



## Retención de sales de boro en la madera y su efecto en el módulo de elasticidad dinámico

### Retention of Salts of Boron on the Wood and its Effect in the Dynamic Modulus of Elasticity

### Retenção de Sais de Boro em a Madeira e sua Efeito em o Módulo de Elasticidade Dinâmico

Javier Ramón Sotomayor Castellanos<sup>1</sup>

Sonia Correa Jurado<sup>2</sup>

**Fecha de recepción:** noviembre 2015

**Fecha de aceptación:** marzo 2016

**Para citar este artículo:** Sotomayor, J. & Correa, J. (2016). Retención de sales de boro en la madera y su efecto en el módulo de elasticidad dinámico. *Revista Científica*, 24, 90-99. **Doi:** [10.14483/udistrital.jour.RC.2016.24.a9](https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.RC.2016.24.a9)

#### Resumen

El diseño de productos y estructuras de madera requiere información sobre el efecto de sustancias protectoras en las propiedades mecánicas de la madera. El objetivo de la investigación fue impregnar con sales de boro madera de *Guazuma ulmifolia*, *Spathodea campanulata* y *Abies religiosa*, y determinar el efecto de la retención de las sales en la densidad, en la velocidad de ondas de esfuerzo y en el módulo de elasticidad dinámico. Se preparó una solución de sales de boro y se aplicó un tratamiento de impregnación con el método de baño caliente-frío. Se determinaron la densidad, la velocidad de ondas de esfuerzo y el módulo de elasticidad dinámico de probetas normalizadas de madera, antes y después del tratamiento. Las maderas de *G. ulmifolia*, de *S. campanulata* y de *A. religiosa* retuvieron cada una de ellas una cantidad diferente de sales de boro y retuvieron una cantidad de sales mayores a las recomendadas por las normas internacionales. La retención de

sales de boro no modificó de manera significativa las características físicas y mecánicas de la madera de *G. ulmifolia*. En contraste, la retención de las sales si afectó la densidad, la velocidad de las ondas de esfuerzo y el módulo de elasticidad dinámico a las maderas de *S. campanulata* y *A. religiosa*.

**Palabras Clave:** *Guazuma ulmifolia*, *Spathodea campanulata*, *Abies religiosa*, baño caliente-frío, densidad, métodos no destructivos, ondas de esfuerzo.

#### Abstract

The design of products and wooden structures requires information concerning the effect of protective substances on the mechanical properties of wood. The goal of the research was to impregnate *Guazuma ulmifolia*, *Spathodea campanulata* and *Abies religiosa* with boron salts and to assess the effect of the retention of the salts on the density, speed of stress waves, and dynamic modulus of elasticity. A boron salt solution was prepared and a hot-cold bath method of impregnation was applied. Wood density,

<sup>1</sup>. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México. Contacto: madera999@yahoo.com

<sup>2</sup>. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México. Contacto: cvuniv@hotmail.com

speed of stress waves and modulus of elasticity were assessed for standard specimens before and after treatment. Each of the woods: *G. ulmifolia*, *S. campanulata* and *A. religiosa* retains a different quantity of boron salts and they all retained a larger quantity of the salts than the amount recommended by international standards. The retention of boron salts did not significantly affect the physical and mechanical characteristics of the *G. ulmifolia* wood. In contrast, the retention of the salts affected the wood density, speed of the stress wave, and dynamic modulus of elasticity of *S. campanulata* and *A. religiosa* woods.

**Keywords:** *Guazuma ulmifolia*, *Spathodea campanulata*, *Abies religiosa*, hot-cold bath, density, nondestructive methods, stress waves.

### Resumo

A concepção de produtos e estruturas de madeira requerem informação relativa ao efeito de substâncias em proteger as propriedades mecânicas da madeira. O objetivo da pesquisa foi impregnar, com sais de boro, a madeira de *Guazuma ulmifolia*, *Spathodea campanulata* e *Abies religiosa* e avaliar o efeito da retenção dos sais na densidade, a velocidade das ondas de tensão e o módulo dinâmico da elasticidade. Um solução dos sais de boro foi preparada e um tratamento de banho quente-frio de impregnação foi aplicado. A densidade da madeira, a velocidade de ondas de tensão e módulo de elasticidade foram avaliados em amostras normalizada que correspondam à antes e após o tratamento. Cada um dos madeiras de *G. ulmifolia*, de *S. campanulata* e de *A. religiosa* retiveram uma quantidade diferente de sais de boro e mantiveram uma maior quantidade de sais que o recomendado pelas normas internacionais. A retenção de sais de boro não afetam significativamente as características físicas e mecânicas da madeira de *G. ulmifolia*. Em contraste, a retenção dos sais afetaram a densidade da madeira, a velocidade das ondas de tensão e o módulo de elasticidade dinâmico de *S. campanulata* e *A. Religiosa* madeiras.

