

Densidad y módulo dinámico de tres maderas mexicanas impregnadas con boro. Evaluación con vibraciones transversales

Density and dynamic modulus of three Mexican woods impregnated with boron. Evaluation with transverse vibrations

Densidade e módulo dinâmico de três madeiras mexicanas impregnadas com boro Avaliação com vibrações transversais

Javier Ramón Sotomayor Castellanos^{1*}  <https://orcid.org/0000-0002-1527-8801>

Luz Elena Alfonsina Ávila Calderón¹  <https://orcid.org/0000-0003-2646-2142>

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

*Autor para la correspondencia: madera999@yahoo.com

Recibido: 20 de diciembre de 2019.

Aprobado: 20 de marzo de 2020.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar los efectos de las sales de boro en las densidades y en los módulos dinámicos de la madera. Para ello, se trataron cuarenta probetas de *Spathodea campanulata*, *Fraxinus americana* y *Albizia plurijuga* mediante el método de baño caliente-frío en tres grupos con concentraciones de 1 %, 2 %, 3 %, más un grupo de control. Antes y después del tratamiento, se calcularon las densidades de la madera, el contenido de humedad, sus retenciones y se determinaron sus módulos dinámicos con vibraciones transversales. Los valores de las retenciones aumentaron proporcionalmente a la concentración de sales de boro utilizada, pero disminuyeron a medida que las densidades de cada especie variaron. El tratamiento en probetas de pequeñas dimensiones no alteró las densidades de la madera. En cambio, el tratamiento sí modificó los módulos dinámicos determinados con vibraciones transversales. Se confirmó el paradigma en ciencias de la madera que propone la caracterización del comportamiento mecánico de cada especie en particular. Las experiencias se realizaron 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, en Morelia, México.

Palabras clave: *Albizia plurijuga*; baño caliente-frío; *Fraxinus americana*; retención de sales de boro; *Spathodea campanulata*.



ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the effects of boron salts on the physical-mechanical properties of wood. For this, forty specimens of *Spathodea campanulata*, *Fraxinus americana* and *Albizia plurijuga* were treated using the hot-cold bath method in three groups with concentrations of 1 %, 2 %, 3 %, plus a control group. Before and after the treatment, the densities of the wood, the moisture content, its retentions were calculated and its dynamic modules were determined with transverse vibrations. Retention values increased proportionally to the concentration of boron salts used, but decreased as the densities of each species varied. The treatment in small specimens did not alter the densities of the wood. In contrast, the treatment did modify the dynamic modules determined with transverse vibrations. The paradigm in wood sciences that proposes the characterization of the mechanical behavior of each particular species was confirmed. The experiences were carried out in the Wood Mechanics Laboratory of the Faculty of Engineering in Wood Technology of the Michoacana University of San Nicolás de Hidalgo, in Morelia, Mexico

Keywords: *Albizia plurijuga*; boron salt retention; *Fraxinus americana*; hot-cold bath; *Spathodea campanulata*.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos dos sais de boro sobre as densidades e módulos dinâmicos da madeira. Para este fim, quarenta espécimes de *Spathodea campanulata*, *Fraxinus americana* e *Albizia plurijuga* foram tratados pelo método de banho quente-frio em três grupos com concentrações de 1 %, 2 %, 3 %, mais um grupo de controle. Antes e depois do tratamento, foram calculadas as densidades da madeira, o teor de humidade, as suas retenções e os seus módulos dinâmicos com vibrações transversais. Os valores das retenções aumentaram proporcionalmente à concentração de sais de boro utilizados, mas diminuíram à medida que as densidades de cada espécie variaram. O tratamento em pequenos exemplares não alterou as densidades da madeira. No entanto, o tratamento modificou os módulos dinâmicos determinados com vibrações transversais. Foi confirmado o paradigma nas ciências da madeira que propõe a caracterização do comportamento mecânico de cada espécie em particular. As experiências foram realizadas no Laboratório de Mecânica da Madeira da Faculdade de Engenharia Tecnológica da Madeira da Universidade Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, em Morelia, México.

Palavras-chave: *Albizia plurijuga*; banho quente-frio; *Fraxinus americana*; retenção de sais de boro; *Spathodea campanulata*.

INTRODUCCIÓN

El uso cotidiano y las aplicaciones prácticas de la madera requieren de su protección contra el deterioro ocasionado por agentes biológicos y/o físicos (Cruz, 2010; Simsek et al., 2010). El tratamiento con sales de boro es una práctica eficiente para proteger a la madera del ataque de hongos e insectos, así como para disminuir el deterioro ocasionado por su exposición al fuego (Tondi et al., 2012; Keskin y Mutlu, 2017). Esta estrategia se considera una tendencia dentro de la tecnología química sustentable (Simsek y Baysal, 2015; Pizzi, 2016). Sin embargo, es necesario conocer



los efectos de las sustancias preservantes en las propiedades físicas y mecánicas de la madera.

