

Densificado higro-termo-mecánico de madera de *Gyrocarpus americanus*. Evaluación por ultrasonido

SOTOMAYOR CASTELLANOS, J.R.¹

RESUMEN

El aumento artificial de la densidad de la madera incrementa su resistencia mecánica y mejora sus propiedades higroscópicas. La investigación tuvo como objetivo densificar madera de *G. americanus* y evaluar el efecto del tratamiento en la densidad, la velocidad del ultrasonido y el módulo dinámico. Se realizaron pruebas de ultrasonido antes y después del tratamiento de densificado. Se diseñó un experimento de diferencias de medias entre las tres variables de respuesta medidas antes y después del tratamiento. El tratamiento se consideró el factor de variación. Para evaluar el tratamiento de densificado se calcularon el coeficiente de densificado y los índices de densificado, elástico y de calidad. Sus magnitudes fueron próximas a las reportadas en la bibliografía. El tratamiento de densificado incrementó la densidad de la madera y su módulo dinámico. En cambio, el densificado no modificó la velocidad del ultrasonido. Si se aumenta la densidad de la madera artificialmente, se puede incrementar la magnitud del módulo dinámico, lo que probablemente valorice especies de baja densidad como lo es *G. americanus*.

Palabras clave: módulo dinámico, coeficiente de densificado, índice de densificado, índice de calidad, índice elástico.

ABSTRACT

The artificial increase of wood density augments its mechanical strength and improves its hygroscopic properties. The goal of the research was to densify *Gyrocarpus americanus* wood and to assess the effect of the higro-thermo-mechanical treatment in the wood density, the speed of ultrasound and the dynamic modulus. Ultrasound tests were performed before and after treatment densified. It was designed an experiment of differences of means between the variables of response and the derivative, before and after treatment. The treatment was considered the variation factor. To assess the treatment of densification they were calculated the coefficient of densification, the elastic index, the index of densification and the index of quality. Their magnitudes were close to those reported in the literature. The treatment increases the densified wood density and its dynamic module. Instead the densified does not change the speed of ultrasound. If the density of the wood is increased artificially, it can increase the magnitude of dynamic modulus, which probably valorize low density species as is *G. americanus*.

Keywords: Dynamic modulus, Coefficient of densification, Elastic index, Index of densification, Index of quality.

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México. Correo electrónico: madera999@yahoo.com

INTRODUCCIÓN

Las motivaciones contemporáneas para modificar la densidad de la madera son mejorar sus características tecnológicas naturales y desarrollar productos sustentables con valor agregado (Kamke, 2006; Macias *et al.*, 2011; Sandberg y Kutnar, 2016). En este sentido, la llegada al mercado de madera de baja densidad, proveniente de plantaciones comerciales de rápido crecimiento y la incorporación de madera de especies de nuevo aprovechamiento, igualmente de densidad baja, ha suscitado el desarrollo de procesos de producción e iniciativas de investigación acerca del comportamiento de la madera con densidad modificada (Blomberg *et al.*, 2005; Popescu *et al.*, 2014).

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 (Boonstra y Blomberg, 2007; Macias *et al.*, 2011; Lesar *et al.*, 2013). No obstante, si la madera densificada se expone a la humedad, tiende a recuperar su forma original. Este fenómeno de recuperación geométrica es resultado principalmente de la liberación de esfuerzos incorporados durante el proceso de deshumidificado, calentado y deformado, propios del densificado (Navi y Heger, 2004).

El densificado de madera es el tratamiento por el cual su densidad es incrementada al reducir los espacios vacíos en los lúmenes del tejido leñoso. Este procedimiento se realiza por compresión mecánica, con impregnación de los lúmenes celulares con fluidos, o la combinación de compresión e impregnación (Kutnar y Šernek, 2007). Cuando se utilizan agua y calor para facilitar la compresión, se hace referencia al densificado higo-termo-mecánico (Navi y Girardet, 2000) del cual se ocupa esta investigación.

El tratamiento de densificado higo-termo-mecánico consiste en tres etapas: la primera es el suavizado de la pared

celular con la participación de humedad y calor; la segunda es la compresión perpendicular a la dirección de la fibra; la tercera consiste en fijar de manera permanente la deformación mediante el enfriado y secado de la madera. Los parámetros más importantes del tratamiento son la temperatura de suavizado, el tiempo de compresión y el nivel de deformación aplicados (Kutnar y Šernek, 2007; Li *et al.*, 2013; Rautkari *et al.*, 2013).

El ultrasonido es útil para observar el efecto de un tratamiento en una probeta de madera y poder observar su respuesta sin modificar de manera substancial su integridad física (Brémaud *et al.*, 2011). De tal suerte, que el efecto de un tratamiento, en este caso de densificado, puede ser evaluado en una muestra común de madera antes y después del tratamiento.

