

Efecto de la impregnación con boro sobre la densidad y módulo dinámico de tres maderas angiospermas

Effect of boron impregnation on the density and dynamic modulus of three angiosperm woods

DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.18.2.2022.01>

Artículo de Investigación Científica. Fecha de Recepción: 15/04/2021. Fecha de Aceptación: 10/06/2022.

Luz Elena Alfonsina Ávila-Calderón 

Universidad Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia (México)
lea.avilacalderon@gmail.com

Javier Ramón Sotomayor-Castellanos 

Universidad Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia (México)
madera999@yahoo.com

Para citar este artículo:

L. Ávila-Calderón y J. Sotomayor-Castellanos, “Efecto de la impregnación con boro sobre la densidad y módulo dinámico de tres maderas angiospermas” *INGE CUC*, vol. 18, no. 2, pp. 1–12. DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.18.2.2022.01>

Resumen

Introducción— La madera es un material biodegradable y su empleo requiere información sobre el efecto de sustancias protectoras en sus propiedades mecánicas. De tal forma que es importante desarrollar tecnología para su conservación cuando está en servicio.

Objetivo— Impregnar con sales de boro, empleando el método de baño caliente-frío, probetas normalizadas de *Fraxinus americana*, *Albizia plurijuga* y *Spathodea campanulata*.

Metodología— Se determinó la retención de sales de boro, densidad, velocidad de onda y módulo dinámico de la madera. Se realizaron pruebas de ondas de esfuerzo antes y después del tratamiento de impregnación del estudio.

Resultados— La retención aumenta a medida que la concentración se incrementa y disminuye a medida que la densidad de la madera aumenta. No se observaron diferencias estadísticamente significativas entre las muestras de las densidades y las velocidades de onda de cada especie. Para los módulos de elasticidad de *S. campanulata* no se encontraron diferencias. Para *F. americana* y *A. plurijuga* sí se identificaron diferencias.

Conclusiones— Los resultados sugieren que la capacidad de retención de sales de boro de la madera depende, principalmente, de la especie. Los valores promedio de la retención de sales de boro para las concentraciones de 3% fueron mayores que el límite inferior tóxico de retención para satisfacer los requerimientos mínimos de las normas para madera utilizada en espacios interiores. Para fines de diseño y cálculo ingenieril, es recomendable considerar el alcance de los resultados de esta investigación que se limita a probetas de pequeñas dimensiones.

Palabras clave— Tecnología de la madera; Baño caliente-frío; *Spathodea campanulata*; *Fraxinus Americana*; *Albizia plurijuga*

Abstract

Introduction— Wood is a biodegradable material and its use requires information on the effect of protective substances on its mechanical properties. In such a way that it is important to develop technology for its conservation when it is in service.

Objective— To impregnate with boron salts using the hot-cold bath process test specimens of *Fraxinus americana*, *Albizia plurijuga* and *Spathodea campanulata*.

Methodology— Boron salt retention, density, wave velocity and dynamic modulus of the wood were determined. Stress wave tests were performed before and after the impregnation treatment.

Results— The retention increases as the concentration increases and decreases as the density of the wood increases. No statistically significant differences were observed between the density and wave velocity samples of each species. No differences were found for the elasticity modules of *S. campanulata*. For *F. americana* and *A. plurijuga* differences were identified.

Conclusions— The results suggest that the retention capacity of boron salts from wood depends mainly on the species. The average values of boron salt retention for concentrations of three percent were greater than the lower toxic retention limit to meet the minimum requirements of the standards for wood used indoors. For engineering design and calculation purposes, it is advisable to consider the scope of the results of this research that is limited to small-sized specimens.

Keywords— Wood technology; Hot-cold bath; *Spathodea campanulata*; *Fraxinus americana*; *Albizia plurijuga*

I. INTRODUCCIÓN

La madera es una sustancia biodegradable. Para utilizarla como material de ingeniería es necesaria la caracterización de sus propiedades físico-mecánicas y contar con información confiable sobre su protección [1]-[3]. De tal forma que es importante desarrollar tecnología para su conservación cuando está en servicio. Por ejemplo, el impregnado con sales de boro es usado como protección contra el fuego [4]-[5], y como preservante frente al deterioro por agentes biológicos [6]-[7], y climáticos [6]-[8].

Las sales de boro son sustancias amigables con el medio ambiente [9]-[10], sin embargo, pueden modificar el color de la madera [11]-[12], sus propiedades higroscópicas [13]-[14], y su comportamiento al fuego [15]-[16]. La bibliografía acerca de los cambios en las propiedades físico-mecánicas reporta resultados para cada especie y de acuerdo al procedimiento aplicado [17]-[21].

Las mediciones de retención, densidad, velocidad de onda y módulo dinámico orientan sobre la idoneidad de una madera para su posible protección y empleo en la industria e ingeniería de la madera. La retención de una sustancia protectora es el parámetro que indica la cantidad de solución que retiene una pieza de madera, después de un tratamiento de impregnación [22]. Por su parte, el módulo dinámico se determina con la densidad de la madera y la velocidad de onda. Existen métodos no destructivos que permiten estimar, en una misma muestra de madera, el módulo dinámico antes y después de un tratamiento de impregnado [23]-[24]. Entre las técnicas más empleadas se encuentran las pruebas que utilizan ondas de esfuerzo [25]-[29].

En la revisión de bibliografía relativa al tema de estudio no se encontró información para las especies *Fraxinus americana* L. [48] y *Albizia plurijuga* (Standl.) [49], con excepción del trabajo de la UMSNH [30] con *Spathodea campanulata* (P. Beauv) [50]. Este escenario sugiere la pregunta ¿La impregnación con sales de boro modifica la densidad, la velocidad de onda y el módulo dinámico de estas maderas? Para responder, la investigación plantea la hipótesis de trabajo siguiente: para probetas de pequeñas dimensiones de madera de estas especies, el tratamiento de impregnación con sales de boro en concentraciones de 1%, 2% y 3% no modifica los valores medios de las densidades, de las velocidades de onda ni de los módulos dinámicos determinados con ondas de esfuerzo. Además, al interior de una especie las retenciones son diferentes. Para verificar esta hipótesis el objetivo de la investigación fue impregnar estas maderas con sales de boro y determinar los parámetros mencionados.