Lahtela *et al.*, (2014) reportan que, en general, las sustancias preservantes no modifican significativamente las propiedades elásticas de la madera. No obstante, los autores hacen notar que existe evidencia empírica respecto a resultados contradictorios. Las diferencias pueden ser atribuidas principalmente a la especie en estudio, al tipo y concentración de preservante utilizado, así como a la temperatura, a la presión y al tiempo del tratamiento.

Percin *et al.*, (2015) informan que el módulo de elasticidad de las maderas de *Quercus petraea* aumenta o disminuye de acuerdo a los tipos de sales de boro empleados en combinación con la intensidad y la duración del tratamiento térmico utilizado. Por su parte, Simsek y Baysal (2015) refieren, para *Fagus orientalis* y *Pinus sylvestris*, el aumento de la densidad de la madera y a la vez la disminución del módulo de elasticidad en función de la especie y en relación con la cantidad de retención de sales de boro, parámetro que varía para cada madera. Estos resultados confirman las observaciones de Kartal *et al.*, (2008), para madera de *Cryptomeria japonica* y de Adanur *et al.*, (2017), para madera de *Fagus orientalis*, quienes consideran que todos los resultados son particulares a cada investigación.

Sotomayor y Villaseñor (2016a) y Sotomayor y Ávila (2019), Sotomayor Castellanos (2016) determinan las retenciones de sales de boro en concentraciones de 1 %, 2 % y 3 %, con en el método baño caliente-frío en diversas maderas. Sus resultados sugieren que la capacidad de las maderas estudiadas para retener sales de boro depende, principalmente, de la especie y disminuye en relación con su densidad.

Sobre las densidades y módulos dinámicos, Sotomayor y Correa (2016), utilizan ondas de esfuerzo para analizar el efecto de las sales de boro con una concentración de 3 %, en *Guazuma ulmifolia*, *Spathodea campanulata* y *Abies religiosa*. Los autores concluyen que estas maderas pueden ser impregnadas con sales de boro con el método baño caliente-frío, sin reducir sus propiedades físicas y mecánicas. Los autores proponen que es necesario caracterizar el comportamiento físico-mecánico de la madera con un enfoque de experimentación de caso por caso de una especie en particular.

Por su parte, Sotomayor y Villaseñor (2016b), usan vibraciones transversales para verificar el efecto de las sales de boro con una concentración de 3 %, en la densidad y el módulo dinámico de las especies *G. ulmifolia*, *S. campanulata* y *A. religiosa*. Sotomayor *et al.*, (2018), hacen lo mismo con las especies y concentración referidas, pero esta vez con pruebas de flexión estática. Los autores concluyen que cada especie se comporta de manera diferente cuando se impregna con sales de boro por el proceso de baño caliente-frío.

En los trabajos referidos, se miden parámetros como las concentraciones y retenciones de sales de boro, así como su efecto sobre la densidad y el módulo elástico, este último determinado principalmente en condiciones estáticas. Sin embargo, los resultados no muestran una tendencia clara respecto al aumento o a la disminución de la densidad y el módulo de elasticidad. Las diferencias entre las investigaciones anteriores indican que los resultados están relacionados con las variables y a las condiciones de ensayo, particularmente, a la especie y a la retención



de los reactivos. Por ello, estos autores proponen caracterizar el comportamiento mecánico de la madera con un enfoque de experimentación de caso por caso de una especie en particular.

La estrategia de los trabajos referidos guía el enfoque experimental de la presente investigación, pues es necesario contar con datos estadísticamente representativos, para que se pueden proponer procesos de impregnación a nivel industrial (Gérardin, 2016). El objetivo de la investigación es determinar en qué medida el tratamiento modifica la densidad y el módulo dinámico. Se partió de la hipótesis de que el tratamiento de impregnado no modifica esos parámetros. Para verificar esta propuesta, se impregnaron probetas de *S. campanulata*, *F. americana* y *A. pluriyuga* con sales de boro mediante el método de baño caliente-frío, con concentraciones de 1 %, 2 % y 3 %.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se recolectaron piezas de madera aserrada de *S. campanulata*, *F. americana* y *A. pluriyuga* en empresas de transformación de productos forestales en el estado de Michoacán, México. La madera no contenía anomalías estructurales ni defectos de crecimiento y con ella se prepararon 40 probetas con una sección transversal de 0,02 m de ancho, 0,02 m de espesor y de 0,4 m de largo de acuerdo con la norma ISO 3129: 2012 (International Organization for Standardization, 2012). Estas dimensiones correspondieron a las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso. Antes y después del tratamiento de impregnado, las probetas se conservaron en una cámara de acondicionamiento con una temperatura de 20 °C (± 1 °C) y una humedad relativa del aire de 65 % (± 2 %), hasta que su peso fue constante. El contenido de humedad de la madera fue para todas las probetas de 10 % en promedio, por lo que se consideró que el contenido de humedad no intervendría en el tratamiento estudiado. Con el objeto de evitar flujo excesivo de líquidos en los extremos de las probetas, sus caras laterales fueron cubiertas con pintura vinílica.