Existe poca información tecnológica de la madera de *Girocarpus americanus* Jacq. y se le estigma como una especie con pocas perspectivas de empleo a nivel industrial (Cordero y Boshier, 2003). El Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas (Sotomayor, 2015) reporta una densidad de 391 a 410 kg/m³ y un módulo dinámico por ultrasonido entre 5596 y 7884 MPa. No se encontraron trabajos publicados que estudien el efecto del densificado sobre el módulo dinámico de la madera *G. americanus* evaluado por ultrasonido.

El objetivo de la investigación fue densificar madera de *G. americanus* y evaluar el efecto del tratamiento en la densidad, la velocidad del ultrasonido y el módulo dinámico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se recolectaron piezas aserradas de madera de *G. americanus* en el estado de Michoacán, México, y se prepararon 35 probetas con sección de 0.02 m x 0.02 m de sección

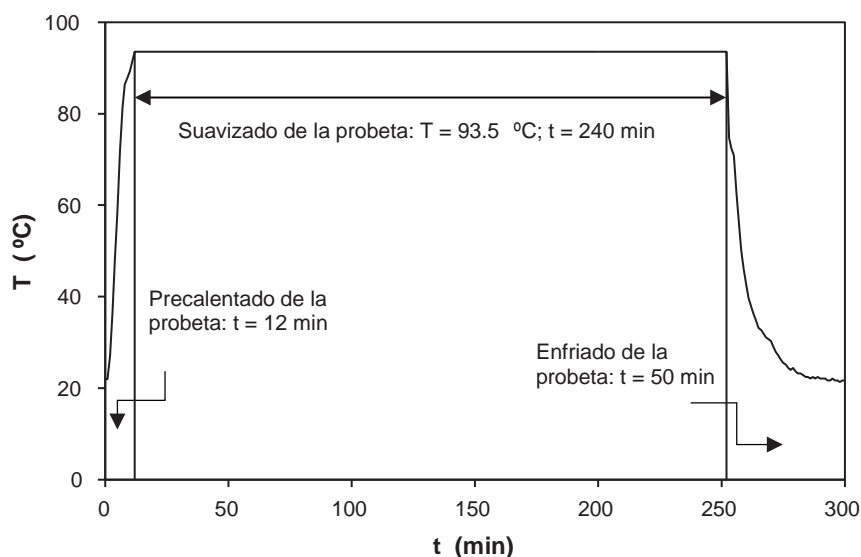


Figura 1. Diagrama temperatura-tiempo del suavizado y prensado de la madera.

Fuente de información: elaborado para la presente edición.

transversal y de 0.32 m de longitud, adecuando la norma ISO 3129:2012 (International Organization for Standardization, 2012). Las probetas se elaboraron solamente con madera de albura y se revisó que estuviesen libres de anomalías de crecimiento. Las probetas estuvieron orientadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal respecto al plano leñoso. La madera se acondicionó durante 24 meses en una cámara con una temperatura de 20 °C (± 1 °C) y una humedad relativa del aire de 65 % ($\pm 2\%$) hasta que alcanzó un peso constante.

La estrategia de investigación consistió en determinar antes y después del tratamiento de densificado, la densidad de la madera y realizar pruebas de ultrasonido igualmente antes y después del densificado. Posteriormente, fueron evaluados el coeficiente de densificado y los índices de densificado, elástico y de calidad. A continuación, los parámetros se identifican con el subíndice "us" por ser derivados de pruebas de ultrasonido.

El tratamiento de densificado consistió en hidratar la madera en un baño de agua con una temperatura de 20 °C durante 72 horas. Posteriormente, las probetas se suavizaron durante 4 horas en un baño de agua caliente con una temperatura de 93,5 °C. El diagrama de temperatura-tiempo se muestra en la figura 1.

Inmediatamente después, se procedió al prensado de dos probetas a la vez, empleando un dispositivo de densificado fabricado *ad-hoc* (figura 2) el cual se posicionó en una máquina universal de pruebas mecánicas *Tinius-Olsen*®. La velocidad de desplazamiento de la carga fue de 1 mm/min. El tiempo de cerrado del dispositivo de densificado fue de 15 min. Durante las pruebas, se registró el diagrama carga-desplazamiento y la prueba terminó cuando se alcanzó la tasa de compresión objetivo de 56%.

El dispositivo de densificado consistió en dos placas de acero dulce con orificios para colocar pernos, los cuales sirvieron para mantener la deformación de las probetas en

las etapas de moldeado y estabilizado. En la placa inferior se colocaron barras circundantes de 0,006 m de espesor por 0,013 m de base. Las barras funcionaron como soporte y control de la deformación cuando esta alcanzó la tasa de compresión objetivo. Las barras ayudaron a sostener constante la deformación de las probetas y a conservar su temperatura durante las etapas de comprimido, moldeado y estabilizado.