II. METODOLOGÍA

Se adquirieron piezas de madera aserrada de *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga* en establecimientos comerciales del estado de Michoacán en México (17° 55' y 20° 24' de latitud Norte y 100° 04' y 103° 44' de longitud Oeste). La madera se acondicionó durante 12 meses en una cámara con temperatura de 20°C y humedad relativa de 65% hasta que alcanzó su contenido de humedad en equilibrio, en promedio, de 10%. Se prepararon, para cada especie, 40 probetas con dimensiones de 0.02 m × 0.02 m de sección y 0.4 m de largo, orientadas respectivamente en las direcciones radial, tangencial y longitudinal de la madera, de acuerdo a la norma ISO 3129:2019 [31]. Las probetas contenían sólo madera de duramen y estaban libres de defectos de crecimiento.

El contenido de humedad y la densidad se calcularon simultáneamente con un grupo adicional de 20 probetas recortadas de un extremo de las probetas después de las pruebas y con dimensiones de 0.02 m × 0.02 m × 0.06 m. El contenido de humedad se determinó por el método de diferencia de pesos de acuerdo a la norma ISO 13061-1:2014 [32]. La densidad de la madera para cada una de las tres concentraciones se determinó de acuerdo a la norma ISO 13061-2:2014 [33].

A. Proceso de impregnación

Las probetas se impregnaron con el método baño caliente-frío siguiendo el protocolo propuesto por la UnB [22]. Se prepararon 30 litros de solución 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 [34]. 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.

Después del impregnado las probetas se acondicionaron durante 8 meses en las mismas condiciones en que se estabilizó la madera antes del tratamiento (temperatura de 20 °C y humedad relativa del aire de 65 %) hasta que alcanzaron un peso constante y se fijaron las sales de boro en la madera.

Las retenciones se determinaron a partir de (1) [35]:

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

Donde:

R = Retención (kg/m³).

P_{DT} = Peso de la probeta después del tratamiento (kg).

P_{AT} = Peso de la probeta antes del tratamiento (kg).

C = Concentración de sales de boro.

V_{DT} = Volumen de la probeta después del tratamiento (m³).

B. Pruebas de ondas de esfuerzo

Los ensayos consistieron en aplicar un impacto en la dirección longitudinal en un extremo de la probeta para provocar ondas de esfuerzo a través de la madera. Con un acelerómetro emisor, posicionado en el aparato *Metriguard*[®], y se registró el tiempo inicial (Fig. 1). En el otro extremo de la probeta, en un segundo acelerador receptor, se registró el tiempo de transmisión de las ondas de esfuerzo. La velocidad de onda en la dirección longitudinal de la madera se calculó con el valor promedio de tres mediciones del tiempo de transmisión dividido entre la distancia entre los acelerómetros.

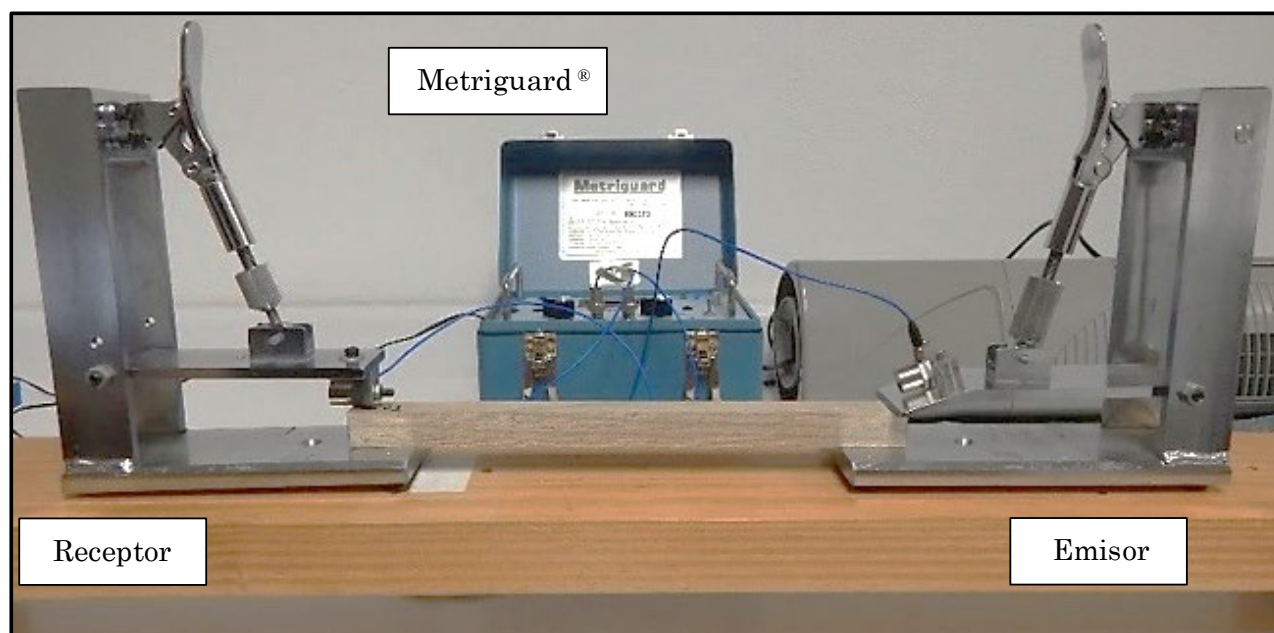


Fig. 1. Configuración experimental para los ensayos de ondas de esfuerzo.
Fuente: Autores.

Por su parte, los módulos dinámicos se determinaron mediante (2) [29]:

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

Donde:

E_{oe} = Módulo dinámico (N/m²).

ρ_{CH} = Densidad de la madera (kg/m³).

v_{oe} = Velocidad de onda de esfuerzo (m/s).

C. Diseño experimental

La unidad experimental consistió en madera de tres especies: *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga*. Se evaluaron 40 réplicas de cada una de ellas. El tratamiento de impregnación se consideró el factor de variación que modificó a la madera en dos estados: Antes del Tratamiento (AT) y Después del Tratamiento (DT). Así, se estudiaron 120 probetas agrupadas en seis muestras. Las variables de respuesta fueron las Retenciones (R), las densidades (ρ_{CH}), las velocidades de onda (v_{oe}) y los módulos dinámicos (E_{oe}). Se determinó su media (\bar{x}), su desviación estándar (σ) y su coeficiente de variación ($CV = \sigma/\bar{x}$). Para cada par de muestras (AT vs. DT) se realizaron pruebas de normalidad, así como de verificación y análisis de varianza. La hipótesis nula ($P > 0.05$) se contrastó con la hipótesis alterna ($P \leq 0.05$). Los subíndices 1 y 2 representan el valor de las variables de respuesta antes del tratamiento y después del tratamiento, respectivamente. Se calcularon correlaciones lineales ($y = ax \pm b$) y los coeficientes de determinación (R^2) entre las velocidades de onda y los módulos dinámicos en función de las densidades, tanto antes como después del tratamiento. Por último, los resultados de esta investigación se compararon con los datos reportados en las referencias.

