



## Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: [www.riit.com.mx](http://www.riit.com.mx)

**Impregnación con sales de boro de la madera de *Spathodea campanulata* P. Beauv, *Fraxinus americana* L. y *Albizia plurijuga* (Standl.) Britton & Rose. Evaluación con ultrasonido de la velocidad de onda y del módulo dinámico**

**Impregnation with boron salts of the wood of *Spathodea campanulata* P. Beauv, *Fraxinus americana* L. and *Albizia plurijuga* (Standl.) Britton & Rose. Ultrasound evaluation of wave velocity and dynamic modulus**

**Sotomayor-Castellanos, J.R.\* , Ávila-Calderón, L.E.A.**

\* Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.

\* [madera999@yahoo.com](mailto:madera999@yahoo.com); [lea.avilacalderon@gmail.com](mailto:lea.avilacalderon@gmail.com)

**Innovación tecnológica:** Desarrollo de productos forestales mejorados y con valor agregado. Madera preservada contra el deterioro de agentes biológicos y físicos.

**Áreas de aplicación industrial:** Fabricación de componentes constructivos para la industria del mueble y elaboración de elementos estructurales para la industria de la construcción.

Recibido: 21 enero 2020

Aceptado: 20 mayo 2020

### Abstract

The protection of wood with boron salts affects the physical and mechanical characteristics of the wood according to the type of treatment applied and the species. The objective of the research was to compare the density, ultrasound speed and dynamic modulus of 40 small-sized specimens of wood from *Spathodea campanulata*, *Fraxinus americana* and *Albizia plurijuga* that were impregnated with boron salts in concentrations of 1 %, 2 % and 3 %. In order to achieve this; the densities, wave velocities and dynamic modules were calculated by ultrasound before and after the treatment. Retentions were calculated after treatment. The moisture content of the untreated wood of *S. campanulata* was 8 %, that of *F. americana* 10 % and that of *A. plurijuga* 12 %. The average retention of the three groups of specimens with concentrations of 1 %, 2 % and 3 % were for *S. campanulata*,  $R = 3,2 \text{ kg m}^{-3}$ , for *F. americana*  $R = 2,6 \text{ kg m}^{-3}$  and for *A. plurijuga*  $R = 1,9 \text{ kg m}^{-3}$ . The average densities for *S. campanulata* were  $351 \text{ kg m}^{-3}$ , *F. americana*  $652 \text{ kg m}^{-3}$  and for *A. plurijuga*  $838 \text{ kg m}^{-3}$ . After treatment, wood densities decreased on average 0,6 % for *S.*

*campanulata* and 0,2 % for *A. plurijuga*. For *F. americana* no differences are observed. As a treatment effect, the wave velocities decreased for *S. campanulata* -3,6 %, for *F. americana* -11,8 % and for *A. plurijuga* -5,1 %. The impregnated process with the cold-client bath method reduced the dynamic modules in particular to each species. For *S. campanulata* the reduction reached an average of -6,4 %; for *F. americana* the decrease was -22 % and for *A. plurijuga* it was -9 %. Densities correlate well with wave speeds with coefficients of determination of  $R^2 = 0,69$  before treatment and  $R^2 = 0,55$  after treatment. Densities explain the variation of the dynamic modules with an  $R^2 = 0,88$  before the treatment and with an  $R^2 = 0,80$  for after the treatment. With the experimental strategy, the retention capacity of boron salts of the mentioned wood was determined. In addition, the treatment effect on densities, wave speeds and dynamic modules were evaluated. The areas of the industry where the results of the research are applicable are in the manufacture of building components for furniture and in the elaboration of structural elements for construction.