A continuación, las probetas se moldearon durante 24 horas manteniéndolas prensadas con el dispositivo de densificado al interior de un horno de aire seco con una temperatura de 80 °C. Finalmente, las probetas junto con las placas se estabilizaron durante 60 días en una cámara de acondicionamiento con una temperatura de 20 °C (± 1 °C) y con una humedad relativa del aire de 65 % ($\pm 2\%$), hasta que su peso fue constante. Una vez la madera densificada y acondicionada, se procedió a realizar una segunda ronda de pruebas de ultrasonido.

El coeficiente de densificado se calculó con la fórmula (Blomberg *et al.*, 2005):

$$\lambda_{us} = \left(\frac{\rho_{ad} - \rho_{dd}}{\rho_{ad}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Donde:

λ_{us} = Coeficiente de densificado (%)

ρ_{ad} = Densidad de la probeta antes densificado (kg/m³)

ρ_{dd} = Densidad de la probeta después densificado (kg/m³)

El contenido de humedad al momento del ensayo (CH) se determinó con un grupo complementario de 35 probetas por la diferencia de pesos de acuerdo a la norma ISO 13061-2:2014 antes y después del densificado. La determinación de la densidad al momento del ensayo (ρ_{CH}) se calculó con la relación entre el peso al momento de las pruebas y el volumen correspondiente adecuando la norma ISO 13061-1:2014.

Las pruebas de ultrasonido consistieron en suministrar un impulso ultrasónico en transmisión directa a lo largo de la probeta (dirección longitudinal) con el aparato marca *concept-bois-technologie*, modelo *Sylvatest* (22 kHz de frecuencia de emisión), Saint-Sulpice, Suiza. (figura 3). De esta forma se midió el tiempo de transmisión de la onda en la dirección longitudinal. Con la longitud de las probetas y el tiempo de transmisión del ultrasonido, se calculó la velocidad de transmisión del ultrasonido.

El módulo dinámico se calculó con la fórmula (Pellerin y Ross, 2002):

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

Donde:

E_{us} = Módulo dinámico (MPa)

v_{us} = Velocidad del ultrasonido (m/s)

ρ_{CH} = Densidad de la madera a un contenido de humedad CH (kg/m³)

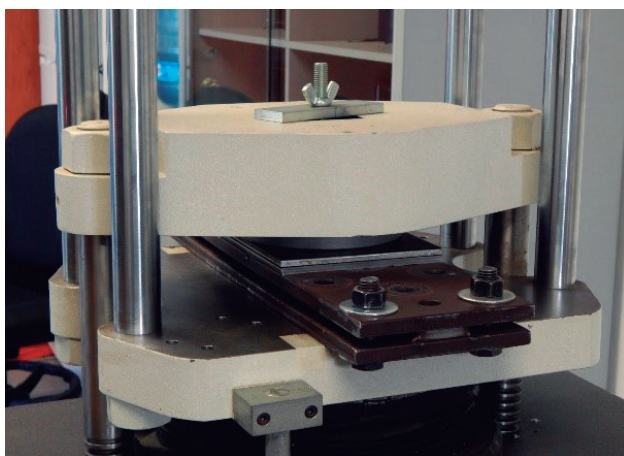


Figura 2. Dispositivo de densificado en la máquina universal.
Fuente de información: elaborado para la presente edición.

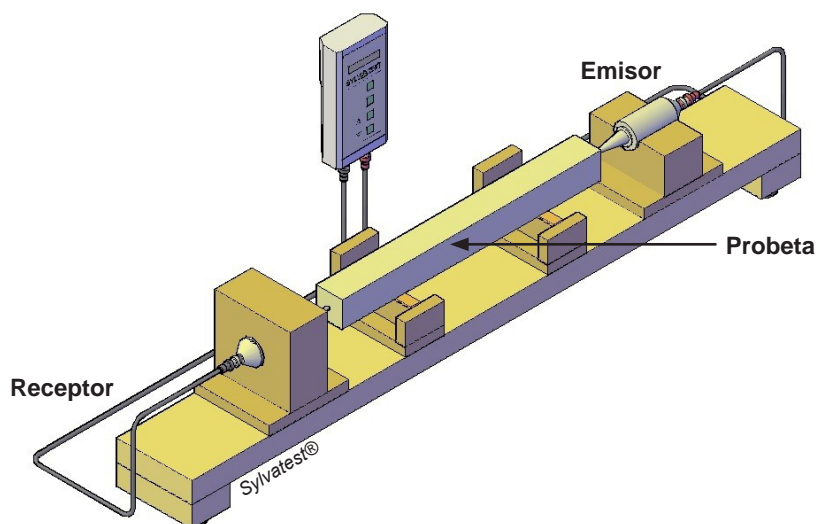


Figura 3. Dispositivo para pruebas de ultrasonido.
 Fuente de información: elaborado para la presente edición.