III. RESULTADOS

Las retenciones decrecen a medida que las densidades aumentan diferenciando a las tres maderas, tal como se puede observar en la [Tabla 1](#) y se incrementan proporcionalmente a las concentraciones de las sales de boro, como se desprende de la [Fig. 2](#). Los coeficientes de variación de las retenciones fueron en promedio 9.3% para *S. campanulata*, 8.7% para *F. americana* y 7.7% para *A. plurijuga*. Es decir, disminuyen a medida que las densidades de la madera de cada especie aumentan.

TABLA 1.

RETENCIÓN, DENSIDAD DE LA MADERA, VELOCIDAD DE ONDA DE ESFUERZO, MÓDULO DINÁMICO Y COEFICIENTE DE VARIACIÓN (ENTRE PARÉNTESIS).

Spathodea campanulata								
C (%)	R (kg/m ³)		ρ_{CH} (kg/m ³)		voe (m/s)		Eoe (MN/m ²)	
	DT	AT	DT	AT	DT	AT	DT	
0	-	351	351	3.174	3.408	3.545	4.093	
	-	(6)	(6)	(7)	(8)	(14)	(1)	
1	2.3	363	355	3.236	3.469	3.793	4.275	
	(5)	(7)	(7)	(7)	(7)	(11)	(13)	
2	4.0	343	341	3.372	3.658	3.905	4.583	
	(17)	(4)	(3)	(7)	(8)	(12)	(15)	
3	6.4	347	348	3.226	3.497	3.615	4.262	
	(6)	(8)	(7)	(7)	(7)	(12)	(13)	
Fraxinus americana								
C (%)	R (kg/m ³)		ρ_{CH} (kg/m ³)		voe (m/s)		Eoe (MN/m ²)	
	DT	AT	DT	AT	DT	AT	DT	
0	-	654	658	4.022	4.542	10.575	13.576	
	-	(6)	(6)	(4)	(4)	(7)	(8)	
1	1.6	650	647	3.994	4.454	10.399	12.873	
	(10)	(4)	(4)	(5)	(5)	(11)	(11)	
2	3.3	659	656	4.000	4.570	10.586	13.710	
	(6)	(7)	(8)	(6)	(6)	(14)	(12)	
3	5.3	643	645	4.051	4.632	10.573	13.844	
	(10)	(5)	(5)	(4)	(4)	(10)	(9)	

Albizia plurijuga									
C (%)	R (kg/m ³)		ρCH (kg/m ³)		voe (m/s)		Eoe (MN/m ²)		
	DT	AT	DT	AT	DT	AT	DT	AT	
0	-	830	830	4.040	4.521	13.618	17.068		
	-	(3)	(3)	(7)	(8)	(15)	(16)		
1	1.3	845	841	4.101	5.029	14.281	21.379		
	(10)	(3)	(3)	(7)	(7)	(14)	(16)		
2	2.7	849	846	4.089	4.951	14.304	20.947		
	(6)	(3)	(3)	(8)	(9)	(17)	(19)		
3	3.7	827	827	3.991	4.428	13.214	16.298		
	(7)	(5)	(5)	(5)	(6)	(12)	(15)		

Fuente: Autores.

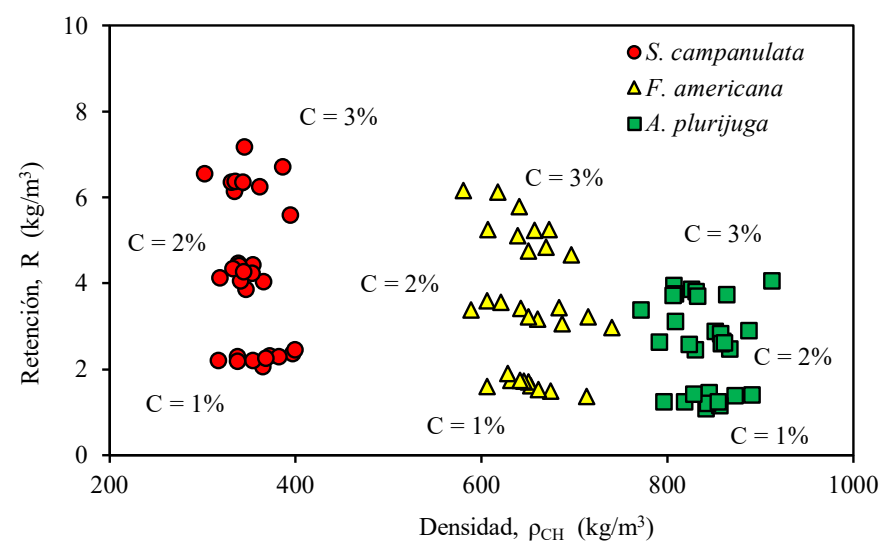


Fig. 2. Dispersión de la retención en función de la densidad.
Fuente: Autores.

Las retenciones obtenidas con concentraciones de 3% son mayores que la retención mínima recomendada por la Asociación Americana de Protección de la Madera (AWPA, *American Wood Protection Association*) para elementos estructurales empleados en interiores [36], la cual es de 2.72 kg/m³ de sales de boro (Fig. 3). En el mismo orden de ideas, la norma del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, NMX-C-322-ONNCCE-2014 [37] también recomienda retenciones de boro inorgánico de 2.7 kg/m³, para madera en interiores de uso no estructural.

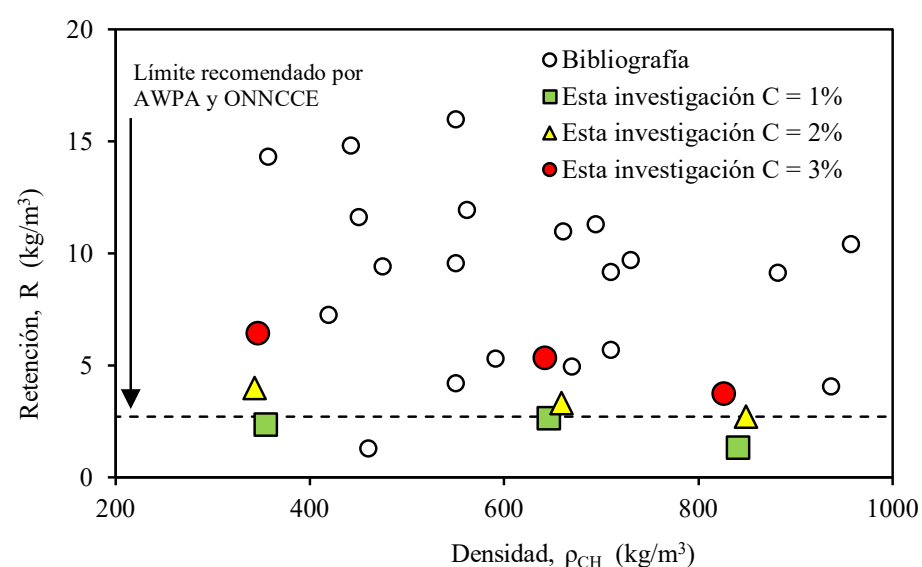


Fig. 3. Dispersión de las retenciones obtenidas para este trabajo y la bibliografía.
Fuente: Autores [6], [10], [30], [38]-[41].