**Key words:** dynamic modulus, retention, wave speed, wood density.

## Resumen

La protección de la madera con sales de boro afecta las características físicas y mecánicas de la madera según el tipo de tratamiento aplicado y las especies. El objetivo de la investigación fue comparar la densidad, la velocidad del ultrasonido y el módulo dinámico, de 40 probetas de pequeñas dimensiones de maderas de *Spathodea campanulata*, *Fraxinus americana* y *Albizia plurijuga* que se impregnaron con sales de boro en concentraciones de 1 %, 2 % y 3 %. Para ello, antes y después del tratamiento, las densidades, las velocidades de onda y los módulos dinámicos fueron determinados por ultrasonido. Las retenciones se calcularon después del tratamiento. El contenido de humedad de la madera sin tratamiento de *S. campanulata* fue 8 %, el de *F. americana* 10 % y el de *A. plurijuga* 12 %. Las retenciones promedio de los tres grupos de probetas con concentraciones de 1 %, 2 % y 3 % fueron para *S. campanulata*,  $R = 3,2 \text{ kg m}^{-3}$ , para *F. americana*  $R = 2,6 \text{ kg m}^{-3}$  y para *A. plurijuga*  $R = 1,9 \text{ kg m}^{-3}$ . Las densidades promedio para *S. campanulata* fueron de  $351 \text{ kg m}^{-3}$ , para *F. americana*  $652 \text{ kg m}^{-3}$  y para *A. plurijuga*  $838 \text{ kg m}^{-3}$ . Después del tratamiento las densidades de las maderas disminuyeron en promedio 0,6 % para *S. campanulata* y 0,2 % para *A. plurijuga*. Para *F. americana* no se observan diferencias. Como efecto del tratamiento, las velocidades de onda disminuyeron para *S. campanulata* -3,6 %, para *F. americana* -11,8 % y para *A. plurijuga* -5,1 %. El proceso de impregnado con el método de baño caliente-frío redujo los módulos dinámicos de manera particular a cada especie. Para *S. campanulata* la reducción alcanzó un promedio de -6,4 %; para *F. americana* la disminución fue de -22 % y para *A. plurijuga* fue de -9 %. Las densidades correlacionan bien con las velocidades de onda con coeficientes de determinación de  $R^2 = 0,69$  para antes del tratamiento y de  $R^2 = 0,55$  para después del tratamiento. Las densidades explican la variación de los módulos dinámicos con un  $R^2 = 0,88$  para antes del tratamiento y con un  $R^2 = 0,80$  para después del tratamiento. Con la estrategia experimental se determinó la capacidad de retención de sales de boro de las maderas mencionadas. Además, se evaluó el efecto del tratamiento en las densidades, velocidades de onda y módulos dinámicos. Las áreas de la industria dónde encuentran aplicación los resultados de la investigación son en la fabricación de componentes constructivos para muebles y en la elaboración de elementos estructurales para la construcción.

**Palabras clave:** densidad de la madera, módulo dinámico, retención, velocidad de onda.

## 1. Introducción

La protección de la madera con sales de boro es una tecnología aplicada con buenos resultados. Sin embargo, las sales de boro se disuelven en contacto con agua, de tal forma que se recomienda su empleo en componentes que no estén expuestos a la intemperie [1]. Esta técnica es amigable con el medio ambiente [2], no tóxica para los humanos [3], y pretende evitar que la madera se deteriore por el efecto de agentes biológicos [4], climáticos [5] o por la acción del fuego [6].

La literatura sobre el efecto de las sales de boro en el módulo de elasticidad indica resultados particulares a cada investigación: [7] encuentran que, después de impregnar madera con sales de boro, el módulo de elasticidad de *Fagus orientalis* disminuye 11 % y el de *Pinus sylvestris* se reduce 4 %. Por su parte, [8] impregnaron madera de *Quercus petraea* con sales de boro y encontraron que el módulo de elasticidad disminuye hasta un 7 % por el efecto del tratamiento. De manera diferente, [9] reportan para *Betula pubescens* un incremento de 17 % en el módulo de elasticidad después de su tratamiento con sales de boro. Igualmente, [10] reportan para *Pinus sylvestris* un incremento de 27 % en el módulo de elasticidad; en cambio, reportan decrecimiento para *Fagus selvático* de 7 % y para *Quercus robur* de 10 %. En la determinación del módulo de elasticidad en condiciones estáticas no se requiere la medición de la densidad. De tal forma que los autores reseñados no discuten explícitamente el efecto de las sales de boro en la densidad.

Para maderas mexicanas, [11] reportan que en madera de *Spathodea campanulata* la densidad disminuye 6 % pero el módulo de elasticidad aumenta 8 %. En cambio, en *Guazuma ulmifolia* observan aumentos en la densidad de 3 % y en el módulo de elasticidad de 4 %. En el mismo sentido, reportan que en

*Abies religiosa* la densidad se incrementa 4 % pero el módulo de elasticidad disminuye 7 %.

Respecto al efecto de las sales de boro en el módulo dinámico empleando ondas de esfuerzo, [12] reportan para *G. ulmifolia* un incremento en el módulo dinámico de 4 % y para *A. religiosa* un incremento de 21 %. Sin embargo, para *S. campanulata* se reporta una disminución de 19 %. Complementando el estudio de estas especies, [13] reportan para el caso de vibraciones transversales que el módulo dinámico de *G. ulmifolia* aumenta en 11 %, el de *S. campanulata* disminuye 5 % y el de *A. religiosa* aumenta 10 %.