Para la determinación del módulo dinámico antes y después de densificado, empleando la ecuación (2), se utilizaron las densidades correspondientes antes y después densificado.

Para fines de análisis de la calidad del densificado, el índice de densificado fue calculado con la fórmula (Blomberg *et al.*, 2005):

$$I_p = \frac{\rho_{dd}}{\rho_{ad}} \tag{3}$$

Donde:

I_p = índice de densificado

ρ_{dd} = Densidad después de densificado (kg/m³)

ρ_{ad} = Densidad antes de densificado (kg/m³)

El índice elástico fue calculado con la fórmula (Blomberg *et al.*, 2005):

$$I_E = \frac{E_{us\ dd}}{E_{us\ ad}} \tag{4}$$

Donde:

I_E = Índice elástico

$E_{us\ dd}$ = Módulo dinámico después de densificado (Pa)

$E_{us\ ad}$ = Módulo dinámico antes de densificado (Pa)

El índice de calidad fue calculado con la fórmula (Blomberg *et al.*, 2005):

$$Q_p = \frac{I_p}{I_E} \tag{5}$$

Donde:

Q_p = Índice de calidad

I_p = índice de densificado

I_E = Índice elástico

Diseño experimental

Las variables de respuesta fueron la densidad y la velocidad del ultrasonido. El módulo dinámico, el coeficiente de densificado y los índices de densificado, elástico y de calidad, fueron variables derivadas. Para todas ellas, se calcularon los estadísticos sesgo y el apuntamiento. Cuando las pruebas de normalidad verificaron la normalidad de la distribución de cada muestra, se calcularon la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

Para las variables densidad, velocidad del ultrasonido y módulo dinámico se diseñó un experimento siguiendo las recomendaciones de (Gutiérrez y De la Vara, 2012). El experimento consistió en pruebas *t* de Student para muestras independientes de diferencias de medias para un nivel de confianza de 95%. El tratamiento de densificado se consideró el factor de variación. La hipótesis nula $H_0: \bar{X}_1 - \bar{X}_2 = 0$ se contrastó con la hipótesis alterna $H_A: \bar{X}_1 - \bar{X}_2 \neq 0$. Los sub-índices 1 y 2 representan el valor de las variables para cada una de los dos estados de la madera: antes densificado y después densificado.

Adicionalmente, para las variables velocidad de onda y módulo dinámico se calcularon las regresiones lineales y sus coeficientes de determinación, en función de la den-

sidad antes del densificado y después del densificado. Se efectuaron pruebas con 35 réplicas (probetas por especie), totalizando 70 muestras observadas para cada una de las variables de respuesta. Los cálculos estadísticos fueron realizados con el programa Statgraphics®.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La recopilación de los datos de los diagramas carga-desplazamiento registrados durante el prensado de las 35 probetas, se presenta en la figura 4 en forma de relación esfuerzo-deformación. Su perfil es semejante al obtenido nu-

méricamente por Aimene y Nairn (2015) empleando un modelo material de comportamiento hiper-elástico-plástico. Los resultados mostrados en la figura 4 son igualmente cercanos a las magnitudes del esfuerzo y la deformación reportados por Kutnar y Šernek (2007) y Sandberg y Navi (2007). Como existen valores iguales o similares, por un efecto de escala, aparentemente en el gráfico no se muestran todos los datos. Los puntos negros corresponden a 330 mediciones.

En la figura 4 se observa una zona de deformación elástica que corresponde a las pruebas normalizadas para caracterizar el comportamiento elástico de la madera. Enseguida se percibe una zona plástica, y finalmente, se dis-

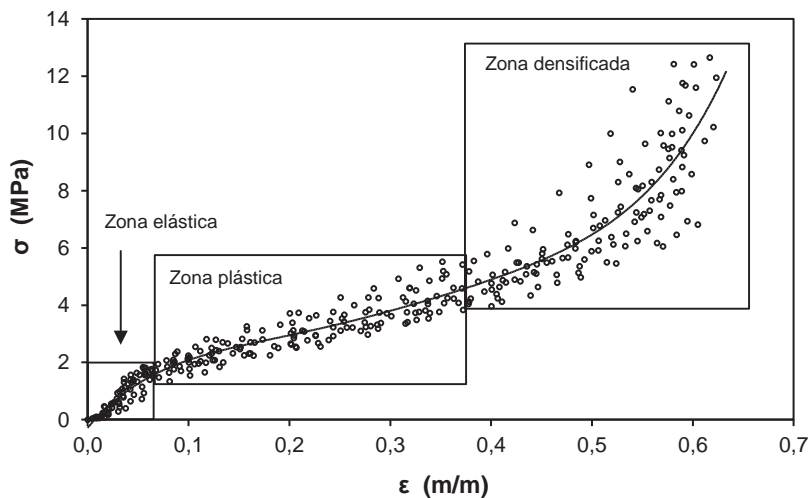


Figura 4. Relación esfuerzo-deformación del densificado.