Antes del tratamiento de baño caliente-frío, se determinaron las densidades y se realizaron pruebas de vibraciones a cuyos resultados se les identificó como "antes del tratamiento" (AT). Una vez terminado el tratamiento, las probetas se almacenaron por tres meses, en las mismas condiciones de temperatura y de humedad en que se estabilizaron. Posteriormente se determinaron las densidades y se realizaron pruebas de vibraciones trasversales, cuyos resultados se identificaron como "después del tratamiento" (DT).

Las pruebas de vibraciones trasversales consistieron en medir la frecuencia natural de la vibración perpendicular a la dirección longitudinal de la probeta. Con tal propósito, se utilizó el aparato *Grindosonic*[®]. La Figura 1 muestra la configuración de las pruebas no destructivas de vibraciones trasversales. El impulso elástico inicial fue aplicado en el centro geométrico de la cara superior de la probeta, en la dirección tangencial a la misma, apoyada sobre dos soportes rígidos de tipo simple a una distancia nodal de 0,224 L. El ensayo dinámico en cada probeta fue repetido tres veces y el promedio de valores fue considerado para su análisis posterior. Durante las pruebas, se calcularon los momentos de inercia de la sección transversal de las probetas correspondientes a cada ensayo.



Las experiencias se realizaron 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, en Morelia, México (Figura 1).

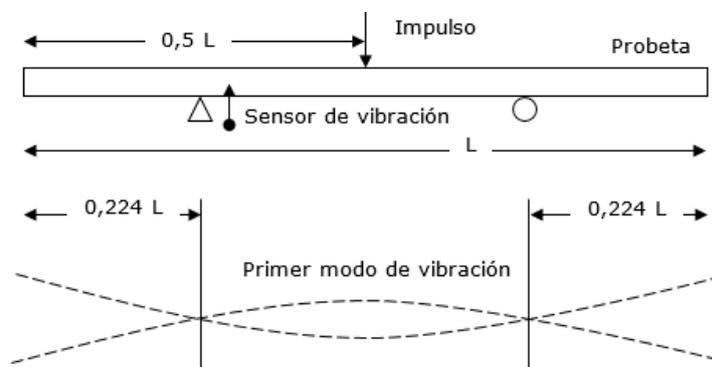


Figura 1. - Configuración de las pruebas de vibraciones. L = longitud de la probeta

Para el tratamiento de impregnado con el método de baño caliente-frío (Ávila *et al.*, 2012), se prepararon 30 litros de solución de sales de boro con una concentración al 3 %. La mezcla consistió en ácido bórico (39,4 %) y borato de sodio (60,6 %). Para aligerar el texto, en lo subsecuente el término *tratamiento* hará referencia al *tratamiento de impregnado con el método de baño caliente-frío*. La madera se sumergió durante 8 horas en un baño de agua con temperatura de 60 °C. Posteriormente, las probetas se sumergieron durante 16 horas en un baño frío con la mezcla a una de temperatura de 23 °C. Posteriormente, se calculó la retención de las sales con la fórmula (1) (Percin *et al.*, 2015) (Ecuación 1).

$$R = \frac{(P_{DT} - P_{AT}) \times C}{V_{DT}} \quad (1)$$

Donde:

R = Retención (kg m⁻³);

P_{DT} = Peso después del tratamiento (kg);

P_{AT} = Peso antes del tratamiento (kg);

V_{DT} = Volumen después del tratamiento (m³);

C = Concentración de la mezcla de sales de boro.

Para cada probeta se calculó la densidad aparente correspondiente al contenido de humedad de la madera en el momento de las pruebas. La densidad se calculó con la fórmula (2) conforme a la norma ISO 13061-2:2014 (International Organization for Standardization, 2014a) (Ecuación 2).

$$\rho_{CH} = \frac{P}{V} \times 100 \quad (2)$$



Donde:

ρ_{CH} = Densidad (kg m^{-3});
 P = Peso de la probeta (kg);
 V = Volumen de la probeta (m^3).

El contenido de humedad se determinó por el método de diferencia de pesos conforme a la norma ISO 13061-1:2014 (International Organization for Standardization, 2014b) con grupos complementarios de 10 probetas recortadas del mismo lote de madera con el cual se fabricaron las probetas. El módulo dinámico se calculó con la fórmula (3) (Faydi *et al.*, 2017) (Ecuación 3).

$$E_{vt} = \frac{4 n^2 L^4 f_{vt}^2 \rho_{CH}}{m^4 r^2} \times \left[1 + \frac{r^2}{l_{vt}^2} K \right] \quad (3)$$

Donde:

E_{vt} = Módulo dinámico (N m^{-2});
 L = Longitud de la probeta (m);
 l_{vt} = Distancia entre apoyos (m);
 f_{vt} = Frecuencia natural (Hz);
 ρ_{CH} = Densidad (kg m^{-3});
 m, K = Constantes adimensionales (12,65, 49,48);
 r = Radio de giro de la sección transversal de la probeta (m^2);
Con: $r = \sqrt{I/A}$;
 I = Momento de inercia de la sección transversal de la probeta (m^4);
 A = Área de la sección transversal de la probeta (m^2).