**Palavras chave:** *Guazuma ulmifolia*, *Spathodea campanulata*, *Abies religiosa*, banho quente, densidade, métodos não destrutiva, ondas de tensão.

## Introducción

Para la industria de edificación con madera existe la incógnita acerca de que si los tratamientos de impregnación con sustancias protectoras al ataque de hongos e insectos, modifican la resistencia mecánica de vigas y columnas de madera. De ser así, es recomendable tomar en consideración este factor de variabilidad en el diseño y cálculo de estructuras (Köhler *et al.*, 2007).

Igualmente, una de las corrientes principales en tecnología de la madera es determinar la facilidad que presentan diferentes especies a métodos de protección de agentes de deterioro. Esto con el propósito de ampliar el abanico de especies para empleos en ambientes donde se requiere preservar la calidad estructural de la madera (Cruz, 2013).

En el mismo orden de ideas, la tendencia actual en la instrumentación para la investigación en ciencias de la madera, particularmente en su caracterización mecánica, es el emplear métodos de evaluación no destructivos. De esta forma se pueden estudiar especímenes de forma rápida y económica y sin alterar de manera significativa su estructura material (Pellerin & Ross, 2002).

Estas tres ideas se pueden combinar de tal forma que se consiga tratar con una solución protectora, una muestra representativa de madera de diferentes especies y determinar en la misma muestra su capacidad para retener la solución. Al mismo tiempo, medir su módulo de elasticidad dinámico antes y después del tratamiento, de tal manera que se pueda observar de manera práctica la influencia del tratamiento en un parámetro de ingeniería, por ejemplo, el módulo de elasticidad sin destruir o modificar de manera sustancial la pieza en estudio.

La retención de una sustancia protectora en la madera es el parámetro que indica la cantidad de solución que retiene una pieza de madera, después de un tratamiento de impregnación (Ávila *et al.*, 2012). Una de las sustancias más usadas son las sales de boro. Estas consisten en una mezcla de

Trihidróxido de boro (ácido bórico) y Tetraborato de sodio (borato de sodio). Su aplicación es una práctica eficiente para proteger a la madera del ataque de hongos e insectos (Tondi *et al.*, 2012).

Sus principales ventajas, respecto a otras sustancias protectoras, son: son inodoras, incoloras, inflamables y, sobre todo, de poca toxicidad (Tsunoda, 2001). Estas propiedades han generalizado su aplicación en elementos estructurales de edificaciones con madera. 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 (Obanda *et al.*, 2008).

El método de baño caliente-frío aprovecha la diferencia de presión ocasionada por la exposición de la madera a un medio acuoso con temperatura de 60 °C, de tal forma que el cambio brusco de temperatura por la inmersión de la madera caliente, en una solución de sales a temperatura de 20 °C, facilita la difusión de las sales al interior del plano leñoso (Walker, 2006). Así, se logran retenciones mayores a las sugeridas por la Asociación Americana de preservadores de madera, la cual recomienda una retención mínima de sales de boro de 2.72 kg/m<sup>3</sup>, en la madera para elementos estructurales empleados en interiores (AWPS, 2014).

La técnica de carácter no destructivo de ondas de esfuerzo aprovecha la capacidad de la madera para almacenar energía, en este caso de una onda mecánica, para medir la velocidad a la que viaja. Ponderando este parámetro con la densidad, es posible determinar el módulo de elasticidad dinámico de manera no destructiva en probetas de madera (Pellerin & Ross, 2002).

Por su parte, el módulo de elasticidad dinámico de la madera es el parámetro básico para el cálculo estructural. Particularmente el módulo determinado con solicitaciones dinámicas, por ejemplo las ondas de esfuerzo, es necesario para el diseño sísmico (Filiatrault & Folz, 2002).

Las especies *Guazuma ulmifolia* Lam., *Spathodea campanulata* Buch.-Ham. ex DC. y *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. son endémicas de

México y Centro América y presentan potencial para la fabricación de productos de alto valor agregado. Información sobre sus características físicas y mecánicas está reportada por Sotomayor-Castellanos (2015). Sin embargo, no existe información sobre sus propiedades de retención de sustancias protectoras, ni de su posible efecto sobre la densidad, la velocidad de las ondas de esfuerzo y el módulo de elasticidad dinámico.