Fuente de información: elaborado para la presente edición.

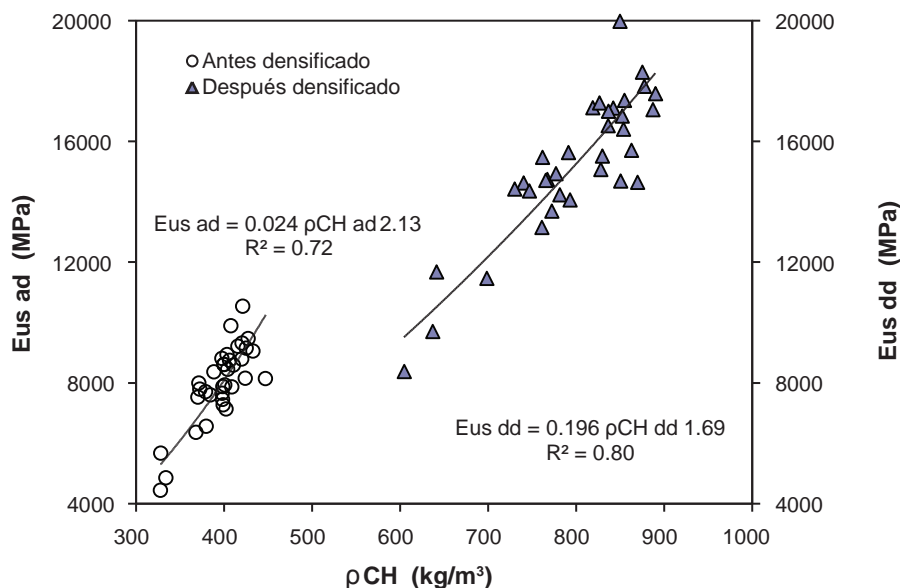


Figura 5. Dispersión del módulo dinámico en función de la densidad.

Fuente de información: elaborado para la presente edición.

Variable de respuesta	Sesgo	Apuntamiento
ρ_{CH} ad	-1.21012	1.15627
v_{us} ad	-1.1661	1.74515
E_{us} ad	-1.09479	1.50668
ρ_{CH} dd	-1.42625	0.704747
v_{us} dd	-1.08587	1.03204
E_{us} dd	-1.32714	1.47169
λ_{us}	-0.188572	-0.488318
I_p	0.190428	-0.564011
I_E	0.866693	-0.550436
Q_q	1.09089	0.485307

Tabla 1. Sesgo y apuntamiento de las variables de respuesta.

Fuente de información: elaborado para la presente edición.

CH = Contenido de humedad; ρ_{CH} = Densidad; v_{us} = Velocidad del ultrasonido; E_{us} = Módulo dinámico; λ_{us} = Coeficiente de densificado; I_p = Índice de densificado; I_E = Índice elástico; Q_q = Índice de calidad; ad = Antes densificado; dd = Después densificado.

tingue la zona densificada, en la cual la deformación es permanente. El esfuerzo aplicado en la zona densificada es superior al esfuerzo en el límite elástico y provoca una deformación ocasionada por el reacomodo y compactado del tejido celular de la madera, de tal forma, que se incrementa la relación peso/volumen y se densifica la madera.

El tratamiento de densificado en la madera de *G. americanus* alcanzó un coeficiente de densificado de 50,3% (tabla 2), valor intermedio para los coeficientes reportados por Skyba *et al.* (2009) quienes densificaron madera de *Picea abies* a un coeficiente de densificado de 70% y para *Fagus sylvatica* de 45%. Los autores opinan que el coeficiente de densificado apropiado es particular para cada especie y es resultado de la temperatura, de la humedad y del tiempo utilizados en el tratamiento.

Los resultados de las pruebas de sesgo y apuntamiento verificaron la normalidad de las distribuciones de las variables de respuesta (tabla 1). Los resultados de las pruebas

de diferencias de medias verificaron el efecto del tratamiento de densificado sobre la densidad de madera ($P < 0,0001$, $\alpha = 0,05$) y el módulo dinámico ($P < 0,0001$, $\alpha = 0,05$) de *G. americanus*. Sin embargo, el densificado no modificó la velocidad del ultrasonido ($P = 0,0691$, $\alpha = 0,05$).