Los valores promedio de las retenciones de sales de boro mostrados en la [Tabla 1](#), son similares a los reportados en la referencias [6]-[10] [30] [38]-[41]. Un resumen de los resultados de dichos autores se detalla en la [Tabla 2](#). Sin embargo, otras investigaciones muestran diferencias para cada especie preservada según las condiciones del tratamiento de impregnado [17]-[21]. A su vez la [Fig. 3](#) compara las retenciones obtenidas en la presente investigación con datos de la bibliografía y con la retención mínima recomendada por la Asociación Americana de Protección de la Madera [36] y el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE) [37]. La estructura y composición de tejidos que conforman una capa de crecimiento son factores propios del plano leñoso particular a cada una de las maderas estudiadas y referidas. De tal forma que las diferencias en su estructura anatómica son factores que influyen en su capacidad de retención de sales de boro.

TABLA 2.
DENSIDAD DE LA MADERA, CONCENTRACIONES Y RETENCIÓN.

Especies	ρ_{CH} (kg/m ³)	C (%)	R (kg/m ³)
<i>Gmelina arborea</i>	460	12	1.28
<i>Eucalyptus grandis</i>	450	6	11.60
<i>Fagus orientalis</i>	710	3	17.42
<i>Pinus sylvestris</i>	550	3	15.98
<i>Fagus sylvatica</i>	710	6	9.16
<i>Pinus sylvestris</i>	550	6	9.57
<i>Pinus sylvestris</i>	550	4	4.20
<i>Fagus sylvatica</i>	710	4	5.70
<i>Tilia mexicana</i>	442	3	14.80
<i>Cupressus lindleyi</i>	475	3	9.42
<i>Alnus acuminata</i>	562	3	11.92
<i>Cedrela odorata</i>	591	3	5.30
<i>Fraxinus uhdei</i>	661	3	10.98
<i>Lysiloma bahamensis</i>	670	3	4.93
<i>Fagus mexicana</i>	694	3	11.28
<i>Caesalpinia granadillo</i>	882	3	9.14
<i>Platymiscium dimorphandrum</i>	937	3	4.07
<i>Quercus spp.</i>	957	3	10.40
<i>Guazuma ulmifolia</i>	730	3	9.70
<i>Spathodea campanulata</i>	357	3	14.31
<i>Abies religiosa</i>	419	3	7.23

Fuente: Autores [6], [10], [30], [38]-[41].

A. Densidad

Como efecto del tratamiento, en cada especie, la densidad disminuyó con el siguiente orden: *S. campanulata* (-0.56%), *F. americana* (-0.02%) y *A. plurijuga* (-0.19%). Para fines prácticos, las densidades no variaron por efecto del tratamiento ([Tabla 1](#)). El coeficiente de variación para *S. campanulata* disminuyó 7%, para *F. americana* un 1% y para *A. plurijuga* el 2%. Es decir, el tratamiento no aumenta la variabilidad natural de la densidad de la madera.

Ahora bien, los valores promedio de las densidades mostrados en la [Tabla 1](#) son similares a los reportados en las referencias [42]-[44]. Sin embargo, se observan diferencias entre los valores obtenidos en este estudio y los reportados por la UMSNH [45]-[46] ocasionadas por la variabilidad natural al interior de una especie y por las diferencias en la ultra-estructura anatómica entre especies.

B. Velocidad de onda de esfuerzo

Las velocidades de onda aumentan a medida que las densidades se incrementan (Tabla 1). Las correlaciones de los resultados combinados de las tres especies indican coeficientes de determinación para antes del tratamiento de $R^2 = 0.64$ y para después del tratamiento de $R^2 = 0.69$ (Fig. 4). Además, la velocidad de onda aumenta con el tratamiento en promedio para *S. campanulata* es 8%, para *F. americana* del 13% y para *A. plurijuga* el 17%. El coeficiente de variación para *S. campanulata* aumenta un 11%; para *F. americana* no se registra variación y para *A. plurijuga* se observa un aumento de 14%.

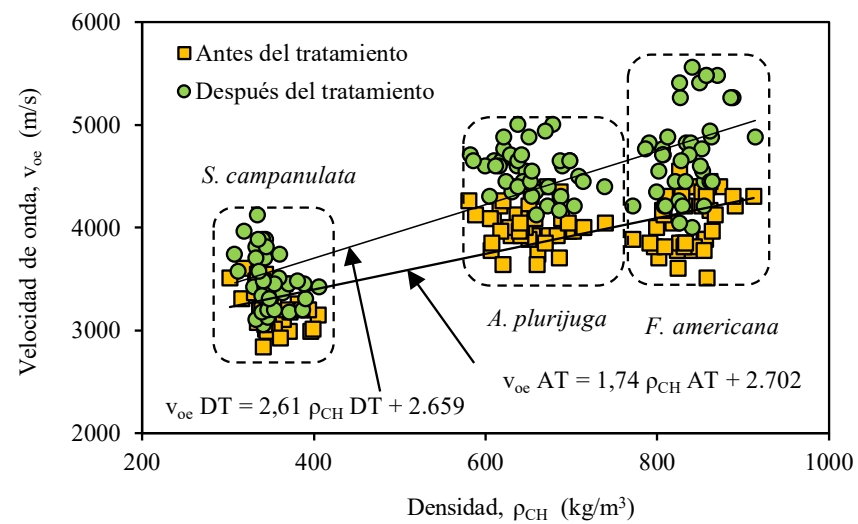


Fig. 4. Correlaciones de las velocidades de onda en función de las densidades. Fuente: Autores.