El objetivo de la investigación fue impregnar con sales de boro madera de *G. ulmifolia*, *S. campanulata* y *A. religiosa* y determinar el efecto de la retención de las sales en la densidad, la velocidad de ondas de esfuerzo y en el módulo de elasticidad dinámico. El método de impregnación fue de tipo baño caliente-frío. La técnica que se empleó para determinar el módulo de elasticidad dinámico antes y después del tratamiento fue la de ondas de esfuerzo.

## Métodos y materiales

Se recolectó madera de *G. ulmifolia*, *S. campanulata* y *A. religiosa* en aserraderos del Estado de Michoacán, México. La madera se almacenó 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 el peso de la madera fue constante. Para cada una de las especies, se prepararon lotes de 35 probetas con dimensiones de 0.02 m x 0.02 m x 0.32 m, respectivamente en las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso y de acuerdo con la norma ISO 3129:2012 (ISO, 2012). La madera no contenía anomalías estructurales y defectos de crecimiento. Con el objeto de evitar flujo excesivo de líquidos en los extremos de las probetas, sus caras laterales fueron cubiertas con pintura vinílica.

Se prepararon 30 litros de solución de sales de boro con una concentración al 3%. La solución consistió en Ácido bórico (39.4%) y Borato de sodio (60.6%) de acuerdo con la norma NMX-C-410-ONNCCE-1999 (ONNCCE, 1999).

Las probetas se impregnaron con el método baño caliente-frío siguiendo el protocolo propuesto por Ávila *et al.* (2012). La madera se sumergió durante ocho horas en un baño de agua con temperatura de 60 °C y presión atmosférica. Posteriormente, las probetas se sumergieron durante 16 horas en un baño frío, con la solución de sales de boro, temperatura de 23 °C y presión atmosférica.

Los pesos y dimensiones de las probetas fueron medidos antes y después del tratamiento. Posteriormente, se determinaron la absorción y la retención de las sales en cada probeta. Se realizaron dos bloques de pruebas de ondas de esfuerzo: uno antes y otro después del tratamiento de impregnación.

La absorción se determinó con la fórmula (Ávila *et al.*, 2012):

$$A = \frac{P_2 - P_1}{V} \quad (1)$$

Dónde:

A= Absorción (kg/m<sup>3</sup>).

P<sub>1</sub>= Peso inicial de la probeta antes del tratamiento (kg).

P<sub>2</sub>= Peso final de la probeta después del tratamiento (kg).

V= Volumen de la probeta después del tratamiento (m<sup>3</sup>).

La retención se determinó con la relación (Simsek *et al.*, 2010):

$$R = \frac{A \times C}{100} \quad (2)$$

Dónde:

R= Retención (kg/m<sup>3</sup>).

A= Absorción neta (kg/m<sup>3</sup>).

C= Concentración de la sustancia preservante (%).  
La densidad de la madera fue calculada con la fórmula (Bodig & Jayne, 1982):

$$\rho_{CH} = \frac{P_{CH}}{V_{CH}} \quad (3)$$

Donde:

$\rho_{CH}$ = Densidad (kg/m<sup>3</sup>).

P<sub>CH</sub>= Peso de la probeta al momento del ensayo (kg).

V<sub>CH</sub>= Volumen de la probeta al momento del ensayo (m<sup>3</sup>).

El contenido de humedad inicial de la madera fue determinado con tres grupos de probetas complementarias, correspondientes a cada una de las especies. El contenido de humedad se calculó con la fórmula (Bodig & Jayne, 1982):

$$CH = \frac{P_1 - P_2}{P_2} \quad (4)$$

Donde:

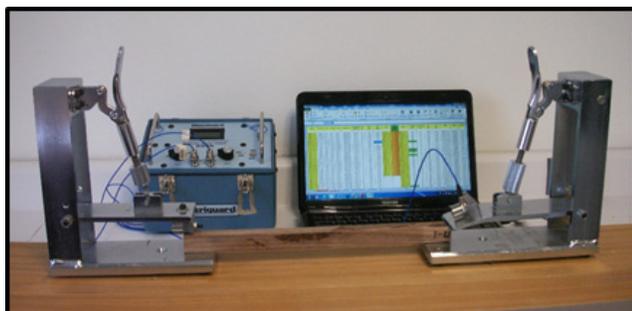
CH= Contenido de humedad (%).