A manera de síntesis, los antecedentes empíricos citados sugieren que, la protección de la madera con sales de boro es recomendable. Sin embargo, su efecto en las características físicas y mecánicas de la madera es diferente según el tipo de tratamiento aplicado, las sustancias utilizadas y según las especies en estudio. De manera que, si se aplica un mismo tratamiento de impregnación y se utiliza una misma mezcla de preservante, pero con diferentes concentraciones, se puede establecer la pregunta de investigación: ¿en qué medida el tratamiento de sales de boro afecta la densidad, la velocidad del ultrasonido y el módulo dinámico en maderas con un amplio rango de densidad?

Para responder a esta pregunta, la investigación propone la hipótesis de trabajo siguiente: la densidad, la velocidad de onda y el módulo dinámico de la madera no se alteran de manera estadísticamente significativa, como resultado del tratamiento de protección con sales de boro. Para verificar esta hipótesis, el objetivo de la investigación fue determinar y comparar estas características por ultrasonido, antes y después del tratamiento de maderas de *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga*. La revisión de trabajos anteriores no encontró

estudios comparativos de la repercusión del tratamiento con sales de boro sobre estas características, particularmente en las especies referidas. Así, los alcances de este estudio comparativo se limitan a la observación de un número limitado de probetas de pequeñas dimensiones, de tres especies angiospermas y para concentraciones de sales de boro de 1 %, 2 % y 3 %.

## 2. Materiales y métodos

El material experimental consistió en madera de *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga*. Se recolectaron piezas de madera aserrada en empresas de transformación de productos forestales en el estado de Michoacán, México. Para cada una de las especies se prepararon lotes de 40 probetas con dimensiones de 0,02 m x 0,02 m x 0,4 m, respectivamente en las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso y de acuerdo con la norma ISO 3129: 2012 [14]. Las probetas se almacenaron durante 24 meses en una cámara de acondicionamiento con una temperatura de 20 °C ( $\pm 1$  °C) y una humedad relativa del aire de 65 % ( $\pm 2$  %), hasta que alcanzaron un peso constante.

Las probetas contenían solamente madera de duramen. La madera no presentó anomalías estructurales ni fisuras o defectos de crecimiento, como la desviación de la fibra, los nudos y las bolsas de resinas o ceras. Con el objeto de evitar el flujo excesivo de sales de boro en los extremos de las probetas, sus caras laterales fueron cubiertas con pintura vinílica.

El contenido de humedad y la densidad se calcularon simultáneamente con un grupo adicional de 20 probetas con dimensiones de 0,02 m x 0,02 m x 0,06 m. El contenido de humedad se determinó antes del impregnado con el peso de la probeta al momento del

ensayo y su peso en estado seco, de acuerdo a la norma ISO 13061-1:2014 [15], mientras que la densidad se determinó de acuerdo a la norma ISO 13061-2:2014 [16].

Las probetas se impregnaron con el método baño caliente-frío siguiendo el protocolo propuesto por [17]. Se prepararon 30 litros de solución acuosa de trihidróxido de boro (ácido bórico 39,4 %) y tetraborato de sodio (borato de sodio 60,6 %) con tres concentraciones 1 %, 2 % y 3 %, de acuerdo con la norma NMX-C-178-ONNCCE-2014 [18]. La madera se sumergió durante 8 horas en un baño de agua con temperatura de 60 °C. A continuación, las probetas se sumergieron durante 16 horas en un baño frío, con la solución de sales de boro y temperatura de 23 °C.

La retención se determinó con la ecuación (1) [7]:

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

Donde:

R = Retención (kg m<sup>-3</sup>)

P<sub>DT</sub> = Peso después del tratamiento (kg)

P<sub>AT</sub> = Peso antes del tratamiento (kg)

C = Concentración de sales de boro (%)

V<sub>DT</sub> = Volumen después del tratamiento (m<sup>3</sup>)

Una vez terminado el tratamiento de baño caliente-frío, y realizadas las mediciones para calcular la retención, las probetas se almacenaron por tres meses en las mismas condiciones en que se estabilizó la madera antes del procedimiento; es decir, en una cámara de acondicionamiento con una temperatura de 20 °C ( $\pm 1$  °C) y una humedad relativa del aire de 65 % ( $\pm 2$  %), hasta que recuperaron su contenido de humedad en equilibrio. La determinación del contenido de humedad y de la densidad, así como las

pruebas de ultrasonido, se realizaron antes y después del tratamiento de preservación.