No obstante, que el número de probetas observadas por cada especie fue de 40, cantidad suficiente para considerar en el análisis la teoría de las grandes muestras, se calculó *a posteriori* el tamaño de la muestra necesario para validar las pruebas estadísticas para un error aceptable del 0,05. Esto se hizo para cada especie y con los valores de la retención de las muestras correspondientes a $C = 1 \%$. En los casos de la densidad y del módulo dinámico se analizaron los valores de las muestras de control ($C = 0 \%$). El número de probetas se calculó con la fórmula (4) (Gutiérrez y de la Vara, 2012) (Ecuación 4).

$$n = \frac{2 \sigma^2}{e^2} \quad (4)$$

Donde:

n = Número de probetas;
 σ = Desviación estándar;
 e = Error de estimación aceptable ($e = 0,05$).

Diseño experimental



La unidad experimental consistió en doce muestras de diez probetas, cada una correspondiente a cuatro concentraciones de sales de boro para cada una de las tres especies: *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga*. Las variables de respuesta fueron la retención (R, fórmula 1), la densidad (ρ_{CH} , fórmula 2) y el módulo dinámico (E_{vt} , fórmula 3). El impregnado con sales de boro se consideró el tratamiento y da a la madera dos estados: antes del tratamiento (AT) y después del tratamiento (DT). La concentración de sales de boro (C) se reconoció como el factor controlado y tiene cuatro niveles $C = 0$ (Grupo de control), $C = 1 \%$, $C = 2 \%$ y $C = 3 \%$. Se realizaron en total 240 observaciones ($10 \times 4 \times 3 \times 2 = 240$). El contenido de humedad de la madera (CH) se consideró variable de referencia y no intervino en el experimento. Para las variables de respuesta se determinaron la media (\bar{x}), la desviación estándar (σ) y el coeficiente de variación ($CV = \sigma/\bar{x}$). Para las densidades y los módulos dinámicos se calcularon las variaciones aritméticas entre los valores obtenidos antes y después del tratamiento: $\Delta = [(\bar{X}_{DT} - \bar{X}_{AT})/\bar{X}_{AT}]$. Para los valores medios antes y después del tratamiento se calcularon regresiones lineales ($y = ax + b$) y sus coeficientes de determinación (R^2) entre los módulos dinámicos y las densidades.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tamaño de las muestras

Para las muestras de *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga* el número de probetas necesario para validar el análisis estadístico fue inferior al número de probetas observadas para cada especie (Tabla 1). Estos resultados aseguraron la validez de la estrategia propuesta por el diseño experimental. Caso particular fueron los números necesarios de probetas para analizar datos correspondientes a los módulos dinámicos, los cuales, de acuerdo con la Tabla 1, fueron cercanos pero inferiores al número de observaciones para cada especie.

Tabla 1. - Tamaño de las muestras

Variables	Especies		
	<i>S. campanulata</i>	<i>F. americana</i>	<i>A. plurijuga</i>
	n	n	n
R	3	25	9
ρ_{CH}	6	5	1
E_{vt}	33	31	38

R = Retención; ρ_{CH} = Densidad; E_{vt} = Módulo dinámico; n = Número de probetas necesarias por especie.

Retenciones

Los valores promedio de las retenciones variaron desde un mínimo de $1,3 \text{ kg m}^{-3}$ con una concentración de 1% para *S. campanulata* hasta un máximo de $6,4 \text{ kg m}^{-3}$ con concentración de 3% para *A. plurijuga* (Tabla 2). Sus coeficientes de variación fueron en promedio de $6,4 \%$ con un mínimo de $4,6 \%$ para *S. campanulata* con concentración de 1% y un máximo de $16,8 \%$ correspondiente también a *S. campanulata* ($C = 2 \%$) (Tabla 2).



Tabla 2. - Densidades, módulos dinámicos y retenciones

Especie		ρ_{CH} AT (kg m ⁻³)	E_{vt} AT (MN m ⁻³)	C (%)	R (kg m ⁻³)	ρ_{CH} DT (kg m ⁻³)	E_{vt} DT (MN m ⁻³)
S. campanulata	\bar{x}	351	7145	Control	0	351	6723
CH = 8,2 %	CV	6,3	14,4	-	-	6,4	15,5
	\bar{x}	363	6805	1	2,3	355	7366
	CV	7,4	17,4	-	4,6	7,1	15,8
	\bar{x}	343	7539	2	4,0	342	7926
	CV	3,7	13,0	-	16,8	3,3	12,2
	\bar{x}	347	7004	3	6,4	348	7387
	CV	7,8	12,1	-	6,4	6,7	12,6
Promedios		351	7218	-	3,2	349	7446
F. americana	\bar{x}	654	11754	Control	0	658	11708
CH = 9,5 %	CV	5,6	14,0	-	-	5,7	13,9
	\bar{x}	650	13552	1	1,6	647	11797
	CV	4,4	11,9	-	9,5	4,4	10,4
	\bar{x}	659	11878	2	3,3	656	11991
	CV	7,3	17,6	-	6,3	7,6	17,4
	\bar{x}	643	12208	3	5,3	645	12434
	CV	5,3	12,9	-	10,2	5,1	12,0
Promedios		652	12348	-	2,6	652	11983
A. plurijuga	\bar{x}	830	11450	Control	0	830	11487
CH = 11,7 %	CV	2,7	15,4	-	-	2,7	15,9
	\bar{x}	845	11935	1	1,3	841	11951
	CV	3,2	13,1	-	9,8	3,3	13,6
	\bar{x}	849	11900	2	2,7	846	11855
	CV	3,2	17,1	-	5,9	3,3	17,0
	\bar{x}	827	11532	3	3,7	827	11603
	CV	4,6	11,0	-	7,3	4,7	11,2
Promedios		838	11704	-	1,9	836	11724