Asimismo, los valores promedio de las velocidades de onda para antes del tratamiento (Tabla 1) son similares a los reportados en las referencias [42]-[44] (Tabla 3) y se confunden entre la nube de datos de la UMSNH [46] detallados en la Fig. 5. Sin embargo, las velocidades de onda antes del tratamiento en esta investigación se explican por la correlación de la velocidad de onda en función de la densidad con un coeficiente de determinación moderado ($R^2 = 0.88$) mientras que es notoria su correlación inexistente cuando se utilizan los datos de las referencias ($R^2 = 0.02$).

TABLA 3.

DENSIDAD DE LA MADERA, VELOCIDAD DE ONDA DE ESFUERZO Y MÓDULO DINÁMICO.

Especies	ρ_{CH} (kg/m ³)	v_{oe} (m/s)	E_{oe} (MN/m ²)
<i>Abies religiosa</i>	419	4 124	7 190
<i>Acacia farnesiana</i>	909	3 400	10 577
<i>Acosmium panamense</i>	1 005	4 014	16 223
<i>Albizia plurijuga</i>	844	4 005	13 519
<i>Alnus acuminata</i>	589	4 240	10 607
<i>Andira inermis</i>	737	3 263	7 862
<i>Caesalpinia platyloba</i>	825	4 137	14 192
<i>Cedrela odorata</i>	566	3 648	7 712
<i>Cordia elaeagnoides</i>	994	3 987	15 827
<i>Dalbergia granadillo</i>	1 147	3 899	17 532
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	448	3 401	5 179
<i>Fagus mexicana</i>	642	3 936	9 974
<i>Fraxinus americana</i>	656	4 132	11 212
<i>Fraxinus uhdei</i>	651	3 939	10 122
<i>Guazuma ulmifolia</i>	730	3 033	6 735
<i>Gyrocarpus americanus</i>	402	3 596	5 245
<i>Juglans pyriformis</i>	744	4 187	13 367
<i>Lysiloma spp.</i>	650	4 288	11 912

Especies	ρ_{CH} (kg/m ³)	v_{oe} (m/s)	E_{oe} (MN/m ²)
<i>Pinus pseudostrobus</i>	514	5076	13253
<i>Platymiscium dimorphandrum</i>	866	4670	18965
<i>Psidium sartorianum</i>	789	3367	8943
<i>Quercus scytophylla</i>	788	3640	11385
<i>Quercus spp.</i>	882	4270	16215
<i>Spathodea campanulata</i>	357	2831	2858
<i>Swietenia humillos</i>	807	3433	9556
<i>Tabebuia chrysantha</i>	1096	3930	16958
<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	598	3582	7681
<i>Tabebuia rosea</i>	613	3780	8751

Fuente: Autores [42]-[44].

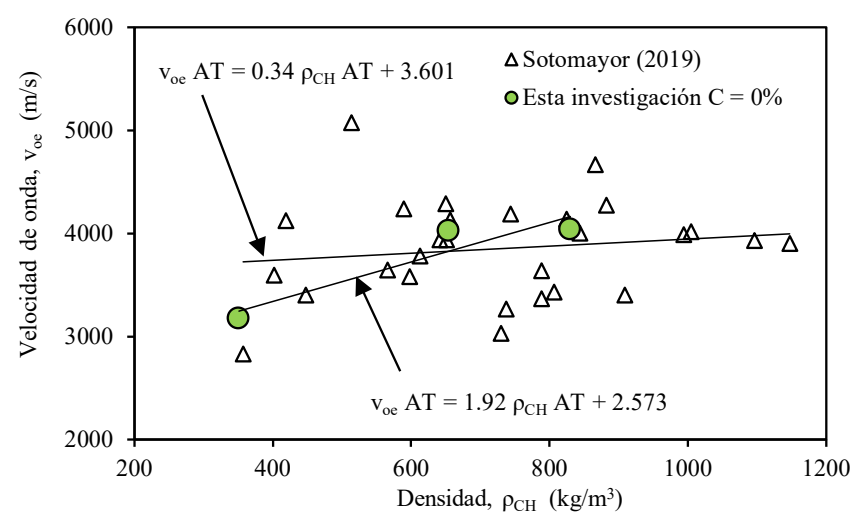


Fig. 5. Correlación de la velocidad de onda de esfuerzo en función de la densidad de la madera para los datos de la bibliografía (Tabla 3) y los datos medidos, antes del tratamiento de la madera.

Fuente: Autores.

C. Módulo dinámico

El módulo dinámico de las maderas aumenta en función de sus densidades (Tabla 1). Como efecto del tratamiento, el módulo dinámico de *S. campanulata* aumentó 16%, de *F. americana* el 28% y de *A. pluriyuga* un 36%. El coeficiente de variación se incrementa el 14% para *S. campanulata* y *A. pluriyuga*. En cambio, disminuyó un 6% en *F. americana*. De manera análoga a las velocidades de onda, el tratamiento aumenta la variabilidad natural del módulo dinámico

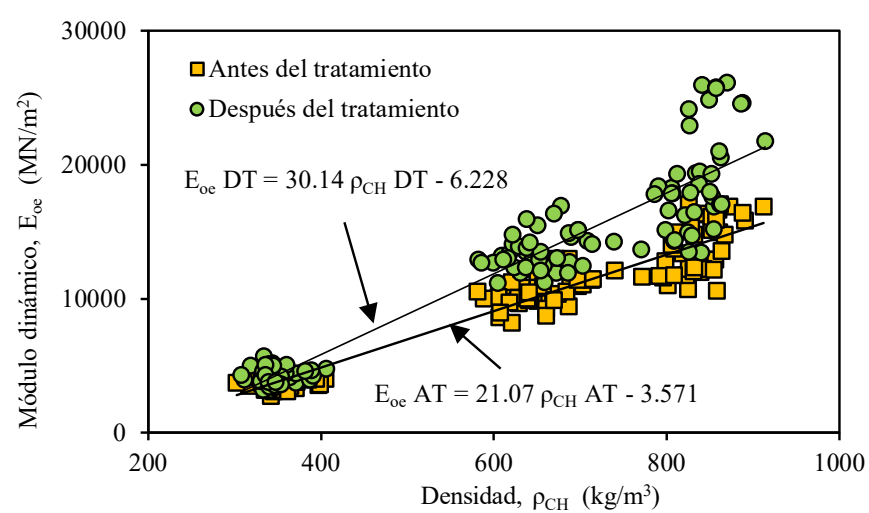


Fig. 6. Correlación del módulo dinámico en función de la densidad de la madera Antes del Tratamiento (AT) y después del tratamiento (DT).