Las pruebas de ultrasonido consistieron en suministrar un impulso ultrasónico de transmisión directa en la dirección longitudinal de la probeta. La velocidad del ultrasonido se calculó con el cociente entre la longitud de las probetas y el tiempo de transmisión medido con el aparato marca *concept-bois-technologie*, modelo *Sylvatest®* (22 kHz de frecuencia de emisión), Saint-Sulpice, Suiza. Los parámetros definidos a continuación tienen el subíndice *us*, para representar que son parámetros derivados de pruebas de ultrasonido. El módulo dinámico se calculó con la fórmula (2) [19]:

$$E_{us} = v_{us}^2 \rho_{CH} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

$E_{us}$ : Módulo de dinámico ( $\text{N m}^{-2}$ )

$v_{us}$ : Velocidad de onda ( $\text{m s}^{-1}$ )

$\rho_{CH}$ : Densidad ( $\text{kg m}^{-3}$ )

### 2.1 Diseño experimental

La unidad experimental consistió en tres grupos de 40 probetas correspondientes a cada una de las tres especies. Cada grupo se dividió en cuatro muestras. Tres para concentraciones (C) de sales de boro

correspondientes de 1 %, 2 % y 3 % y una para control sin tratamiento (C = 0 %). Las variables de respuesta fueron la densidad, la velocidad de onda y el módulo dinámico, todas relacionadas con el grupo de control y las tres concentraciones. El contenido de humedad y la retención se consideraron variables de referencia. Para todas las muestras se calcularon la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Se calcularon regresiones lineales y sus coeficientes de determinación para las retenciones, las velocidades de onda y los módulos dinámicos en función de las densidades.

### 3. Resultados y discusión

El contenido de humedad de la madera de *S. campanulata* fue 8 % (CV = 14 %), el de *F. americana* 10 % (CV = 6 %) y el de *A. plurijuga* 12 % (CV = 5 %). El promedio de las tres especies fue 10 %. De tal forma que se consideró en estado seco la madera y que el contenido de humedad no intervino en los resultados.

La Tabla 1 presenta las concentraciones, las medias y los coeficientes de variación de las retenciones, densidades, velocidades de onda y módulos dinámicos, para las maderas, antes y después del tratamiento.

**Tabla 1.** Concentraciones, retenciones, densidades, velocidades de onda y módulos dinámicos.

Especies	C (%)	DT	AT	DT	AT	DT	AT	DT
		R (%)	$\rho_{CH}$ ( $\text{kg m}^{-3}$ )	$\rho_{CH}$	$v_{us}$ ( $\text{m s}^{-1}$ )	$v_{us}$	$E_{us}$ ( $\text{MN m}^{-2}$ )	$E_{us}$
Medias								
<i>S. campanulata</i>	0	0,0	351	351	3408	3557	4093	4559
	1	2,3	363	355	3469	3127	4362	3475
	2	4,0	343	341	3658	3283	4601	3685
	3	6,4	347	348	3497	3550	4249	4389
<i>F. americana</i>	0	0,0	654	658	4542	4069	13492	10945
	1	1,6	650	647	4454	3767	12933	9188

	2	3,3	659	656	4570	4006	13778	10537
	3	5,3	643	645	4632	4215	13813	11500
<i>A. plurijuga</i>	0	0,0	830	830	4521	4023	17062	13504
	1	1,3	845	841	5029	4150	21484	14576
	2	2,7	849	846	4951	4887	21006	20472
	3	3,7	827	827	4428	4849	16297	19515
Especies	Coeficientes de variación (%)							
	C	R	$\rho_{CH}$	$\rho_{CH}$	$v_{us}$	$v_{us}$	$E_{us}$	$E_{us}$
<i>S. campanulata</i>	0	0	6	6	8	14	17	24
	1	5	7	7	7	7	12	13
	2	17	4	3	8	7	15	12
	3	6	8	7	7	7	13	12
<i>F. americana</i>	0	0	6	6	4	8	7	17
	1	10	4	4	5	6	11	9
	2	6	7	8	6	5	12	11
<i>A. plurijuga</i>	3	10	5	5	4	7	10	14
	0	0	3	3	8	6	17	14
	1	10	3	3	7	7	16	16
	2	6	3	3	9	11	19	22
	3	7	5	5	6	5	15	14

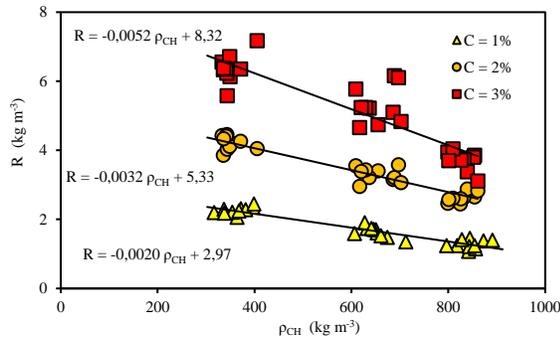
C = Concentración; R = Retención;  $\rho_{CH}$  = Densidad;  $v_{us}$  = Velocidad de onda;  $E_{us}$  = Módulo dinámico: AT = Antes del tratamiento; DT = Después del tratamiento.