P<sub>1</sub>= Peso de la probeta al momento del ensayo (kg).

P<sub>2</sub>= Peso de la probeta en estado seco (kg).

Una vez terminado el baño caliente-frío y realizadas las mediciones pertinentes, las probetas se almacenaron por tres meses en las mismas condiciones en que se estabilizó la madera antes del tratamiento, hasta que alcanzaron un peso constante. Posteriormente, se realizaron las pruebas de ondas de esfuerzo.

Las pruebas de ondas de esfuerzo consistieron en suministrar un impacto en un extremo de la probeta y provocar una onda de esfuerzo a través de la dirección longitudinal y registrar el tiempo de transmisión necesario para que la onda llegue al extremo opuesto de la probeta. Para tal propósito se utilizó el aparato *Metricguard*® posicionado en un dispositivo para pruebas no destructivas diseñado *ad-hoc* (figura 1). Con la longitud de las probetas y el tiempo de transmisión de las ondas de esfuerzo se calculó su velocidad.



**Figura 1.** Pruebas de ondas de esfuerzo.  
**Fuente:** elaboración propia de los autores.

A partir de la ecuación de onda:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (5)$$

Donde:

$u$  = Vector desplazamiento.  
 $x$  = Coordenada espacial.  
 $t$  = Coordenada temporal.  
 $v$  = Velocidad de onda.

Se calculó el módulo de elasticidad dinámico con la fórmula (Pellerin & Ross, 2002):

$$E_{oe} = v_{oe}^2 \rho_{CH} \quad (6)$$

Donde:

$E_{oe}$  = Módulo de elasticidad dinámico (Pa).  
 $v_{oe}$  = Velocidad de las ondas de esfuerzo (m/s).  
 $\rho_{CH}$  = Densidad de la madera a un contenido de humedad CH ( $\text{kg/m}^3$ ).

La velocidad de las ondas de esfuerzo medida y el módulo dinámico calculado, se etiquetan con el subíndice *oe* para identificarlos como parámetros derivados de pruebas dinámicas de ondas de esfuerzo.

### Diseño experimental

Se diseñaron tres experimentos siguiendo las recomendaciones de Gutiérrez & de la Vara (2012).

Las variables de respuesta fueron la densidad, la velocidad de las ondas de esfuerzo y el módulo de elasticidad dinámico. El método con sales de boro se consideró el factor de variación. Caso particular fue la retención que se consideró variable de respuesta después del tratamiento. El primer experimento consistió en pruebas de normalidad, calculando el apuntalamiento y el sesgo, para confirmar que los datos de las muestras provenían de distribuciones normales.

Cuando la prueba de normalidad verificó que los datos de las muestras provenían de distribuciones normales, se procedió a realizar el segundo experimento que consistió en pruebas *t* de Student de diferencias de medias ( $\bar{x}$ ) para un nivel de confianza de 95%. La hipótesis nula  $H_0: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 = 0$  se contrastó con la hipótesis alternativa  $H_A: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 \neq 0$ . Los subíndices 1 y 2 representan el valor de las variables de respuesta para antes y después del tratamiento. Se efectuaron pruebas con 35 réplicas (probetas), antes y después del tratamiento, totalizando 70 muestras observadas para cada una de las cuatro variables de respuesta.

El tercer experimento consistió en un análisis de regresión lineal entre la retención como variable explicativa de las variables densidad, velocidad de las ondas de esfuerzo y módulo de elasticidad dinámico, datos correspondientes a resultados después del tratamiento y para cada una de las tres especies de madera. Los cálculos estadísticos fueron realizados con el programa *Statgraphics®*.

### Resultados y discusión

La tabla 1 presenta la densidad, la velocidad de las ondas de esfuerzo y el módulo de elasticidad dinámico para antes y después del tratamiento de *G. ulmifolia*, *S. campanulata* y *A. religiosa*. Además, se presenta la retención de sales de boro. Para cada parámetro, se presentan la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

La madera tuvo un contenido de humedad inicial promedio de 11 %, en un intervalo que va desde 9,5 % hasta 12,7 %, y con un coeficiente de variación de 3,5 %. La madera se acondicionó a un estado de humedad seco y homogéneo entre especies, antes y después del tratamiento. De tal forma que la variación en el contenido de humedad de la madera no intervino de manera significativa en los resultados.