Fuente: Autores.

en cada especie. Así, la densidad antes del tratamiento explica el aumento del módulo dinámico con un elevado coeficiente de determinación ($R^2 = 0.92$), pero después del tratamiento, la correlación indica un coeficiente de determinación moderado ($R^2 = 0.88$) (Fig. 6).

Los valores promedio de los módulos dinámicos antes del tratamiento (Tabla 1) son similares a los reportados en las referencias y se confunden entre la nube de datos de [46] (Fig. 7). Si se comparan las correlaciones del módulo dinámico en función de la densidad sus tendencias son también muy similares. No obstante, los resultados de esta investigación correlacionan muy bien ($R^2 = 0.99$) en comparación con los datos de la bibliografía [47] que arrojan un coeficiente de determinación menor ($R^2 = 0.65$).

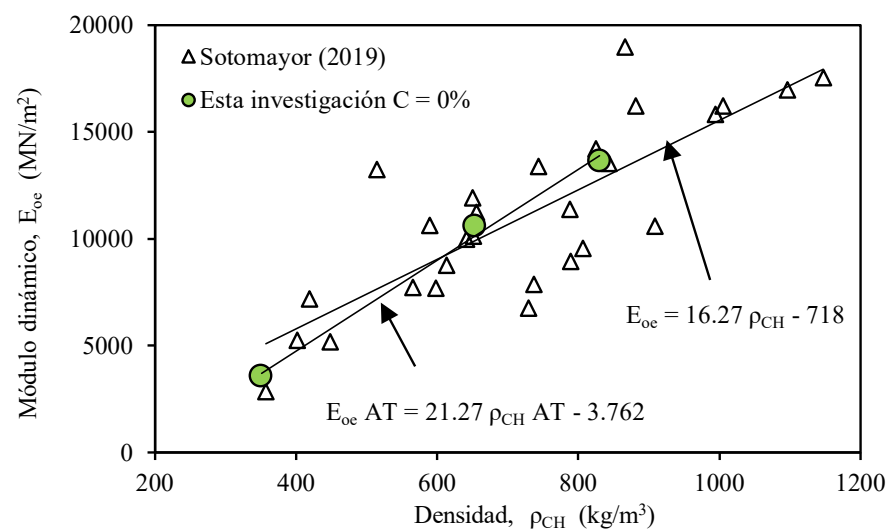


Fig. 7. Correlación del módulo dinámico en función de la densidad de la madera para los datos de la bibliografía y los datos medidos, antes del tratamiento de la madera.
Fuente: Autores [46].

La síntesis de los resultados confirma los corolarios de la UMSNH [47] quienes sugieren que, cuando se estudian diferentes especies en un amplio intervalo de valores de densidad y de velocidad de onda, existe la probabilidad de que la retención afecte estos parámetros. Es oportuno señalar que, en esta investigación, el módulo dinámico se calculó empleando (2), que indica que la densidad y la velocidad de las ondas de esfuerzo forman parte. De tal suerte, el módulo dinámico es un parámetro de segundo nivel, es decir, depende de las mediciones de la densidad y la velocidad de la onda de esfuerzo, parámetros que fueron determinados a partir de mediciones directas sobre las probetas de madera; específicamente, la densidad fue calculada a partir de las mediciones del peso y de las dimensiones de la probeta, mientras que la velocidad de onda se derivó de la medición directa de la longitud de recorrido de la onda de esfuerzo y de su tiempo de transmisión, parámetros igualmente medidos directamente sobre las probetas.

D. Pruebas estadísticas

Las pruebas de normalidad confirmaron la regularidad en las distribuciones de las seis muestras. Las pruebas de verificación y análisis de varianza sugieren que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las muestras de las densidades de cada especie antes y después del tratamiento. En cambio, las tres especies se diferencian entre ellas por sus valores promedio de sus respectivas densidades (Tabla 1). Caso similar son los resultados para las muestras de las velocidades de onda. Para los módulos de elasticidad de *S. campanulata* no se encontraron diferencias, pero para *F. americana* y *A. plurijuga* sí se identificaron diferencias estadísticamente significativas.

IV. CONCLUSIONES

La investigación determinó la retención de sales de boro, la densidad y el módulo dinámico de *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga*. El tratamiento de impregnación se consideró el factor de variabilidad (antes y después del tratamiento), y así se pudieron comparar los resultados entre los datos derivados de cada una de las maderas.

Los resultados sugieren que la capacidad de retención de sales de boro de la madera depende, principalmente, de la especie. Sin embargo, la retención aumenta a medida que la concentración se incrementa y de manera opuesta, disminuye a medida que la densidad de la madera aumenta.

También se observó, que el valor promedio de la retención de sales de boro para las concentraciones de 3% fueron mayores que el límite inferior tóxico de retención que satisfacen los requerimientos mínimos de las normas para madera utilizada en interiores. También se observó que dicho límite fue excedido para, al menos $C = 2\%$, para cierto intervalo de valores de la densidad.

Asimismo, los resultados confirman el paradigma vigente en ciencias e ingeniería de la madera: la caracterización del comportamiento mecánico de la madera requiere experimentar, caso por caso, una especie en particular. Cada procedimiento debe estar referido a las variables de referencia de las condiciones de ensayo. Con observaciones estadísticamente representativas, se pueden inferir tendencias en el comportamiento general para una especie en específico, y/o por agrupamiento de varias de ellas que denoten una tendencia similar.

Finalmente, para fines de diseño y cálculo ingenieril, es recomendable considerar el alcance de los resultados de esta investigación que se limita a probetas de pequeñas dimensiones de madera de *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga*.

FINANCIAMIENTO

Artículo de investigación científica derivado del proyecto de investigación “Impregnación de maderas mexicanas con sales de boro. Evaluación con métodos no destructivos”, financiado por la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. Año de inicio: 2019, año de finalización: 2020.