ρ_{CH} = Densidad; E_{vt} = Módulo dinámico; AT = Antes del tratamiento; DT = Después del tratamiento; C = Concentración; R = Retención; CH = Contenido de humedad; \bar{x} = Media; CV = Coeficiente de determinación en por ciento.

Las magnitudes de las retenciones obtenidas en la presente investigación fueron del mismo orden que las reportadas en la bibliografía. Particularmente, fueron similares a las de Sotomayor y Ávila (2019), quienes utilizaron el mismo material y tratamiento que en la presente investigación. Aun así, se observaron diferencias entre especies y tipos de ensayos para determinar los módulos dinámicos. En relación con las densidades de las tres especies, las dispersiones de las retenciones disminuyeron a medida que las densidades decrecían. Esto sugiere que los valores promedio tienden a agruparse y a disminuir (Figura 2). Asimismo, las dispersiones de los módulos dinámicos no indicaron ninguna tendencia en relación con las retenciones (Figura 3).



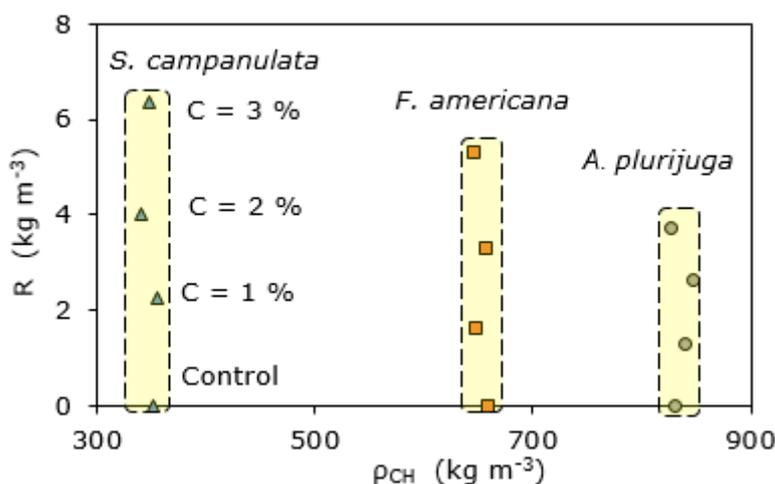


Figura 2. - Retenciones (R) agrupadas en relación con las densidades (ρ_{CH})

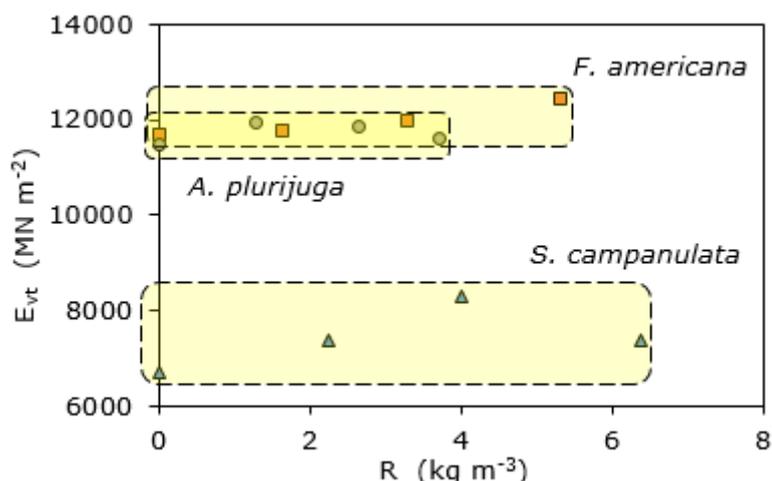


Figura 3. - Módulos dinámicos (E_{vt}) agrupados en relación con las retenciones (R)

Densidades

Las magnitudes de las densidades antes y después del tratamiento sitúan las maderas de *S. campanulata* con la menor densidad, las de *F. americana* con valores intermedios y las de *A. plurijuga* con la mayor (Tabla 2). Las diferencias aritméticas tabuladas en la Tabla 3 fueron negativas y menores a la unidad porcentual. Además, las tres especies promediaron -0,28 %, razón por la que se considera que el tratamiento no modifica las densidades de la madera. Estos resultados fueron similares a los reportados por Sotomayor y Ávila (2019), dado que, al igual que los datos concernientes a las retenciones, se trata del mismo material y tratamiento. En el mismo orden de ideas, los coeficientes de variación de las densidades variaron en promedio 5 %, valores congruentes a los reportados en la bibliografía (Tamarit y López, 2007; Silva et al., 2010).