La densidad de la madera de las tres especies es proporcional a la reportada para las mismas maderas en el Banco FITECMA de características físicas y mecánicas de maderas mexicanas (Sotomayor-Castellanos, 2015). Igualmente, los coeficientes de variación para la densidad, la velocidad de las ondas de esfuerzo y para el módulo de elasticidad dinámico son semejantes a los presentados en esta referencia.

Los valores promedio de retención de sales de boro para las especies, presentados en la tabla 1, fueron mayores que el límite inferior tóxico de retención sugerido por la Asociación Americana de

preservadores de madera, que recomienda una retención mínima de sales de boro de 2,72 kg/m<sup>3</sup> (AWPS, 2014). De manera que las maderas de *G. ulmifolia*, *S. campanulata* y *A. religiosa* pueden ser impregnadas con sales de boro empleando el método *baño caliente-frío* cuando son empleadas como elementos estructurales en interiores.

Los resultados de las pruebas de normalidad de apuntalamiento y de sesgo verificaron que los datos de todas las muestras, para antes y después del tratamiento, provienen de distribuciones normales. Igualmente, para la variable retención, se confirmó que las muestras provienen de distribuciones normales (tabla 2). Estos resultados permitieron efectuar las pruebas de diferencias de medias.

La tabla 3 presenta los resultados de las pruebas de diferencias de medias para las variables densidad, velocidad de las ondas de esfuerzo y módulo de elasticidad dinámico para antes y después del tratamiento. Si el valor calculado de  $P_{(\alpha=0.05)}$  es menor a 0,05, se puede rechazar la hipótesis nula en favor de la alterna.

**Tabla 1.** Densidad, velocidad de las ondas de esfuerzo y módulo de elasticidad dinámico.

	Antes del tratamiento			Después del tratamiento			
	$\rho_{CH}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$v_{oe}$ (m/s)	$E_{oe}$ (MPa)	$\rho_{CH}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$v_{oe}$ (m/s)	$E_{oe}$ (MPa)	R (kg/m <sup>3</sup> )
<i>G. ulmifolia</i>							
$\bar{x}$	730	3033	6735	749	3056	6994	9,70
$\sigma$	46	300	1095	42	215	749	0,40
CV	6.37	9,88	16,27	5,61	7,04	10,71	4,17
<i>S. campanulata</i>							
$\bar{x}$	357	2831	2858	336	2622	2329	14,31
$\sigma$	30	237	395	26	319	566	0,60
CV	8.52	8,38	13.81	7,63	12.15	24,32	4,20
<i>A. religiosa</i>							
$\bar{x}$	419	4124	7190	434	4466	8669	7,23
$\sigma$	28.67	355	1320	28	122	887	1,26
CV	6.83	8,60	18,36	6,44	2,73	10,24	17,42

$\rho_{CH}$ = Densidad;  $v_{oe}$ = Velocidad de las ondas de esfuerzo;  $E_{oe}$ = Módulo de elasticidad dinámico; R= Retención;  $\bar{x}$ = Media;  $\sigma$ = Desviación estándar; CV= Coeficiente de variación en por ciento.

**Fuente:** elaboración propia.

Para la madera de *G. ulmifolia* no se rechazó la hipótesis nula para las variables densidad, velocidad de las ondas de esfuerzo y módulo de elasticidad dinámico. Es decir, el tratamiento no afectó estas características físicas y mecánicas de manera significativa. En contraste, para las maderas de *S. campanulata* y *A. religiosa*, sí se rechazó la hipótesis nula en favor de la alterna. De tal forma, que el tratamiento sí afectó estas variables de manera significativa (tabla 3).

De la comparación de los resultados de la tabla 1 se deriva que la magnitud de la densidad de la madera de *G. ulmifolia* aumentó 2 %, la velocidad de las ondas de esfuerzo se incrementó 7,6 % y el módulo de elasticidad dinámico acrecentó 3,8 %. Igualmente, para la madera de *A. religiosa* la densidad aumentó 3,6 %, la velocidad de las ondas de esfuerzo incrementó 8,3 % y el módulo de elasticidad dinámico aumentó 20,6 %. En contraste, en la madera de *S. campanulata* la densidad disminuyó 5,9 %, la velocidad de las ondas de esfuerzo se

redujo 7,38 % y el módulo de elasticidad dinámico decreció 18,5 %. De manera que cada especie reaccionó en forma diferente al tratamiento de impregnación aplicado.