REFERENCIAS

- [1] A. Pizzi, “Wood products and green chemistry”, *Ann. For. Sci.*, vol. 73, pp. 185–203, Mar. 2016. <https://doi.org/10.1007/s13595-014-0448-3>
- [2] D. Sandberg, A. Kutnar & G. Mantanis, “Wood modification technologies”, *Iforest*, vol. 10, no. 6, pp. 895–908, Dec. 2017. <https://doi.org/10.3832/ifer2380-010>
- [3] J. Winandy & J. Morrell, “Improving the utility, performance, and durability of wood- and bio-based composites”, *Ann. For. Sci.*, vol. 74, no. 1, pp. 1–11, Mar. 2017. <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0625-2>
- [4] J. Elvira-León, J. Chimenos, C. Isábal, J. Monton, J. Formosa & L. Haurie, “Epsomite as flame retardant treatment for wood: Preliminary study”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 126, pp. 936–942, Nov. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.107>
- [5] F. Wang, J. Liu & W. Lv, “Thermal degradation and fire performance of wood treated with PMUF resin and boron compounds”, *FAM*, vol. 41, no. 8, pp. 1051–1057, Jun. 2017. <https://doi.org/10.1002/fam.2445>
- [6] G. Tondi, S. Wieland, T. Wimmer, M. Thevenon, A. Pizzi & A. Petutschnigg, “Tannin-boron preservatives for wood buildings: mechanical and fire properties”, *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 70, no. 5, pp. 689–696, Sept. 2012. <https://doi.org/10.1007/s00107-012-0603-1>
- [7] F. Obounou-Akong, P. Gérardin, M. Thévenon & C. Gérardin-Charbonnier, “Hydrogel-based boron salt formulations for wood preservation”, *Wood Sci. Technol.*, vol. 49, n. 3, pp. 443–456, Feb. 2015. <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0701-4>
- [8] E. Baysal, E. Tomak, E. Topaloglu & E. Pesman, “Surface properties of bamboo and scots pine impregnated with boron and copper based wood preservatives after accelerated weathering”, *Maderas, Cienc. tecnol.*, vol. 18, no. 2, pp. 253–264, Apr. 2016. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2016005000023>
- [9] S. Ahn, S. Oh, I. Choi, G. Han, H. Jeong, K. Kim, Y. Yoon & I. Yang, “Environmentally friendly wood preservatives formulated with enzymatic-hydrolyzed okara, copper and/or boron salts”, *J. Hazard. Mater.*, vol. 178, no. 1-3, pp. 604–611, Jun. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.01.128>
- [10] H. Simsek, E. Baysal & H. Peker, “Some mechanical properties and decay resistance of wood impregnated with environmentally-friendly borates”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 11, pp. 2279–2284, Nov. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.028>
- [11] E. Tomak, H. Viitanen, U. Yildiz & M. Hughes, “The combined effects of boron and oil heat treatment on the properties of beech and Scots pine wood. Part 2: Water absorption, compression strength, color changes, and decay resistance”, *J. Mater. Sci.*, vol. 46, no. 3, pp. 608–615, Sept. 2010. <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4860-2>
- [12] A. Can & H. Sivrikaya, “Surface characterization of wood treated with boron compounds combined with water repellents”, *Color*, vol. 44, no. 3, pp. 462–472, Jun. 2019. <https://doi.org/10.1002/col.22357>
- [13] B. Lesar, Ž. Gorišek & M. Humar, “Sorption properties of wood impregnated with boron compounds, sodium chloride and glucose”, *Dry. Technol.*, vol. 27, no. 1, pp. 94–102, Jan. 2009. <https://doi.org/10.1080/07373930802565947>

- [14] B. Lesar, A. Straže & M. Humar, “Sorptions properties of wood impregnated with aqueous solution of boric acid and montan wax emulsion”, *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 120, no. 3, pp. 1337–1345, Nov. 2010. <https://doi.org/10.1002/app.33196>
- [15] A. Temiz, E. Gezer, U. Yildiz & S. Yildiz, “Combustion properties of alder (*Alnus glutinosa* L.) Gaertn. subsp. *barbata* (C.A. Mey) Yalt.) and southern pine (*Pinus sylvestris* L.) wood treated with boron compounds”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 11, pp. 2165–2169, Nov. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.08.011>
- [16] Ş. Yasar, M. Fidan, M. Yaşar, M. Atar & E. Alkan, “Combustion properties of impregnated spruce (*Picea orientalis* L.) wood”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 143, pp. 574–579, Jul. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.141>
- [17] A. Özçifçi, Y. Örs & B. Uysal, “Determination of some physical and mechanical properties of laminated veneer lumber impregnated with boron compounds”, *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 105, no. 4, pp. 2218–2224, Aug. 2007. <https://doi.org/10.1002/app.26217>
- [18] D. Marney & L. Russell, “Combined fire retardant and wood preservative treatments for outdoor wood applications. A review of the literature”, *Fire Tech.*, vol. 44, no. 1, pp. 1–14, Mar. 2008. <https://doi.org/10.1007/s10694-007-0016-6>
- [19] S.N. Kartal, W.J. Hwang & Y. Imamura, “Combined effect of boron compounds and heat treatments on wood properties: Chemical and strength properties of wood”, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 198, no. 1-3, pp. 234–240, Mar. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.07.001>
- [20] D. Obanda, T. Shupe & H. Barnes, “Reducing leaching of boron-based wood preservatives. A review of research”, *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 15, pp. 7312–7322, Oct. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.12.077>
- [21] V. Lahtela, K. Hämäläinen & T. Kärki, “The effects of preservatives on the properties of wood after modification”, *Balt. For.*, vol. 20, no. 1, pp. 189–203, Nov. 2013. Available: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20143327849>
- [22] L. Ávila-Calderón, M. Herrera-Ferreyra y D. Raya-González, *Preservación de la madera en México*. MRL, MX: UMSNH, 2012.
- [23] C. Del Menezzi, M. Amorim, M. Costa & L. Garcez, “Evaluation of thermally modified wood by means of stress wave and ultrasound nondestructive methods”, *Mat. Sci.*, vol. 20, no. 1, pp. 61–66, Mar. 2014. <https://doi.org/10.5755/j01.ms.20.1.3341>
- [24] A. Freitas, J. Gonzalez y C. Del Menezzi, “Tratamento termomecânico e seus efeitos nas propriedades da Simarouba amara (Aubl.)”, *Floresta e Ambient.*, vol. 23, no. 4, pp. 565–572, Dec. 2016. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.144115>
- [25] L. Shan-qing & F. Feng, “Comparative study on three dynamic modulus of elasticity and static modulus of elasticity for Lodgepole pine lumber”, *J. For. Res.*, vol. 18, no. 4, pp. 309–312, Dec. 2007. <https://doi.org/10.1007/s11676-007-0062-4>
- [26] U. Dackermann, K. Crews, B. Kasal, J. Li, M. Riggio, F. Rinn & T. Tannert, “In situ assessment of structural timber using stress-wave measurements”, *Mater. Struct.*, vol. 47, no. 5, pp. 787–803, May. 2014. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0095-4>
- [27] M. Yamasaki, C. Tsuzuki, Y. Sasaki & Y. Onishi, “Influence of moisture content on estimating Young’s modulus of full-scale timber using stress wave velocity”, *J. Wood Sci.*, vol. 63, no. 3, pp. 225–235, Mar. 2017. <https://doi.org/10.1007/s10086-017-1624-5>
- [28] Y. Yu, Y. Liu, M. Gong, Z. Xu & Y. Fang, “R&R study of using a stress wave timer to measure the elastic modulus of structural dimension lumber” *Meas.*, vol. 95, pp. 293–296, Jan. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.10.040>
- [29] V. Nasir, S. Nourian, S. Avramidis & J. Cool, “Stress wave evaluation by accelerometer and acoustic emission sensor for thermally modified wood classification using three types of neural networks”, *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 77, no. 1, pp. 45–55, Jan. 2019. <https://doi.org/10.1007/s00107-018-1373-1>
- [30] J. Sotomayor-Castellanos y S. Correa-Jurado, “Retención de sales de boro en la madera y su efecto en el módulo de elasticidad dinámico”, *Rev. Científ.*, vol. 1, no. 24, pp. 90–99, Jun. 2014. <https://doi.org/10.14483/10.14483/udistrital.jour.RC.2016.24.a9>
- [31] Wood - Sampling methods and general requirements for physical and mechanical testing of small clear wood specimens, *ISO 3129:2019*, International Organization for Standardization-ISO, GE, CH, 2019. Available: <https://www.iso.org/standard/74839.html>
- [32] Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 1: Wood. Determination of moisture content for physical and mechanical tests, *ISO 13061-1:2014*, International Organization for Standardization-ISO, GE, CH, 2014. Available: <https://www.iso.org/standard/60063.html>
- [33] Wood - Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests, *ISO 13061-2:2014*, International Organization for Standardization-ISO, GE, CH, 2014. Available: <https://www.iso.org/standard/60064.html>
- [34] Industria de la construcción - Preservadores para madera - Clasificación y requisitos, *NMX-C-178-ONNCCCE-2014*, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación-ONNCCCE, CDMX, MX, 2014.
- [35] H. Simsek, E. Baysal, M. Yilmaz & F. Culha, “Some mechanical properties of wood impregnated with environmentally-friendly boron and copper based chemicals”, *Wood Res.*, vol. 58, no. 3, pp. 495–504, Sept. 2013. Available: <http://www.woodresearch.sk/wr/201303/16.pdf>