La magnitud del contenido de humedad, antes y después del densificado, de la madera de *G. americanus* varió 4,2% y sus coeficientes de variación se diferenciaron 1,2% (tabla 2). De tal forma, que se consideró que este parámetro fue casi constante en las probetas y no influyó en los resultados.

Después del densificado, la densidad de la madera se incrementó 101,5%; la velocidad disminuyó 2,5% y el módulo dinámico aumentó 91,8% (tabla 2). Este argumento coincide con las conclusiones reportadas por Ulker *et al.* (2012) quienes densificaron madera de *Pinus sylvestris* ($\rho_{CH} = 430$ kg/m³, CH = 12%) y reportan incrementos en la densidad de la madera de 92,9% y en su módulo de elasticidad estático de 114%. Igualmente, este corolario concuerda con los resultados de Fang *et al.* (2012), quienes densificaron madera de *Populus tremuloides* ($\rho_{CH} = 388$ kg/m³, CH = 12%) y *Populus maximowiczii* × *Populus balsamifera* ($\rho_{CH} = 3484$ kg/m³, CH = 12%) y reportan que su módulo de elasticidad estático aumentó 60% cuando se densificó la madera.

Las magnitudes de los índices de densificado, elástico y de calidad (tabla 3) fueron próximos a los reportados en la bibliografía (Kutnar *et al.*, 2008; Skyba *et al.*, 2009; Ulker *et al.*, 2012). El índice de densificado representó la ganancia en la magnitud de la densidad de la madera y el índice elástico interpretó el incremento de los módulos dinámicos después y antes del densificado. Ambos indicadores son proporcionales para la madera de *G. americanus* (tabla 3). La bibliografía (Kutnar *et al.*, 2008; Skyba *et al.*, 2009; Ulker *et al.*, 2012) reporta que estos parámetros son diferentes para cada especie y según las condiciones de ensayo en cada tratamiento.

Por su parte, el índice de calidad combina la ganancia entre la densidad y el módulo dinámico. Un paradigma en ciencias, ingeniería y tecnología de la madera propone que el módulo de elasticidad de la madera es proporcional a su densidad (Niklas y Spatz, 2010). Si se aumenta la densidad de la madera artificialmente, se puede inferir una ganancia

	CH (%)	ρ_{CH} (kg/m ³)	v_{us} (m/s)	E_{us} (MPa)	CH (%)	ρ_{CH} (kg/m ³)	v_{us} (m/s)	E_{us} (MPa)	λ_{us} (%)
	Antes densificado				Después densificado				
\bar{X}	12.21	397	4476	8012	11.7	800	4366	15365	50.3
σ	1.41	27.73	273	1295	0.95	73.14	224	2534	1.94
CV	12.0	6.99	6.11	16.16	10.8	9.15	5.13	16.49	3.85

Tabla 2. Contenido de humedad, densidad, velocidad del ultrasonido, módulo dinámico, antes y después densificado de madera de *G. americanus*.

Fuente de información: elaborado para la presente edición.

CH = Contenido de humedad; ρ_{CH} = Densidad; v_{us} = Velocidad del ultrasonido; E_{us} = Módulo dinámico; λ_{us} = Coeficiente de densificado; = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en por ciento.

Esta investigación (2016)	I_p	I_E	Q_q
<i>Gyrocarpus americanus</i>			
\bar{X}	2.01	1.92	0.95
μ	0.079	0.085	0.044
CV	3.90	4.40	4.57
<i>Populus deltoides x Populus trichocarpa</i>			
Kutnar et al. (2008)	1.66	1.38	0.83
<i>Picea abies</i>			
Skyba et al. (2009)	3.52	2.29	0.65
<i>Fagus sylvatica</i>			
Skyba et al. (2009)	1.75	1.19	0.68
<i>Pinus sylvestris</i>			
Ulker et al. (2012)	1.84	1.11	0.61

Tabla 3. Índices de densificado, elástico y de calidad para madera de *G. americanus* y resultados de la bibliografía.

Fuente de información: elaborado para la presente edición.

I_p = Índice de densificado; I_E = Índice elástico; Q_q = Índice de calidad; \bar{X} = Media; μ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en por ciento.

cia en la magnitud del módulo dinámico. Este argumento probablemente ayude para la valorización de especies de baja densidad, como lo es *G. americanus* (Sotomayor y Ramírez, 2014) y la aceptación de madera proveniente de plantaciones comerciales de rápido crecimiento. De esta

forma, el densificado de la especie en estudio puede ayudar a cambiar su baja apreciación como material en la industria de la madera, de acuerdo con Cordero y Boshier (2003).