La tabla 4 presenta los resultados de las pruebas de diferencias de medias para la retención de sales de boro. Las pruebas de diferencias de medias de la variable retención entre las tres especies resultó en una diferencia significativa para las tres especies estudiadas. Es decir, cada especie retiene una cantidad diferente de sales de boro. Estas diferencias entre especies pueden ser aplicadas en gran parte, por la diversidad en la estructura anatómica de cada madera, combinada con las diferencias en las densidades de cada especie. En efecto, la densidad de la madera es una representación de la porosidad del material y la estructura anatómica se refiere al acomodo del tejido celular. De ahí que cada especie sometida a las mismas condiciones de impregnación retenga cantidades diferentes de sales de boro.

**Tabla 2.** Resultados de las pruebas de apuntalamiento y sesgo.

	<i>Guazuma ulmifolia</i>		<i>Spathodea campanulata</i>		<i>Abies religiosa</i>	
	A	S	A	S	A	S
$\rho_{CH}$	0,4859	-1,0136	-0,5997	0,9193	-0,5153	0,6357
$v_{oe}$	-1,4542	-0,4985	1,7268	1,6855	1,4508	2,1534
$E_{oe}$	-1,1343	-1,3287	1,8081	1,5162	-0,9079	-1,6229
R	-0,7448	0,7940	-0,6170	0,2483	-0,1306	1,4804

$\rho_{CH}$ = Densidad;  $v_{oe}$ = Velocidad de las ondas de esfuerzo;  $E_{oe}$ = Módulo de elasticidad dinámico; R= Retención; A= apuntalamiento; S= Sesgo. Rango de normalidad para el 95 % de confianza: -2, +2.

**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 2.** Resultados de las pruebas de apuntalamiento y sesgo.

	<i>Guazuma ulmifolia</i>	<i>Spathodea campanulata</i>	<i>Abies religiosa</i>
$\rho_{CHat}$ vs. $\rho_{CHdt}$	0,0748	0,0024*	0,0399*
$v_{oeat}$ vs. $v_{oedt}$	0,7213	0,0027*	< 0,0001*
$E_{oeat}$ vs. $E_{oedt}$	0,2518	< 0,0001*	< 0,0001*

$\rho_{CH}$ = Densidad;  $v_{oe}$ = Velocidad de las ondas de esfuerzo;  $E_{oe}$ = Módulo de elasticidad dinámico; at= Antes del tratamiento; dt= Después del tratamiento. \* $P(\alpha = 0,05) < 0,05$ : se puede rechazar la hipótesis nula en favor de la alterna.

**Fuente:** elaboración propia.

Si se analiza cada especie en particular, para la madera de *G. ulmifolia*, de *S. campanulata* y de *A. religiosa*, las correlaciones calculadas para la densidad, la velocidad de las ondas de esfuerzo y el módulo de elasticidad dinámico, en función de la retención, resultaron con coeficientes de determinación ( $R^2$ ) en un intervalo de 0,02 a 0,22. Es decir, no se puede relacionar el efecto de la retención de sales de boro con alguna de las variables de respuesta estudiadas. Este resultado se describe en las figuras 2a, 2b y 2c. Las nubes de dispersión de los valores no sugieren ninguna tendencia en el comportamiento de las variables de respuesta en relación al parámetro retención. En cada una de las figuras 2a, 2b y 2c se presentan los 105 puntos correspondientes a 35 mediciones en cada especie. Sin embargo, dado que hay valores similares y debido a un efecto de escala, aparentemente no se detallan todos los resultados.

La extensión de las nubes de dispersión a lo largo del eje correspondiente a la retención (figuras 2a, 2b y 2c), se aprecian con la magnitud de los coeficientes de variación para después del tratamiento, presentados en la tabla 1. La variación de la retención de sales de boro es mayor para *A. religiosa*, en comparación con *G. ulmifolia* y *S.*

*campanulata*. La nube de la densidad, correspondiente a *G. ulmifolia*, se sitúa por arriba de las de *S. campanulata* y *A. religiosa* (figura 2a). Sin embargo, encuentra un valor intermedio cuando se trata de la velocidad de las ondas de esfuerzo (figura 2b) y del módulo de elasticidad dinámico (figura 2c).

Sin embargo, si se consideran los datos de las 105 probetas agrupados en las tres nubes de las figuras 2b y 2c, se observa una tendencia a la disminución de la velocidad de las ondas de esfuerzo y del módulo de elasticidad dinámico a medida que la retención aumenta.