Tabla 3. - Diferencias aritméticas para densidades y módulos dinámicos

Especies	C	$\Delta\rho_{CH}$	ΔE_{vt}
	(%)	(%)	(%)
<i>S. campanulata</i>	Control	-0,01	-5,20
	1	-2,02	8,51
	2	-0,42	5,23
	3	0,31	5,47
	Promedio	-	-0,53
<i>F. americana</i>	Control	0,21	-0,38
	1	-0,46	-11,64
	2	-0,48	1,03
	3	0,25	2,05
	Promedio	-	-0,12
<i>A. plurijuga</i>	Control	0,04	0,31
	1	-0,50	0,08
	2	-0,30	-0,37
	3	0,00	0,61
	Promedio	-	-0,19

C = Concentración; $\Delta\rho_{CH}$ = Diferencia aritmética densidad; ΔE_{vt} = Diferencia aritmética módulo dinámico.

Los valores de las retenciones se alinean con respecto a los de las densidades (Figura 2). Además, las correlaciones entre las densidades, los módulos dinámicos y sus coeficientes de determinación (Figura 4 y Figura 5), indican que la densidad es un buen predictor de los módulos dinámicos. Esto aplica para las tres especies, para las tres concentraciones y el grupo de control, así como para los dos estados de la madera, es decir antes y después del tratamiento. Estos corolarios coinciden con los reportados recientemente por [Sotomayor \(2019\)](#) para maderas mexicanas.

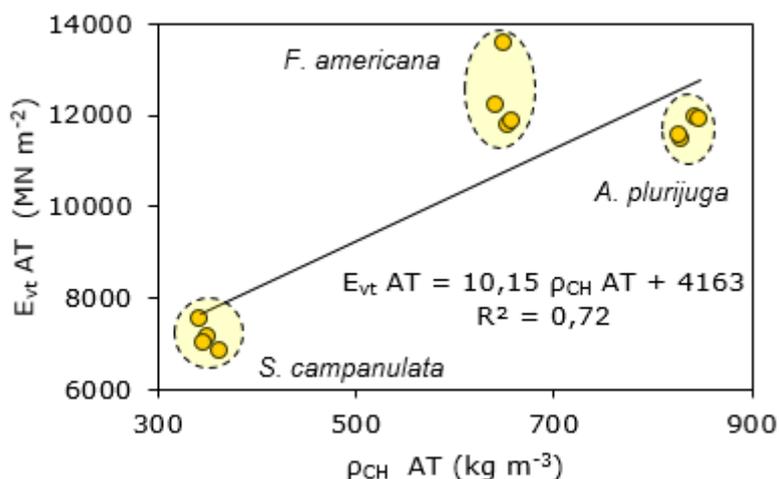


Figura 4. - Dispersiones, correlaciones y coeficientes de determinación (R^2) entre los módulos dinámicos (E_{vt}) y las densidades (ρ_{CH}) antes del tratamiento (AT)

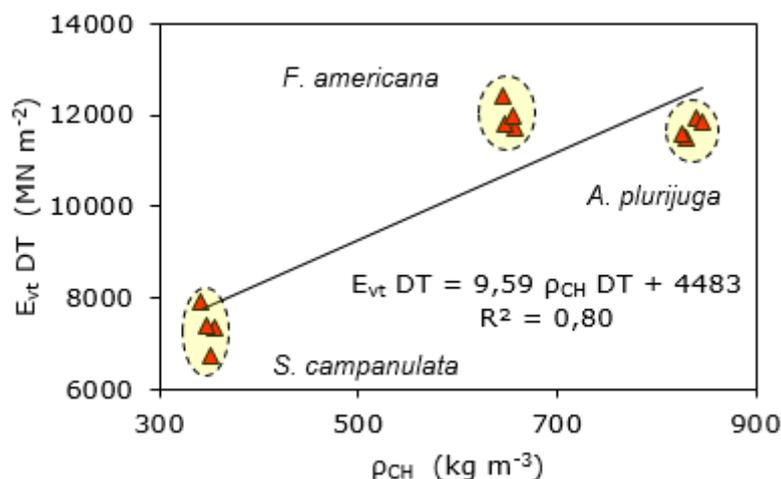


Figura 5. - Dispersiones, correlaciones y coeficientes de determinación (R^2) entre los módulos dinámicos (E_{vt}) y las densidades (ρ_{CH}) después del tratamiento (DT)

Módulos dinámicos

Las magnitudes promedio de los módulos dinámicos de *S. campanulata*, *F. americana* y *A. pluriyuga* listados en la Tabla 2 fueron del mismo orden que los reportados por [Sotomayor \(2019\)](#). Los módulos dinámicos promedio de *F. americana* fueron mayores respecto a los de *S. campanulata* y *A. pluriyuga*. Así, mientras las diferencias aritméticas entre los valores antes y después del tratamiento (Tabla 3) fueron positivos para *S. campanulata* y *A. pluriyuga*, los correspondientes a *F. americana* disminuyeron. Como consecuencia, el promedio de las diferencias para todas las muestras observadas fue de 0,16 %, cálculo difícil de interpretar dado que el efecto del tratamiento en los módulos dinámicos alcanzó un valor máximo de 8,51 para *S. campanulata* (C = 1 %) y un valor mínimo de -11,64 % para *F. americana* (C = 1 %), es decir, un intervalo de 20.15 %.