- [36] Use category system: User specification for treated wood, *AWPA U1-19*, American Wood Protection Association-AWPA, BIRM, AL, USA, 2019. <https://awpa.com/>
- [37] Industria de la construcción - Madera preservada a presión - Clasificación y requisitos, *NMX-C-322-ON-NCCE-2014*, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación-ONNCCE, CDMX, MX, 2014
- [38] A. Berrocal, F. Muñoz, y G. González, “Ensayo de penetrabilidad de dos preservantes a base de boro en madera de melina (*Gmelina arborea*) crecida en Costa Rica”, *RFMK*, vol. 1, no. 3, pp. 1–12, Feb. 2004. Disponible en <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/559/485>
- [39] T. Dhamodaran & R. Gnanaharan, “Boron impregnation treatment of *Eucalyptus grandis* wood”, *Biore-sour. Technol.*, vol. 98, no. 11, pp. 2240–2242, Aug. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.08.012>
- [40] S. Salman, A. Pétrissans, M. Thévenon, S. Dumarçay, D. Perrin, B. Pollier & P. Gérardin, “Development of new wood treatments combining boron impregnation and thermo modification: Effect of additives on boron leachability”, *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 72, no. 3, pp. 355–365, Feb. 2014. <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0787-7>
- [41] J. Sotomayor y J. Villaseñor, “Retención de sales de boro en tres maderas mexicanas. Evaluación mecánica por vibraciones”, *Rev. Fac. Cienc. Tecnol.*, vol. 26, no. supl. 1, pp. 40–46, Dic. 2016. Disponible en <https://www.fceqyn.unam.edu.ar/recyt/index.php/recyt/article/view/745>
- [42] J. Tamarit y J. López, *Xilotecnología de los principales árboles tropicales de México*. PU, MX: INIFAP, 2007.
- [43] H. Ritcher, J. Silva y R. Rodriguez, *Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas*. GUAD, MX: CONAFOR, 2010.
- [44] J. Sotomayor, *Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas*. MRL, MX: UMSNH, 2015.
- [45] J. Sotomayor y M. Ramírez, “Densidad y características higroscópicas de maderas mexicanas. Base de datos y criterios de clasificación”, *IIM*, vol. 9, no. 3, pp. 1–30, Dic. 2013. Recuperado de https://laboratoriodemecanicadelamadera.weebly.com/uploads/2/7/6/9/27690625/investigacin_e_ingeniera_de_la_madera_2013_vol._9_no._3.pdf
- [46] J. Sotomayor, “Módulos de elasticidad e índices de calidad de maderas mexicanas. Síntesis de datos del Laboratorio de Mecánica de la Madera”, *IIM*, vol. 15, no. 1, pp. 1–64, Abr. 2019. Disponible en <https://laboratoriodemecanicadelamadera.weebly.com/revistas.html>
- [47] J. Sotomayor, M. Giraldo, J. Gené, E. Correal y M. Vilches, “Efecto de sales de boro en la densidad y en el módulo de elasticidad de tres maderas mexicanas”, *Ingeniería*, vol. 28, no. 2, pp. 31–44, Sept. 2018. <https://doi.org/10.15517/ri.v28i2.31608>
- [48] GBIF Secretariat, “*Fraxinus americana* L.” (2021). *GBIF Backbone Taxonomy*. Checklist dataset. <https://doi.org/10.15468/39omei>
- [49] GBIF Secretariat, “*Albizia plurijuga* (Standl.) Britton & Rose,” (2021). *GBIF Backbone Taxonomy*. Checklist dataset. <https://doi.org/10.15468/39omei>
- [50] GBIF Secretariat, “*Spathodea campanulata* (P. Beauv),” (2021). *GBIF Backbone Taxonomy*. Checklist dataset. <https://doi.org/10.15468/39omei>

Luz Elena Alfonsina Ávila Calderón received the M.Sc. degree in Wood science and technology from the Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (Morelia, México). Since 1993, she has been with Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (Morelia, México), where she is currently Professor. <https://orcid.org/0000-0003-2646-2142>

Javier Ramón Sotomayor Castellanos received the Ph.D. degree in wood science from the University Laval (Quebec, Canada). Since 2002, he has been with Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (Morelia, México), where he is currently Professor. <https://orcid.org/0000-0002-1527-8801>