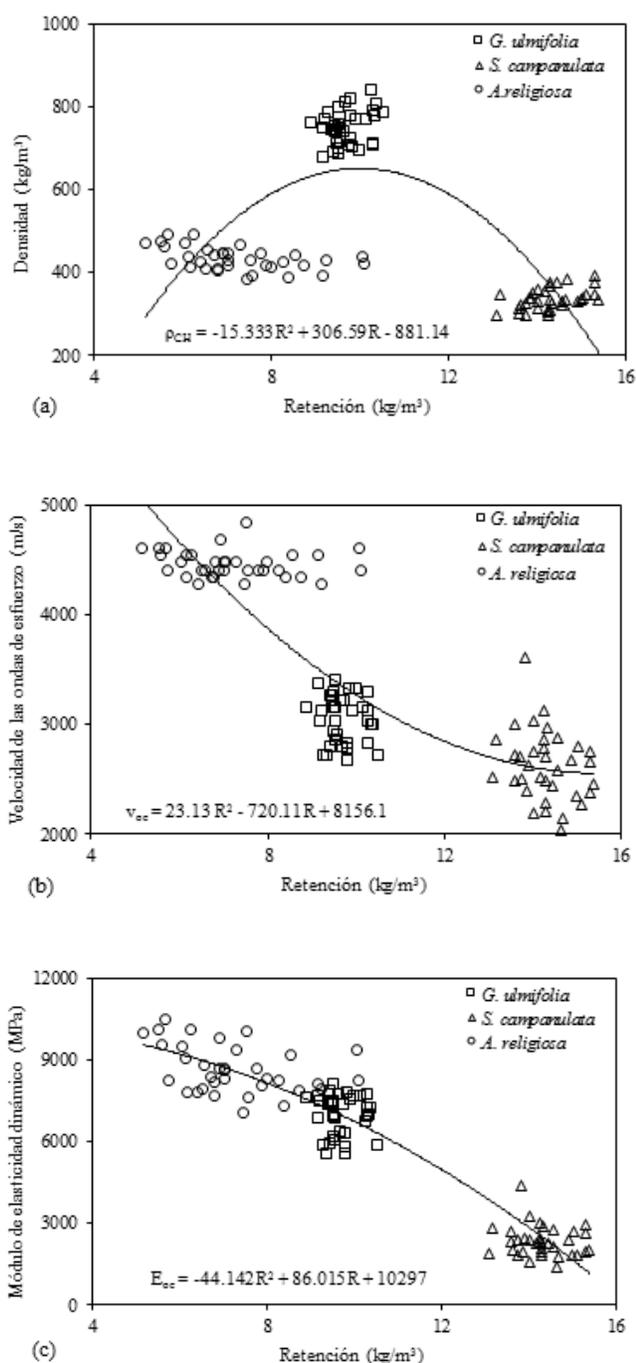
Vistas de esta manera, las relaciones de la densidad, a la velocidad de ondas de esfuerzo y al módulo de elasticidad dinámico, en función de la retención, resultan en regresiones polinomiales indicadas en las figuras 2a, 2b y 2c. Los coeficientes de determinación correspondientes son: para la densidad  $R^2= 0.56$ , para la velocidad de las ondas de esfuerzo  $R^2= 0.75$  y para el módulo de elasticidad dinámico  $R^2= 0.90$ . Estos coeficientes de determinación son aceptables para proponer que existe una relación entre las variables velocidad de las ondas de esfuerzo y módulo de elasticidad dinámico, pero no para el caso de la densidad de la madera.

**Tabla 4.** Resultados de las pruebas de diferencias de medias para la retención.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	904.521	2	452.2610	643.66	0.0000
Intra grupos	71.669	102	0.7026		
Total	976.190	104			
Retención		Casos	Media		Grupos Homogéneos
<i>A. religiosa</i>		35	7.2266		X**
<i>G. ulmifolia</i>		35	9.6971		X
<i>S. campanulata</i>		35	14.3089		X
Contraste		Significado	Diferencia		+/- Límites
<i>G. ulmifolia</i> vs. <i>S. campanulata</i>		*	-4.6117		0.3974
<i>G. ulmifolia</i> vs. <i>A. religiosa</i>		*	2.4706		0.3974
<i>S. campanulata</i> vs. <i>A. religiosa</i>		*	7.0823		0.3974

\* $P_{(\alpha=0.05)} < 0.05$ : se puede rechazar la hipótesis nula en favor de la alterna, diferencias significativas; \*\*: No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's; GL = Grados de libertad.