Después del tratamiento, el coeficiente de variación de la densidad de la madera aumentó 31%, el de la velocidad del ultrasonido disminuyó 16% y el del módulo dinámico aumentó 2% (tabla 2). De aquí se deriva que la densidad de la madera es más sensible al tratamiento, en comparación con la velocidad del ultrasonido. Por su parte, el módulo dinámico considerada variable derivada (fórmula 2) sintetiza la variabilidad de la densidad y de la velocidad del ultrasonido. En este caso de estudio, se experimentó solo una especie. Sin embargo, cada probeta mostró diferente densidad. Esta característica es un indicador de la variación de la estructura anatómica de la madera (Hofstetter y Gamstedt, 2009) y de la 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).

La dispersión de las velocidades del ultrasonido antes y después del densificado en función de la densidad de la madera fue muy amplia y con bajos coeficientes de determinación de regresiones de modelos exponenciales para un nivel de significación del 95% (figura 5). Resultado que sugiere que la densidad de la madera sin densificar y densificada no es un buen predictor de la velocidad del ultrasonido. En contraste, las regresiones de los módulos dinámicos antes y después del densificado, en función de la densidad de la madera (figura 6), exhibieron altos coeficientes de determinación, resultados que confirman a la densidad de la madera como el parámetro físico que controla su resistencia mecánica (Niklas y Spatz, 2010).

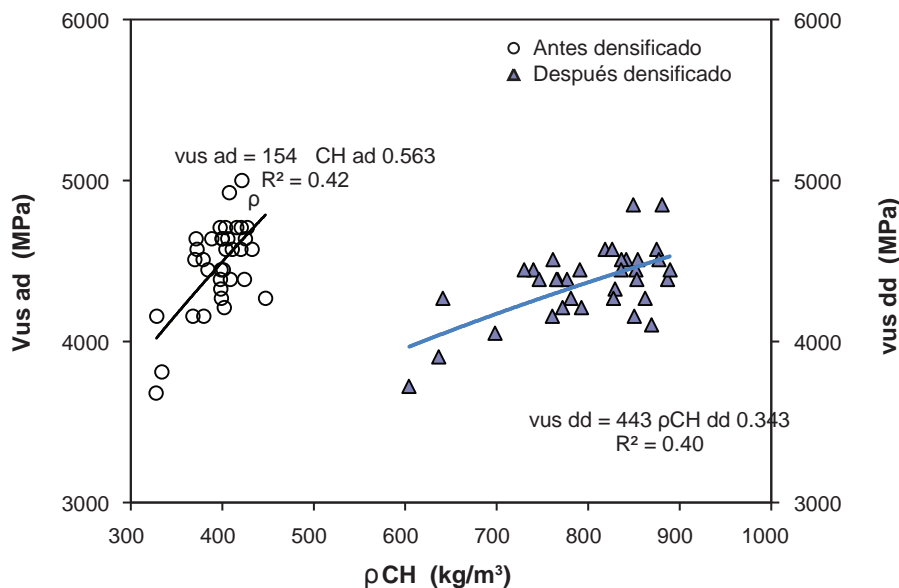


Figura 6. Velocidad del ultrasonido en función de la densidad.

Los valores promedio de los coeficientes de variación obtenidos para las características investigadas fueron compatibles con los reportados en la literatura con experimentos similares desarrollados en madera de *G. americanus* (Sotomayor, 2014).

CONCLUSIONES

Se densificó madera de *G. americanus*. Los índices de calidad del tratamiento higro-termo-mecánico permiten concluir que es eficaz para aumentar la densidad de la madera.

El densificado de madera de *G. americanus* incrementó su densidad y su módulo dinámico. En cambio, la velocidad del ultrasonido no varió significativamente entre la madera sin densificar y densificada.

En prospectiva, la madera de *G. americanus* es potencialmente candidata al tratamiento de densificado para mejorar, la densidad de la madera y el módulo dinámico.

AGRADECIMIENTOS

La investigación fue patrocinada por el Consejo Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Michoacán, México y por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