### 3.1. Retenciones

Las retenciones promedio de los tres grupos con concentraciones de 1 %, 2 % y 3 % fueron para *S. campanulata*  $R = 3,2 \text{ kg m}^{-3}$ , para *F. americana*  $R = 2,6 \text{ kg m}^{-3}$  y para *A. plurijuga*  $R = 1,9 \text{ kg m}^{-3}$ .

Las retenciones promedio en las maderas de *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga* estuvieron en el intervalo reportado por [20] y [21] quienes obtuvieron retenciones que van de  $0,32 \text{ kg m}^{-3}$  a  $17,42 \text{ kg m}^{-3}$ . Las retenciones fueron mayores a las sugeridas por la Asociación Americana de Preservadores de Madera para concentraciones de 2 % y 3 % ( $2,72 \text{ kg m}^{-3}$ ) para la madera empleada en elementos estructurales [22].

Las retenciones de sales de boro disminuyen a medida que la densidad de la madera aumenta. Para *S. campanulata*, ( $\rho_{CH} = 351 \text{ kg m}^{-3}$ ), la retención es de  $3,2 \text{ kg m}^{-3}$ , para *F. americana* ( $\rho_{CH} = 652 \text{ kg m}^{-3}$ ) es de  $2,6 \text{ kg m}^{-3}$  y para *A. plurijuga* ( $\rho_{CH} = 838 \text{ kg m}^{-3}$ ) es de  $1,9 \text{ kg m}^{-3}$  (Tabla 1). En cambio, las retenciones aumentan a medida que las concentraciones son más fuertes. Las retenciones se agrupan por especie y muestran tendencias similares. Para la concentración de  $C = 1 \%$ , las retenciones correlacionan con las densidades con un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0,90. Para  $C = 2 \%$  el coeficiente  $R^2$  es de 0,91 y para  $C = 3 \%$  el  $R^2$  es de 0,79 (Figura 1).



**Figura 1.** Correlaciones entre las retenciones y las densidades.

Los coeficientes de variación para las retenciones aumentan cuando las densidades se incrementan. Los valores promedio varían 7,7 % para *A. plurijuga*, 8,7 % para *F. americana* y 9,3 % para *S. campanulata*. Coeficientes similares a los reportados por [11] de 4,2 kg m<sup>-3</sup> para *G. ulmifolia* y *S. campanulata* y de 17,4 % para *A. religiosa*, impregnadas con el método de baño caliente-frío en condiciones experimentales similares a las de la presente investigación.

La densidad de la madera es una medida de la cantidad de masa con relación a un volumen dado. Así, a menor densidad, mayor espacio vacío, lo cual es también una ponderación de la porosidad del material. Por lo tanto, a mayor porosidad de la madera, mayor será la cantidad de preservante retenido. Estos resultados coinciden con los reportados por [23] quienes concluyen que aplicando el método de célula llena al vacío para *Ragús orientalis* ( $\rho_{CH} = 520 \text{ kg m}^{-3}$ ) la retención de sales de boro aumenta a medida que la concentración de las sales de boro se incrementa, en un rango que va de 1 % a 5 %.

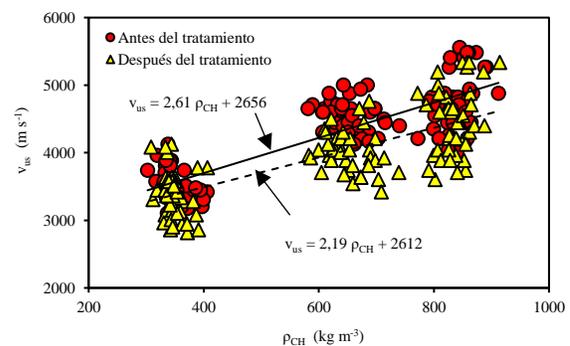
### 3.2. Densidades

Las magnitudes de las densidades variaron en un rango de 506 kg m<sup>-3</sup>. Los valores promedio para *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga* son similares a los reportadas para

estas especies [24]. Las densidades promedio para *S. campanulata* fueron de 351 kg m<sup>-3</sup>, para *F. americana* 652 kg m<sup>-3</sup> y *A. plurijuga* 838 kg m<sup>-3</sup>. Después del tratamiento las densidades de las maderas disminuyen en promedio 0,6 % para *S. campanulata*, 0,2 % para *A. plurijuga* mientras que para *F. americana* no se observan diferencias. Para fines prácticos, las densidades no se modifican por el método de baño caliente-frío, el cual permite impregnar maderas con un amplio rango de densidades y tampoco se observaron defectos ocasionados por el tratamiento.

