (2021). Después del densificado, la madera se almacenó durante seis meses (T 20 °C y humedad relativa 65 %) hasta que recuperó su contenido de humedad en equilibrio. En consecuencia, la madera se considera en estado seco y su contenido de humedad no influye en los resultados.

Para todas las muestras de la densidad y de la velocidad de onda, los estadísticos estandarizados sesgo (SE) y apuntamiento (AE) cumplieron el criterio de demarcación ($-2 < SE\ AE < 2$) para considerar que las distribuciones de las mediciones estuvieron repartidas normalmente. Las pruebas de verificación de varianza confirmaron que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar. En cambio, el análisis de varianza muestra que existe una diferencia estadísticamente significativa entre la madera no densificada y la madera densificada para las variables de densidad, velocidad de onda y módulo dinámico. Este corolario es válido en su totalidad para la densidad y el módulo dinámico de las ocho especies. Sin embargo, para la velocidad de onda el análisis de varianza de *G. ulmifolia* reporta un valor de $P (\alpha = 0,05) > 0,05$, este resultado implica que, después del densificado, la velocidad de onda no varía significativamente.

Densidades e índices de densificado

La tabla 1 presenta los resultados del tratamiento de densificado y la clasificación de las maderas respecto a su densidad [20]. La madera de *C. lindleyi* y *C. odorata* clasifican como de densidad baja, mientras que las otras seis especies clasifican como de densidad media. Las magnitudes de sus valores promedio y de sus coeficientes de variación son similares a los reportados en la bibliografía [21 - 23].

Tabla 1. Resultados del tratamiento de densificado. Fuente: autores

Especie	Código	Media	CH	$\rho_{CH\ ad}$	$\rho_{CH\ dd}$	I_p
	CD*	Coeficiente de variación	(%)	($kg \cdot m^{-3}$)	($kg \cdot m^{-3}$)	-
<i>Cupressus lindleyi</i>	CL	$\bar{x}$	8,5	458	607	1,32
	Baja	CV	8,8	11,9	11,4	5,10
<i>Cedrela odorata</i>	CO	$\bar{x}$	11,2	482	645	1,34
	Baja	CV	5,0	17,3	17,2	12,80
<i>Swietenia macrophylla</i>	SM	$\bar{x}$	9,4	540,0	743	1,38
	Media	CV	5,5	6,7	6,2	2,80
<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	TD	$\bar{x}$	9,7	600	783	1,31
	Media	CV	3,8	6,3	5,4	3,60
<i>Fraxinus uhdei</i>	FU	$\bar{x}$	10,2	612	823	1,35
	Media	CV	6,9	4,6	3,8	3,60
<i>Fagus mexicana</i>	FM	$\bar{x}$	11,0	621	853	1,37
	Media	CV	3,9	5,2	5,4	2,40
<i>Dalbergia palo-escrito</i>	DP	$\bar{x}$	9,4	655	878,0	1,34
	Media	CV	9,3	9,0	8,7	5,40
<i>Guazuma ulmifolia</i>	GU	$\bar{x}$	10,0	675,0	920,0	1,36
	Media	CV	5,5	6,0	5,7	2,70

CH = Contenido de humedad; $\rho_{CH\ ad}$ = Densidad aparente antes del densificado; $\rho_{CH\ dd}$ = Densidad aparente después del densificado; I_p = Índice de densificado; $\bar{x}$ = Media; CV = Coeficiente de variación (%); * CD = Clasificación densidad [20]; Códigos para las figuras 1 a 5.

Después del tratamiento, la densidad de la madera se incrementa en promedio 34,6 % (Tabla 1). Los índices de densificado se sitúan en un rango que va de 1,31 (*T. donnell-smithii*) hasta 1,38 (*S. macrophylla*). Sus magnitudes para las ocho especies son similares y se reparten en un intervalo de densidad antes del tratamiento entre 458 $kg \cdot m^{-3}$ (*C. lindleyi*) y 675 $kg \cdot m^{-3}$ (*G. ulmifolia*). Los coeficientes de variación de la densidad después del tratamiento disminuyen, con excepción de *C. odorata* y *F. uhdei* cuyos coeficientes de variabilidad aumentan.