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 2.** Dispersión de los valores después del tratamiento de: (a) la densidad ( $\rho_{CH}$ ), (b) la velocidad de las ondas de esfuerzo ( $v_{oe}$ ) y (c) el módulo de elasticidad dinámico ( $E_{oe}$ ), en función de la retención ( $R$ ), para madera de *G. ulmifolia*, de *S. campanulata* y de *A. religiosa*.

**Fuente:** elaboración propia.

Estos 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. Sin embargo, el módulo de elasticidad dinámico se calculó empleando la fórmula (6), donde la densidad y la velocidad de las ondas de esfuerzo forman parte. De tal suerte que el módulo de elasticidad dinámico es un parámetro de segundo nivel, es decir, que depende de las mediciones directas de la densidad y la velocidad de las ondas de esfuerzo. Estos parámetros fueron determinados a partir de mediciones directas sobre las probetas de madera: la densidad está calculada a partir de las mediciones del peso y de las dimensiones de la probeta. Por su parte, la velocidad de las ondas de esfuerzo se deriva de la medición directa de la longitud de recorrido de las ondas de esfuerzo y del tiempo de transmisión, parámetro igualmente medido directamente sobre la probeta.

## Conclusiones

Se impregnó con sales de boro la madera de *G. ulmifolia*, de *S. campanulata* y de *A. religiosa* y se determinaron su densidad, la velocidad de ondas de esfuerzo y el módulo de elasticidad dinámico correspondientes a antes y después del tratamiento.

Las maderas de *G. ulmifolia* y *A. religiosa* pueden ser impregnadas con sales de boro con el método baño caliente-frío, sin reducir las propiedades físicas y mecánicas observadas. Para el caso de *S. campanulata* es recomendable considerar el efecto del método de impregnación y de las sales de boro para el cálculo y diseño de productos y estructuras de madera.

La técnica de ondas de esfuerzo permitió medir en una misma muestra de madera, la velocidad de las ondas de esfuerzo y determinar de manera práctica y rápida el módulo de elasticidad dinámico.

En la investigación, la estrategia experimental se orientó hacia el análisis de resultados especie

por especie, de acuerdo al paradigma contemporáneo en ciencias de la madera que rige en investigación e ingeniería de la madera: es necesario caracterizar el comportamiento mecánico de la madera con un enfoque de experimentación de caso por caso de una especie en particular. Cada procedimiento debe estar referido a las variables de referencia de las condiciones de ensayo, por ejemplo, la densidad y el contenido de humedad de la madera, y con datos derivados de un tamaño de muestra observada estadísticamente representativa. Una vez teniendo observaciones integrantes y estadísticamente representativas, se pueden proponer tendencias en el comportamiento general para una especie en específico y/o por agrupamiento de varias de ellas que denoten una tendencia similar.

## Referencias bibliográficas

- American Wood-Preservers' Association (AWPS). (2014). *P5-07 Standard for Waterborne Preservatives*. Chicago: American Wood-Preservers' Association.
- Ávila Calderón, L. E. A., Herrera Ferreyra, M. A., & Raya González, D. (2012). *Preservación de la Madera en México*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Bodig, J. & Jayne, B. A. (1982). *Mechanics of wood and wood composites*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Cruz de León, J. (2013). *Manual para la protección contra el deterioro de la madera*. México: Comisión Nacional Forestal.
- Filiatrault, A. & Folz, B. (2002). Performance-Based Seismic Design of Wood Framed Buildings. *Journal of Structural Engineering*, 128(1), 39-47.
- Gutiérrez Pulido, H. & de la Vara Salazar, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. México: Mc Graw Hill.
- Köhler, J., Sørensen, J. D. & Faber, M. H. (2007). Probabilistic modeling of timber structures. *Structural Safety*, 29(4), 255-267.
- International Organization for Standardization (ISO). (2012). *ISO 3129: (2012). Wood - Sampling methods and general requirements for physical and mechanical tests*. Brussels: International Organization for Standardization.
- 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.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). (1999). *Norma Mexicana NMX-C-410-ONNCCE-1999*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- Pellerin, R. F. & Ross, R. J. (2002). *Nondestructive Evaluation of Wood*. Peachtree Corners: Forest Products Society.
- 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.
- Sotomayor-Castellanos, J. R. (2015). *Banco FI-TECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas*. México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- 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.
- Tsunoda, K. (2001). Preservatives properties of vapor-boron-treated wood and wood based composites. *Journal of Wood Science*, 47(2), 149-53.
- Walker, J. C. F. (2006). *Primary Wood Processing. Principles and Practice*. Dordrecht: Springer.