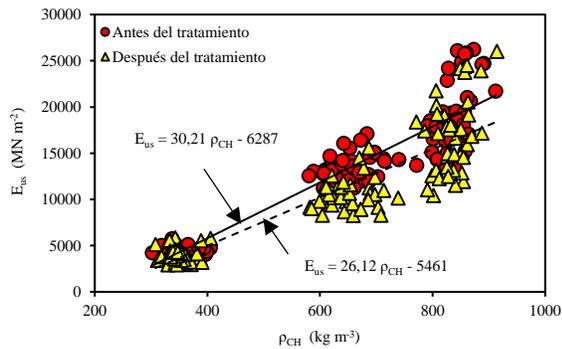
Los coeficientes de variación para las densidades disminuyen cuando las densidades se incrementan. Los valores promedio para antes del tratamiento varían 6,3 % para *S. campanulata*, 5,6 % para *F. americana* y 3,4 % para *A. plurijuga*. Para después del tratamiento, las retenciones varían en promedio 5,9 % para *A. plurijuga*, 5,7 % para *F. americana* y 3,5 % para *S. campanulata*, valores similares a los reportados por [24].

Las densidades predicen las velocidades de onda con coeficientes de determinación R<sup>2</sup> entre 0,69, para antes del tratamiento y 0,55 para después del tratamiento (Figura 2).



**Figura 2.** Correlaciones entre las velocidades de onda y las densidades.

Para los módulos dinámicos, las densidades explican estas relaciones con coeficientes de determinación  $R^2$  de 0,88 para antes del densificado y  $R^2$  de 0,80 para después del densificado (Figura 3).



**Figura 3.** Correlaciones entre los módulos dinámicos y las densidades.

### 3.3. Velocidades de onda

Como efecto del tratamiento con sales de boro, las velocidades de onda promedio disminuyeron en promedio para *S. campanulata* -3,6 %, para *F. americana* -11,8 % y para *A. plurijuga* -5,1 % (Tabla 1). Las magnitudes promedio son similares a las reportadas para estas mismas especies por [24]. En cambio, las velocidades de onda aumentan a medida que las densidades se incrementan (Figura 2). Estas tendencias en el aumento de las velocidades de onda respecto a las densidades coinciden con los resultados reportados por [25] para madera de *Enterolobium cyclocarpum*, *Tabebuia rosea* y *Juglans pyriformis*.

Después del tratamiento, los coeficientes de variación promedio de las velocidades de onda aumentan según la especie y/o la concentración (Tabla 1). Para las tres especies en conjunto se incrementan de 6,7 % para antes del tratamiento hasta 7,5 % para después del tratamiento. Esta variabilidad se distingue en la Figura 2 donde se aprecia la dispersión de valores de cada probeta medida

y el agrupamiento de datos especie por especie, con y sin tratamiento.

Esta discrepancia en los resultados de los coeficientes de variación entre especies ocasionada por el impregnado con sales de boro, ha sido reportada por [12] para el caso de ondas de esfuerzo en maderas de *S. campanulata*, *Abies religiosa* y *Guazuma ulmifolia*. Sus resultados sugieren que efectivamente, para una generalización donde se estudian varias especies con un amplio intervalo de valores de densidad y de velocidades de onda, existe la probabilidad de que la retención afecte estos parámetros. Por su parte, existe evidencia empírica de que la estructura anatómica particular a cada especie interviene en las mediciones de descriptores dinámicos de la madera [26] [27] [28].

### 3.4. Módulos dinámicos

El efecto del proceso de impregnado con sales de boro con el método de baño caliente-frío reduce los módulos dinámicos de manera particular a cada especie o retención (Tabla 1). Combinando los resultados del grupo de control con las tres concentraciones y sus retenciones consecuentes, para *S. campanulata*, la reducción después del tratamiento alcanza un promedio de -6,4 %; para *F. americana* la disminución es de -22 % y para *A. plurijuga* es de -9 %.