Estos resultados son acordes con los obtenidos por [18, 24, 25] respecto a la variabilidad en los incrementos en la densidad de la madera obtenida en sus investigaciones. En la investigación, la estrategia experimental se orientó hacia el análisis de resultados especie por especie, de acuerdo al paradigma contemporáneo que rige la investigación en ciencias, tecnología e ingeniería de la madera; es necesario caracterizar el comportamiento mecánico de la madera con un enfoque de experimentación de caso por caso de una especie en particular. Cada procedimiento debe hacer referencia a las variables de las condiciones del ensayo, por ejemplo, la densidad y el contenido de humedad de la madera, y los datos deben derivarse de un tamaño de muestra observada estadísticamente representativa. Con esto se pueden proponer tendencias en el comportamiento general para una especie en específico, y/o por agrupamiento de varias de ellas que denoten una tendencia similar.

La tabla 2 resume los datos de la bibliografía, mientras que en la figura 1 se comparan con los datos de esta investigación. Los datos de la bibliografía provienen de configuraciones experimentales diversas, cuyas condiciones de tiempo, temperatura, presión y grados de densificado fueron particulares a cada una de las

especies estudiadas. Sin embargo, el índice de densificado permite comparar directamente el potencial para el densificado de una especie, independientemente de las condiciones del tratamiento aplicado.

Así, para el grupo de *P. deltoides* x *P. trichocarpa*, *G. americanus* y *P. sylvestris*, sus índices de densificado son mayores. Caso particular es *P. abies*, la cual no obstante su densidad comparativamente baja, reporta un I_p mayor que todas las maderas. Ahora bien, el índice de densificado de *F. sylvatica* es del mismo orden del de las ocho especies en estudio. Estos resultados indican que las ocho maderas en estudio muestran un potencial para aumentar su densidad como resultado del tratamiento de densificado.

Tabla 2. Datos de la bibliografía. Fuente: [18, 24, 25]

Especie	Código	Referencia	$\rho_{CH\ ad}$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	I_p	I_E	$Q_{p/E}$
<i>Picea abies</i>	PA	[18]	361	3,52	2,29	0,65
<i>Fagus sylvatica</i>	FS	[18]	651	1,75	1,19	0,68
<i>Pinus sylvestris</i>	PS	[24]	430	1,84	1,11	0,61
<i>Populus deltoides</i> x <i>P. trichocarpa</i>	PD	[25]	331	1,66	1,38	0,83
<i>Gyrocarpus americanus</i>	GA	[25]	397	2,01	1,92	0,95

$\rho_{CH\ ad}$ = Densidad aparente antes del densificado; I_p = Índice de densificado; I_E = Índice elástico; $Q_{p/E}$ = Índice de calidad; Códigos para las figuras 4 y 5.

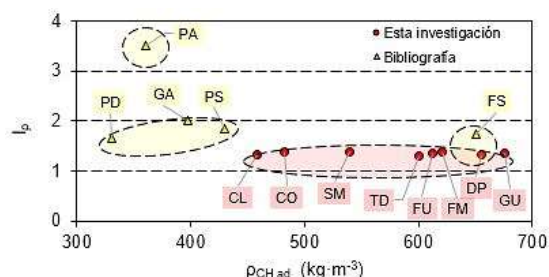


Fig. 1. Comparativo de los índices de densificado (I_p). Fuente: autores y [18, 24, 25]

Velocidades de onda

Las magnitudes de las velocidades de onda antes del densificado, tabla 3, son similares a las reportadas en la bibliografía [23]. El promedio de la velocidad de onda antes del densificado fue de $4334\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, después del tratamiento fue de $4690\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. El resultado es un incremento de 8 %, con excepción de *F. uhdei* con una disminución del 7,6 % y *G. ulmifolia* con 0,54 %. Después del densificado, los coeficientes de variación de la velocidad de onda disminuyen, con excepción de *C. odorata* y *F. uhdei*, cuyos coeficientes de variabilidad aumentan.