Los coeficientes de variación para los módulos dinámicos (antes y después del tratamiento) promediaron 14.1 % (Tabla 2) y no se vieron afectados por las concentraciones y/o retenciones correspondientes a cada muestra observada. Las dispersiones de los módulos dinámicos se agrupan de manera indiferente a las retenciones (Figura 3). Pero, los valores promedio de las cuatro muestras correspondientes a cada especie y concentración (Control, C = 1 %, 2 % y 3 %) correlacionan bien con las densidades antes del tratamiento (Figura 4) y de manera regular después (Figuras 5).

En el tratamiento baño caliente-frío, los valores de las retenciones aumentan proporcionalmente a la concentración de sales de boro utilizada, pero disminuyen a medida que las densidades de cada especie aumentan.



El tratamiento modifica los módulos dinámicos determinados con vibraciones transversales, estas diferencias son del orden de 3,5 % para *S. campanulata*, de -2,24 % para K y de 0,16 % para *A. plurijuga*.

Los valores promedio de las densidades de las tres maderas, antes y después del tratamiento, son buenos predictores de los módulos dinámicos.

El baño caliente-frío es eficiente para impregnar con sales de boro maderas de *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga*.

AGRADECIMIENTOS

La investigación estuvo patrocinada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADANUR, H., FIDAN, M. y YAŞAR, S., 2017. The Technological Properties of Oriental Beech (*Fagus orientalis* Lipsky) Impregnated with Boron Compounds and Natural Materials. *BioResources* [en línea], vol. 12, no. 1. DOI 10.15376/biores.12.1.1647-1661. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/316352711_The_Technological_Properties_of_Oriental_Beech_Fagus_orientalis_Lipsky_Impregnated_with_Boron_Compounds_and_Natural_Materials.
- ÁVILA, L., HERRERA, M. y RAYA, D., 2012. *Preservación de la Madera en México*. México: Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. ISBN 978-607-00-6102-8.
- CRUZ DE LEÓN, J., 2010. *Manual para la protección contra el deterioro de la madera* [en línea]. México: Guadalajara: Comisión Nacional Forestal. ISBN 83-85192-34-4. Disponible en: <https://www.forestalmaderero.com/articulos/item/manual-la-proteccion-deterioro-la-madera.html>.
- FAYDI, Y., BRANCHERIAU, L., POT, G. y COLLET, R., 2017. Prediction of Oak Wood Mechanical Properties Based on the Statistical Exploitation of Vibrational Response. *BioResources*, vol. 12, no. 3, pp. 5913-5927. ISSN 1930-2126.
- GÉRARDIN, P., 2016. New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood— a review. *Annals of Forest Science*, vol. 73, no. 3, pp. 559-570. ISSN 1297-966X. DOI 10.1007/s13595-015-0531-4.
- GUTIÉRREZ PULIDO, H. y DE LA VARA SALAZAR, R., 2012. *Análisis y diseño de experimentos* [en línea]. S.l.: McGraw-Hill, 2003. [Consulta: 2 marzo 2020]. ISBN 970-10-4017-1. Disponible en: https://books.google.com/books/about/An%C3%A1lisis_y_dise%C3%B1o_de_experimentos.html?id=1zqtAAAACAAJ.



- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 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. *Geneva: International Organization for Standardization*, pp. 4.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, GENEVA (SWITZERLAND), 2012. Wood. Sampling methods and general requirements for physical and mechanical testing of small clear wood specimens. *ISO International Standard (ISO)* [en línea], [Consulta: 2 marzo 2020]. Disponible en: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2006427072>.
- KARTAL, S.N., HWANG, W.-J. y IMAMURA, Y., 2008. Combined effect of boron compounds and heat treatments on wood properties: Chemical and strength properties of wood. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 198, no. 1, pp. 234-240. ISSN 0924-0136. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2007.07.001.
- KESKIN, H. y MUTLU, E., 2017. Impacts of Impregnation with Fire Retardant Chemicals on the MOE in Bending of Some Woods, pages: 607-612. *Politeknik Dergisi* [en línea], vol. 20, no. 3. DOI 10.2339/politeknik.339384. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/Impacts-of-Impregnation-with-Fire-Retardant-on-the-Keskin-Mutlu/9ac439b32362881f24ca84d8ba55e5cd350ee9f6>.
- LAHTELA, V., HÄMÄLÄINEN, K. y KÄRKI, T., 2013. The Effects of Preservatives on the Properties of Wood after Modification (Review paper). *Baltic Forestry*, vol. 20, pp. 189-203.
- PERÇIN, O., SOFUOĞLU, S.D. y UZUN, O., 2015. Effects of Boron Impregnation and Heat Treatment on Some Mechanical Properties of Oak (*Quercus petraea* Liebl.) Wood. *BioResources*, vol. 10, no. 3, pp. 3963-3978. ISSN 1930-2126.
- PIZZI, A., 2016. Wood products and green chemistry. *Annals of Forest Science*, vol. 73, no. 1, pp. 185-203. ISSN 1297-966X. DOI 10.1007/s13595-014-0448-3.
- 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 uso de maderas nativas de México e importadas* [en línea]. 1a edición. S.l.: Guadalajara, Jal.: Universidad de Guadalajara, Departamento de Madera, Celulosa y Papel, Centro de Investigación en Propiedades y usos de la Madera, CONAFOR, Amaya, 2010. [Consulta: 2 marzo 2020]. ISBN 978-607-00-2894-6. Disponible en: [https://glifos.gdl.up.mx/library/index.php?title=53169&lang=%20%20&query=@title=Special:GSMSearchPage@process=@autor=UNIVERSIDAD%20DE%20GUADALAJARA%20\(MEXICO\)%20@mode=&recnum=9](https://glifos.gdl.up.mx/library/index.php?title=53169&lang=%20%20&query=@title=Special:GSMSearchPage@process=@autor=UNIVERSIDAD%20DE%20GUADALAJARA%20(MEXICO)%20@mode=&recnum=9).
- SIMSEK, H. y BAYSAL, E., 2015. Some Physical and Mechanical Properties of Borate-Treated Oriental Beech Wood. *Drvna Industrija*, vol. 66, pp. 97-103. DOI 10.5552/drind.2015.1356.



- SIMSEK, H., BAYSAL, E. y PEKER, H., 2010. Some mechanical properties and decay resistance of wood impregnated with environmentally-friendly borates. *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 11, pp. 2279-2284. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.028.
- SOTOMAYOR CASTELLANOS, 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*, vol. 15, no. 1, pp. 4-64.
- SOTOMAYOR CASTELLANOS, J.R. y AGUILAR, J.-M., 2016. Retención de Sales de boro en Tres Maderas Mexicanas. Evaluación Mecánica por Vibraciones. *Revista de Ciencia y Tecnología.*, vol. 18, pp. 40-46.
- SOTOMAYOR CASTELLANOS, J.R. y ÁVILA CALDERÓN, L.E.A., 2019. Retención y penetración de sales de boro en tres maderas angiospermas: *Spathodea campanulata*, *Fraxinus americana* y *Albizia plurijuga*. *Ciencia y Tecnología UTEC* [en línea], vol. 12, no. 2. ISSN 1390-4043. Disponible en: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/revcie/article/download/9042/11434/>.
- SOTOMAYOR CASTELLANOS, J.R. y CORREA JURADO, S., 2019. Retention of Salts of Boron on the Wood and its Effect in the Dynamic Modulus of Elasticity. *Ciencia y Tecnología UTEC*, vol. 12, no. 2, pp. 10. ISSN 1390-4043.
- SOTOMAYOR CASTELLANOS, J.-R. y JURADO, S., 2016. Retención de sales de boro en la madera y su efecto en el módulo de elasticidad dinámico. *Revista Científica*, vol. 24, pp. 1-19. DOI 10.14483/udistrital.jour.RC.2016.24.a9.
- SOTOMAYOR, J., FORERO, M. del P.G., SERA, J.G., MÒDOL, E.C. y CASALS, M.V., 2018. Efecto de sales de boro en la densidad y en el módulo de elasticidad de tres maderas mexicanas. *Ingeniería: Revista de la Universidad de Costa Rica*, vol. 28, no. 2, pp. 31-44. ISSN 1409-2441.
- SOTOMAYOR-CASTELLANOS, J.R., VILLASEÑOR AGUILAR, J.M., 2016. Retención y absorción de solución de sales de boro de diez maderas mexicanas. *Acta universitaria*, vol. 26, no. 2, pp. 12-19. ISSN 0188-6266. DOI 10.15174/au.2016.835.
- TAMARIT URIAS, J.C., 2007. *Xilotecnología de los principales árboles tropicales de México* [en línea]. México: INIFAP. Libro Técnico Núm. 3. Disponible en: <https://bibliotecas.uqroo.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=33157>. QK936 M4 T3.
- TONDI, G., WIELAND, S., LEMÉNAGER, N., PETUTSCHNIGG, A., PIZZI, A.P. y THÉVENON, M.F., 2012. Efficacy of tannin in fixing boron in wood. Fungal and Termite resistance. *Bioresources*, vol. 7, no. 1, pp. 1238-1252.



Conflicto de intereses:

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Contribución de los autores:

Los autores han participado en la redacción del trabajo y análisis de los documentos.



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-
NoComercial 4.0 Internacional.
Copyright (c) 2020 Javier Ramón Sotomayor Castellanos, Luz Elena Alfonsina Ávila
Calderón