En el mismo contexto, los coeficientes de variación para *S. campanulata* aumentan de 14,1 % para antes del tratamiento, hasta 15,4 % para después del tratamiento. Igualmente, los coeficientes de variación de *F. americana* aumentan de 9,9 % hasta 12,8 %. Caso diferente es *A. plurijuga* cuyos coeficientes de variación disminuyen de 16,6 % hasta 16,3 %. Esta variación particular a cada especie está reportada por [12] y [13], para módulos dinámicos y por [11] para módulos de elasticidad en maderas de *S. campanulata*, *A.*

*religiosa* y *G. ulmifolia* impregnados con sales de boro. Igualmente, en la literatura internacional sobre el tópico [3] [8] [9] [29] [30] reportan un aumento y/o disminución de los coeficientes de variación cuando se impregna madera con sales de boro, y cuando se preserva madera con tratamientos diferentes [2] [6] [7] [10] [11].

#### 4. Conclusiones

Se determinó la capacidad de retención de sales de boro en las maderas de *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga*. Las retenciones disminuyen a medida que las densidades aumentan; cabe mencionar que las densidades de las maderas no varían significativamente por el efecto del tratamiento. El proceso de impregnado con sales de boro con el método de baño caliente-frío reduce los módulos dinámicos de manera particular a cada especie o retención; igualmente, como efecto del tratamiento, las velocidades de onda se reducen.

#### 5. Agradecimientos

La investigación fue patrocinada por la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.

#### 6. Referencias

- [1] Obanda, D. D., Shupe, T. F., & Barnes, H. M. (2008). “Reducing leaching of boron-based wood preservatives. A review of research”. *Bioresource Technology*, 99(15), 7312-7322. doi: 10.1016/j.biortech.2007.12.077.
- [2] Ahn, S. H., Oh, S. C., Choi, I., Han, G., Jeong, H., Kim, K., Yoon, Y., & Yang, I. (2010). “Environmentally friendly wood preservatives formulated with enzymatic-

hydrolyzed okara, copper and/or boron salts”. *Journal of Hazardous Materials*, 178(1), 604-611. doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.01.128.

[3] González-Laredo, R. F., Rosales-Castro, M., Rocha-Guzman, N. E., Gallegos-Infante, J. A., Moreno-Jimenez, M. R., & Karchesy, J. J. (2015). “Wood preservation using natural products”. *Madera y Bosques*, 21, 63-76. doi: 10.21829/myb.2015.210427.

[4] Obounou-Akong, F., Gérardin, P., Thévenon, M.F., & Gérardin-Charbonnier, C. (2015). “Hydrogel-based boron salt formulations for wood preservation”. *Wood Science and Technology*, 49(3), 443-456. doi: 10.1007/s00226-015-0701-4.

[5] Baysal, E., Tomak, E. D., Topaloglu, E., & Pesman, E. (2016). “Surface properties of bamboo and scots pine impregnated with boron and copper based wood preservatives after accelerated weathering”. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 18(2), 253-264. doi: 10.4067/S0718-221X2016005000023.

[6] Uner, I. H., Deveci, I., Baysal, E., Turkoglu, T., Toker, H., & Peker, H. (2016). “Thermal analysis of oriental beech wood treated with some borates as fire retardants”. *Maderas. Ciencia y tecnología*. 18(2), 293-304. doi: 10.4067/S0718-221X2016005000027.

[7] Simsek, H., Baysal, E., Yilmaz, M., & Culha, F. (2013). “Some mechanical properties of wood impregnated with environmentally-friendly boron and copper based chemicals”. *Wood Research*, 58(3), 495-504. <http://www.woodresearch.sk/wr/201303/16.pdf>.

[8] Percin, O., Sofuoglu, S. D. & Uzun, O. (2015). “Effects of Boron Impregnation and Heat Treatment on Some Mechanical Properties of Oak (*Quercus petraea* Liebl.)

Wood”. *BioResources*, 10(3), 3963-3978. doi: 10.15376/biores.10.3.3963-3978.

[9] Awoyemi, L., & Westermarck, U. (2005). “Effects of borate impregnation on the response of wood strength to heat treatment”. *Wood Science and Technology*, 39(6), 484-491. doi: 10.1007/s00226-005-0001-5.

[10] Keskin, H., & Mutlu, E. (2017). “Impacts of impregnation with fire retardant chemicals on the MOE in bending of some woods”. *Politeknik Dergisi*, 20(3), 607-612. <https://dergipark.org.tr/en/pub/politeknik/issue/33116/339384>.