Tabla 3. Resultados de las pruebas de ultrasonido. Fuente: autores

Especie	Media	$V_{us\ ad}$	$V_{us\ dd}$	$E_{us\ ad}$	$E_{us\ dd}$	I_E	$Q_{p/E}$
	Coeficiente de variación	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	($\text{MN}\cdot\text{m}^{-2}$)	($\text{MN}\cdot\text{m}^{-2}$)	-	-
<i>Cupressus lindleyi</i>	$\bar{x}$	4834,0	5340,0	10903,0	17446,0	1,63	0,82
	CV	13,0	10,7	26,0	23,4	15,70	14,90
<i>Cedrela odorata</i>	$\bar{x}$	4499,0	4736,0	9555,0	15002,0	1,69	0,83
	CV	8,9	22,3	23,5	29,6	15,80	11,50
<i>Swietenia macrophylla</i>	$\bar{x}$	4144,0	4830,0	9312,0	17417,0	1,88	0,74
	CV	8,9	8,4	16,4	15,8	10,00	10,10
<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	$\bar{x}$	3857,0	4490,0	9034,0	15845,0	1,77	0,74
	CV	5,8	4,3	16,6	11,6	9,00	7,10
<i>Fraxinus uhdei</i>	$\bar{x}$	4686,0	4329,0	13471,0	15556,0	1,15	1,19
	CV	3,9	8,4	11,2	19,1	11,90	11,10
<i>Fagus mexicana</i>	$\bar{x}$	4462,0	4784,0	12441,0	19628,0	1,60	0,88
	CV	6,8	5,7	15,8	14,1	13,80	16,00
<i>Dalbergia palo-escrito</i>	$\bar{x}$	4439,0	5200,0	13250,0	24089,0	1,84	0,73
	CV	11,2	10,3	27,1	24,7	10,70	9,60
<i>Guazuma ulmifolia</i>	$\bar{x}$	3834,0	3813,0	9976,0	13413,0	1,36	1,01
	CV	7,4	4,5	16,4	11,7	11,80	11,40

$V_{us\ ad}$ = Velocidad de onda antes del densificado; $V_{us\ dd}$ = Velocidad de onda después del densificado; $E_{us\ ad}$ = Módulo dinámico antes del densificado; $E_{us\ dd}$ = Módulo dinámico después del densificado; I_E = Índice elástico; $Q_{p/E}$ = Índice de calidad; $\bar{x}$ = Media; CV = Coeficiente de variación (%).

Para explicar estos resultados, la figura 2 presenta las dispersiones de las velocidades de onda antes y después del densificado en función de las densidades correspondientes. Si bien la tendencia general es la disminución de las velocidades de onda en función de las densidades, sus regresiones lineales resultan en coeficientes de determinación bajos ($v_{us\ ad} = -2,33\ \rho_{CH\ ad} + 5698$ con $R^2 = 0,25$ y $v_{us\ dd} = -2,39\ \rho_{CH\ dd} + 6563$ con $R^2 = 0,29$).

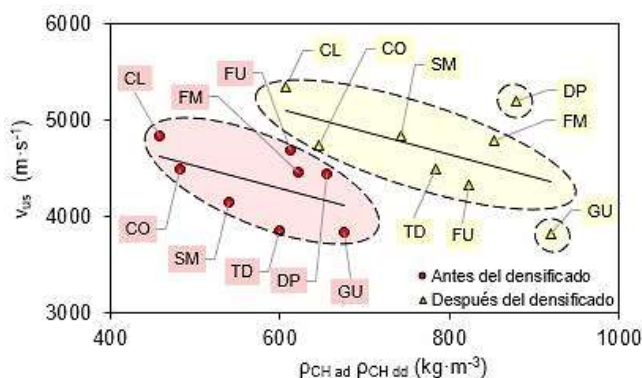


Fig. 2. Dispersiones de las velocidades de onda (v_{us}) en función de las densidades (ρ_{CH}) antes y después del tratamiento. Fuente: autores

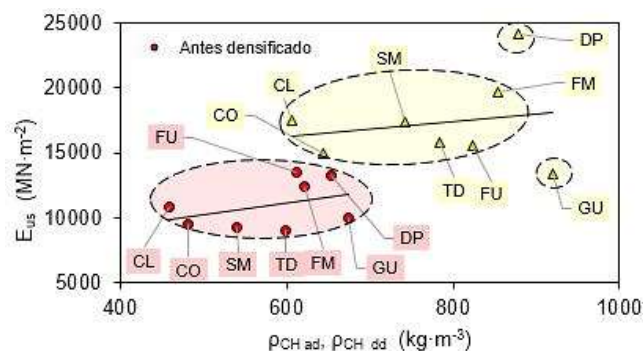


Fig. 3. Dispersiones de los módulos de elasticidad (E_{us}) en función de las densidades (ρ_{CH}) antes y después del tratamiento. Fuente: autores

Módulos de elasticidad

Las magnitudes de los módulos dinámicos antes del densificado, tabla 3, son similares a las reportadas en la bibliografía por [18, 23, 24]. Para las ocho especies en estudio, los valores promedio del módulo dinámico aumentan en un 58,6 %, resultado que verifica los datos reportados por [6]. Asimismo, se verifica el paradigma en ciencias, tecnología e ingeniería de la madera que propone que el módulo dinámico aumenta a medida que se incrementa la densidad de la madera, en este caso, el aumento se realiza de manera artificial.