BIBLIOGRAFÍA

- AIMENE, Y.E.; 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.
- BRÉMAUD, I.; GRIL, J.; THIBAUT, B. 2011. Anisotropy of wood vibrational properties: dependence on grain angle and review of literature data. *Wood Science and Technology* 45(4): 735-754.
- BLOMBERG, J.; PERSSON, B.; 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.
- BOONSTRA, M.J.; BLOMBERG, J. 2007. Semi-isostatic densification of heat-treated Radiata pine. *Wood Science and Technology* 41(7): 607-617.
- CORDERO, J.; BOSHIER, D.H. 2003. Árboles de Centroamérica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, p. 1091.
- GUTIÉRREZ PULIDO, H.; DE LA VARA SALAZAR, R. 2011. Análisis y diseño de experimentos. McGraw-Hill. México, p. 564.
- HOFSTETTER, K.; GAMSTEDT, E.K. 2009. Hierarchical modeling of microstructural effects on mechanical properties of wood. A review. *Holzforschung* 63(2): 130-138.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). 2012. ISO 3129:2012. Wood-Sampling methods and general requirements for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization. Bruselas, p. 9.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). 2014a. ISO 13061-1:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization. Bruselas, p. 4.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). 2014b. ISO 13061-2:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization. Bruselas, p. 5.
- KAČÍKOVÁ, D.; KAČÍK, F.; ČABALOVÁ, I.; ĐURKOVIČ, J. 2013. Effects of thermal treatment on chemical, mechanical and colour traits in Norway spruce wood. *Bioresource Technology* 144: 669-674.
- KAMKE, F.A. 2006. Densified Radiata pine for structural composites. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 8(2): 83-92.
- KUTNAR, A.; KAMKE, F.A. 2013. Transverse compression behavior of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) in saturated steam environment. *European Journal of Wood Products* 71(4): 443-449.
- KUTNAR, A.; KAMKE, F.A.; SERNEK, M. 2008. The mechanical properties of densified VTC wood relevant for structural composites. *Holz Roh Werkst* 66(6): 439-446.
- KUTNAR, A.; KAMKE, F.A.; SERNEK, M. 2009. Density profile and morphology of viscoelastic thermal compressed wood. *Wood Science and Technology* 43(1): 57-68.
- KUTNAR, A.; ŠERNEK, M. 2007. Densification of wood. *Zbornik gozdarstva in lesarstva* 82: 53-62.
- LESAR, B.; HUMAR, M.; KAMKE, F.A.; KUTNAR, A. 2013. Influence of the thermo-hydro-mechanical treatments of wood on the performance against wood-degrading fungi. *Wood Science and Technology* 47(5): 977-992.
- LI, L.; GONG, M.; YUAN, N.; LI, D. 2013. An Optimal Thermo-Hydro-Mechanical Densification (THM) Process for Densifying Balsam Fir Wood. *BioResources* 8(3): 3967-3981.
- MACIAS, N.; KNOWLES, C.; KAMKE, F.; KUTNAR, A. 2011. Commercialization potential of viscoelastic thermal compressed wood: insights from the US Forest Products Industry. *Forest Products Journal* 61(7): 500-509.
- NAVI, P.; GIRARDET, F. 2000. Effects of thermo-hydro-mechanical treatment on the structure and properties of wood. *Holzfor-schung* 54(3): 287-293.
- NAVI, P.; HEGER, F. 2004. Combined Densification and Thermo-Hydro-Mechanical Processing of Wood. *MRS Bulletin* 29(5): 332-336.
- NIKLAS, K.J.; SPATZ, H.C. 2010. Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density. *American Journal of Botany* 97(10): 1587-1594.
- PELLERIN, R.F.; ROSS, R.J. 2002. *Nondestructive Evaluation of Wood*. Forest Products Society. Madison. 210 p.
- POPESCU, M.C.; LISA, G.; FROIDEVAUX, J.; NAVI, P.; POPESCU, C.M. 2014. Evaluation of the thermal stability and set recovery of thermo-hydro-mechanically treated lime (*Tilia cordata*) wood. *Wood Science and Technology* 48(1): 85-97.
- RAUTKARI, L.; LAINE, K.; KUTNAR, A.; MEDVED, S.; HUGHES, M. 2013. Hardness and density profile of surface densified and thermally modified Scots pine in relation to degree of densification. *Journal of Materials Science* 48(6): 2370-2375.
- SANDBERG, D.; KUTNAR, A. 2016. Thermally modified timber: recent developments in Europe and North America. *Wood and Fiber Science* 48(1): 28-39.
- SANDBERG, D.; NAVI, P. 2007. Introduction to Thermo-hydro-mechanical (THM) Wood Processing. Växjö University. Växjö, p. 177.
- SKYBA, O.; SCHWARZE, F.; NIEMZ, P. 2009. Physical and mechanical properties of thermo-hydro-mechanically (THM)-densified wood. *Wood Research* 54(2): 1-18.

SOTOMAYOR CASTELLANOS, J.R. 2015. Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, p. 69.

SOTOMAYOR CASTELLANOS, J.R. 2014. Caracterización mecánica de la madera con métodos no destructivos. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, p. 339.

SOTOMAYOR CASTELLANOS, J.R.; RAMÍREZ PÉREZ, M. 2014. Características físicas de 12 maderas mexicanas. Investigación e Ingeniería de la Madera 10(1): 4-35.

ULKER, O.; IMIRZI, O.; 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.