[11] Sotomayor-Castellanos, J. R., Giraldo-Forero, M.P., Gené-Sera, J., Correal-Mòdol, E., & Vilches-Casals, M. (2018). “Efecto de sales de boro en la densidad y en el módulo de elasticidad de tres maderas mexicanas”. *Ingeniería*, 28(2), 31-44. doi: 10.15517/ri.v28i2.31608.

[12] Sotomayor-Castellanos, J. R., & Correa-Jurado, S. (2016). “Retención de sales de boro en la madera y su efecto en el módulo de elasticidad dinámico”. *Revista Científica*. 24(1), 1-19. doi: 10.14483/udistrital.jour.RC.2016.24.a9.

[13] Sotomayor-Castellanos, J. R., & Villaseñor-Aguilar, J. M. (2016). “Retención de sales de boro en tres maderas mexicanas. Evaluación mecánica por vibraciones”. *Revista de Ciencia y Tecnología, Suplemento No. 1 Ingeniería y Tecnología*, 40-46. <https://www.researchgate.net/>.

[14] International Organization for Standardization. (2012). *ISO 3129:2012. Wood. Sampling methods and general requirements for physical and mechanical testing of small clear wood specimens*. Geneva: ISO.

[15] International Organization for Standardization. (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*. Geneva: ISO.

[16] International Organization for Standardization. (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*. Geneva: ISO.

[17] Ávila, L., Herrera, M., & Raya, D. (2012). *Preservación de la Madera en México*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

[18] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2014). *NMX-C-178-ONNCCE-2014. Industria de la Construcción—Preservadores para Madera – Clasificación y Requisitos*. México: ONNCCE.

[19] Dackermann, U., Crews, K., Kasal, B., Li, J., Riggio, M., Rinn, F., & Tannert, T. (2014). “In situ assessment of structural timber using stress-wave measurements”. *Materials and Structures*, 47(5), 787-803. doi: 10.1617/s11527-013-0095-4.

[20] Simsek, H., Baysal, E. & Peker, H. (2010). “Some mechanical properties and decay resistance of wood impregnated with environmentally friendly borates”. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2279-2284. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.028.

[21] Tondi, G., Wieland, S., Lemenager, N., Petutschnigg, A., Pizzi, A. & Thevenon, M.F. (2012). “Efficacy of tannin in fixing boron in wood: fungal and termite resistance”. *BioResources*, 7(1), 1238-1252. doi: 10.15376/biores.7.1.1238-1252.

[22] American Wood-Preservers’ Association. (2015). *P5-15 Standard for*

*Waterborne Preservatives*. Chicago: American Wood-Preservers' Association.

[23] Adanur, H., Fidan, M., & Yasar, S. (2017). "The technological properties of oriental beech (*Fagus orientalis* lipsky) impregnated with boron compounds and natural materials". *BioResources*, 12(1), 1647-1661. doi: 10.15376/biores.12.1.1647-1661.

[24] 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*, 15(1), 4-64. <https://www.researchgate.net/>.

[25] Sotomayor-Castellanos, J. R. (2020). "Módulo dinámico longitudinal determinado por ultrasonido en madera de tres angiospermas sólida y laminada". *Entreciencias*, 7(21): 1-13.

[26] Brancheriau, L., Baillères, H., Détienne, P., Gril, J., & Kronland, R. (2006). "Key signal and wood anatomy parameters related to the acoustic quality of wood for xylophone-type percussion instruments". *Journal of Wood Science*. 52(3), 270-273. doi: /10.1007/s10086-005-0755-2.

[27] Spycher, M., Schwarze, F. W. M. R., & Steiger, R. (2008). "Assessment of resonance wood quality by comparing its physical and histological properties". *Wood Science and Technology*, 2(4), 325-342. doi: 10.1007/s00226-007-0170-5.

[28] Alkadri, A., Carlier, C., Wahyudi, I., Gril, J., Langbour, P., & Brémaud, I. (2018). "Relationships between anatomical and vibrational properties of wavy sycamore maple". *IAWA Journal*, 39(1), 63-86. doi: 10.1163/22941932-20170185.

[29] Kartal, S. N., Hwang, W. J., & 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*, 198(1-3), 234-240. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.07.001.

[30] Moya, R., & Berrocal, A. (2015). "Evaluation of biodeterioration and the dynamic modulus of elasticity of wood in ten fast-growing tropical species in Costa Rica exposed to field testing". *Wood Research*, 63(3), 359-371. <http://www.woodresearch.sk/wr/201503/03.pdf>.