De acuerdo con la figura 3, los valores de los módulos dinámicos se agrupan en dos nubes bien diferenciadas en función de la densidad antes y después del tratamiento. Si bien se observa que los módulos dinámicos aumentan en función de la densidad, se perciben correlaciones bajas ($E_{us\ ad} = 8,933 \rho_{CH\ ad} + 5813$ con $R^2 = 0,15$ y $E_{us\ dd} = 5,73 \rho_{CH\ dd} + 12822$ con $R^2 = 0,04$).

Los coeficientes de variación del módulo dinámico después del densificado disminuyen en comparación con los de antes del densificado, con excepción de *C. odorata* y *F. uhdei* cuyos coeficientes de variabilidad aumentan. El incremento para estas dos especies es resultado de los aumentos en la variabilidad de la densidad y de la velocidad de onda.

Índices elásticos

La figura 4 presenta un análisis comparativo de los índices elásticos (IE) entre las ocho especies en estudio y con datos estimados a partir de resultados reportados por [18, 24, 25], estos datos se detallan en la tabla 2. El promedio de los índices elásticos determinados en esta investigación es 2,5 % mayor al obtenido para especies especificadas en la bibliografía. Los coeficientes de variación fluctúan entre un mínimo de 9 % para *T. donnell-smithii* y un máximo de 15,8 % para *C. odorata*.

Con excepción del índice elástico de *P. abies* (PA) reportado por [18], todos los índices se sitúan al interior del intervalo 1 y 2, independientemente de la magnitud de la densidad. Si se hace abstracción de *F. sylvatica* (FS) cuya densidad es de 651 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ y se posiciona al interior de la nube en la cual se agrupan las maderas estudiadas en esta investigación, los índices elásticos de las maderas mexicanas son similares a los referidos en la bibliografía.

Índices de calidad

Con excepción de *F. uhdei* (FU: $Qp/E = 1,19$) y el caso especial de *G. ulmifolia* (GU: $Qp/E = 1,01$), las otras seis maderas estudiadas en esta investigación muestran un índice de calidad inferior a la unidad, al igual que los mismos índices de las maderas revisadas en la bibliografía. Asimismo, se observa que su magnitud es independiente de la densidad aparente antes del densificado, figura 5. Respecto a los coeficientes de variación de los índices de calidad, varían entre 7,1 % (*F. uhdei*) y 16 % (*F. mexicana*). El promedio de los índices de calidad de esta investigación son 17,6 % mayores comparativamente al promedio de los índices reportados en la bibliografía. Un valor menor a la unidad del índice de calidad significa una ganancia en el módulo de elasticidad con relación a la de la densidad. De tal forma, una madera con un índice de calidad comparativamente menor sugiere un mayor potencial para densificado.

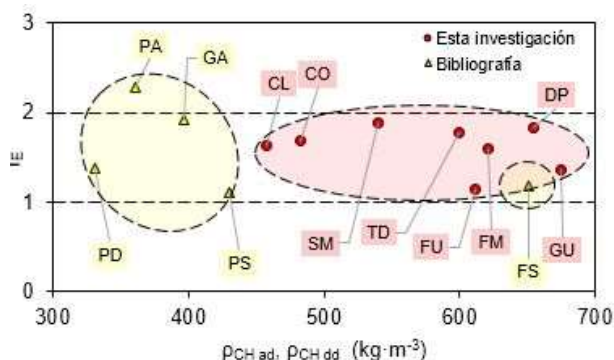


Fig. 4. Comparativo de los índices elásticos (I_E). Fuente: Autores y [18, 24, 25]

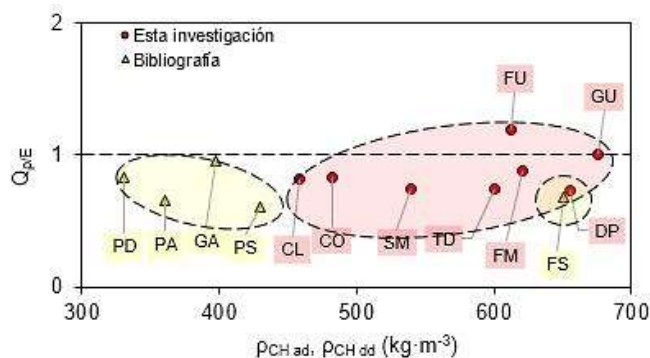


Fig. 5. Comparativo de los índices de calidad ($Q_{p/E}$). Fuente: autores y [18, 24, 25]

En comparación con la madera sin densificar, las características físicas y mecánicas de las ocho maderas densificadas mejoraron. Los indicadores sugieren que el tratamiento empleado aumenta la densidad de las maderas, por lo que puede ampliar sus perspectivas de uso. Sin embargo, los resultados de la investigación son particulares a las maderas densificadas con el tratamiento termo-mecánico utilizado en esta investigación. Para prospectar el potencial de densificado se recomiendan estudios sobre los cambios en la anatomía de la madera e identificar en qué medida se modifican sus propiedades físicas y químicas.

Conclusiones

El densificado objetivo del tratamiento de 30 % fue eficiente para densificar madera de *C. lindleyi*, *C. odorata*, *S. macrophylla*, *T. donnell-smithii*, *F. uhdei*, *F. mexicana*, *D. palo-escrito* y *G. ulmifolia*. Igualmente, el coeficiente de densificado aplicado a las maderas fue suficiente para lograr madera con una densidad uniforme sin detrimento de su estructura material. Las ocho maderas estudiadas se comportaron de manera favorable al proceso de densificado diseñado expreso para esta investigación. Como resultado del tratamiento, se incrementan las densidades aparentes y los módulos de elasticidad. Con excepción de *F. uhdei* y *G. ulmifolia*, las velocidades de onda aumentan igualmente en la madera densificada.

Referencias

- Macias N, Knowles C, Kamke F, et al. Commercialization Potential of Viscoelastic Thermal Compressed Wood: Insights from the US Forest Products Industry. *Forest Prod J*. 2011;61(7):500-509. DOI: 10.13073/0015-7473-61.7.500
- Sandberg D, Haller P, Navi P. Thermo-hydro and thermo-hydro-mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products. *Wood Mater Sci Eng*. 2013;8(1):64-88. DOI: 10.1080/17480272.2012.751935
- Welzbacher CR, Wehsener J, Rapp AO, et al. Thermo-mechanical densification combined with thermal modification of Norway spruce (*Picea abies* Karst) in industrial scale. Dimensional stability and durability aspects. *Holz Roh Werkst*. 2008;66:39-49. DOI: 10.1007/s00107-007-0198-0
- Navi P, Heger F. Combined Densification and Thermo-Hydro-Mechanical Processing of Wood. *MRS Bull*. 2004;29(5):332-336. DOI: 10.1557/mrs2004.100
- Navi P, Girardet F. Effects of thermo-hydro-mechanical treatment on the structure and properties of wood. *Holzforschung*. 2000;54(3):287-293. DOI: 10.1515/HF.2000.048
- Standfest G, Kutnar A, Plank B, et al. Microstructure of viscoelastic thermal compressed (VTC) wood using computed microtomography. *Wood Sci Technol*. 2013;47(1): 121-139. DOI: 10.1007/s00226-012-0496-5
- Miki T, Sugimoto H, Kanayama K. Deformation Behavior of Natural Wood Having Hierarchical Structure Under a Compression State. *MRS Bull*. 2011;1304: MRSf10-1304-z10-05. DOI: 10.1557/opl.2011.609
- Haller P, Wehsener J. Festigkeitsuntersuchungen an Fichtenpressholz (FPH). *Holz Roh Werkst*. 2004;62(6):452-454. DOI: 10.1007/s00107-004-0516-8
- Dogu D, Bakir D, Tuncer FD, et al. Microscopic investigation of defects in thermally compressed poplar wood panels. *Maderas-Cienc Tecnol*. 2016;18(2):337-348. DOI:10.4067/S0718-221X2016005000031
- Liang, S, Fu F. Comparative study on three dynamic modulus of elasticity and static modulus of elasticity for Lodgepole pine lumber. *J For Res*. 2007;18(4):309-312. DOI: 10.1007/s11676-007-0062-4
- Chauhan S, Sethy A. Differences in dynamic modulus of elasticity determined by three vibration methods and their relationship with static modulus of elasticity. *Maderas-Cienc Tecnol*. 2016;18(2):373-382. DOI:10.4067/S0718-221X2016005000034
- Dackermann U, Elsener R, Li J, Crews K. A comparative study of using static and ultrasonic material testing methods to determine the anisotropic material properties of wood. *Constr Build Mater*. 2016;102:963-976. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.195
- Ilic J. Dynamic MOE of 55 species using small wood beams. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 2003;61(3):167-172. DOI: 10.1007/s00107-003-0367-8
- Hasegawa M, Takata M, Matsumura J, et al. Effect of wood properties on within-tree variation in ultrasonic wave velocity in softwood. *Ultrasonics*. 2011;51(3):296-302. DOI: 10.1016/j.ultras.2010.10.001
- Gonçalves R, Trinca A.J, Pellis B.P. Elastic constants of wood determined by ultrasound using three geometries of specimens. *Wood Sci Technol*. 2014;48(2):269-287. DOI: 10.1007/s00226-013-0598-8
- Blomberg J, Persson B, Blomberg A. Effects of semi-isostatic densification of wood on the variation in strength properties with density. *Wood Sci Technol*. 2005;39(5):339-350. DOI: 10.1007/s00226-005-0290-8
- Sandberg D, Navi P. Introduction to Thermo-hydro-mechanical (THM) Wood Processing. School of Technology and Design Reports. No. 30. Vaxjo University, Vaxjo, Sweden; 2007. [Citado: 12 de marzo de 2020] Disponible en: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:997954/FULLTEXT01.pdf>

18. Skyba O, Schwarze F, Niemz P. Physical and mechanical properties of thermo-hygro-mechanically (THM)-densified wood. *Wood Res.* 2009;54(2):1-18.
19. Sotomayor Castellanos JR. Densificado higro-termo-mecánico de madera de *Gyrocarpus americanus*. Pruebas de higroscopía. *Investigación e Ingeniería de la Madera.* 2017;13(2) 4-21.
20. Sotomayor Castellanos JR, Ramírez Pérez M. Densidad y características higroscópicas de maderas mexicanas. Base de datos y criterios de clasificación. *Investigación e Ingeniería de la Madera.* 2013;9(3):3-29.
21. Tamarit JC, López LJ. Xilotecología de los principales árboles tropicales de México. Puebla, Pue., México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias; 2007. [Citado: 5 de abril de 2020] Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/339936736_XILOTECNOLOGIA_DE_LOS_PRINCIPALES_ARBOLES_TROPICALES_DE_MEXICO
22. Silva JA, Fuentes FJ, Rodríguez PA, et al. Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas. Zapopan, Jalisco, México: Comisión Nacional Forestal; 2010. [Citado: 12 de marzo de 2020] Disponible en: http://centro.paot.org.mx/documentos/conafor/catalogo_madera_s.pdf
23. Sotomayor Castellanos JR. *Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas*. Morelia, Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; 2015. [Citado: 12 de marzo de 2020] Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/276841418_Banco_FITECMA_de_caracteristicas_fisico-mecanicas_de_maderas_Mexicanas
24. Ulker O, Imirzi O, Burdurlu E. The Effect of Densification Temperature on Some Physical and Mechanical Properties of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *BioResources.* 2012;7(4):5581-5592. DOI: 10.15376/biores.7.4.5581-5592
25. Sotomayor Castellanos JR. Densificado higro-termo-mecánico de madera de *Gyrocarpus americanus*. Evaluación por ultrasonido. *Revista de Investigaciones Agropecuarias.* 2017;43(2):156-164.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

Javier Ramón Sotomayor Castellanos. <https://orcid.org/0000-0002-1527-8801>

Participó en el diseño de las tareas de investigación, procesamiento de datos experimentales, así como, en la elaboración, revisión y aprobación final del artículo.

Koji Adachi. <https://orcid.org/0000-0002-9962-5750>

Participó en la ejecución de trabajos experimentales, revisión y aprobación final del artículo.

Ryuichi Iida. <https://orcid.org/0000-0001-7564-7616>

Apoyó en la revisión del estado del arte. Trabajó en la recolección de los datos y en la revisión y redacción final del trabajo

Tomoyuki Hayashi. <https://orcid.org/0000-0001-6276-184X>

Participó en el diseño de las tareas de investigación, procesamiento de datos experimentales, así como, en la elaboración, revisión y aprobación final del artículo.