

Características higroscópicas de las maderas *Spathodea campanulata*, *Fraxinus americana* y *Albizia plurijuga* impregnadas con boro

Javier, Sotomayor-Castellanos^{1*}; Luz, Ávila-Calderón²; Mario, Fuentes-Salinas³

Resumen

El objetivo de la investigación fue evaluar si el impregnado de la madera con sales de boro reduce su higroscopicidad y mejora su estabilidad dimensional. En probetas de pequeñas dimensiones de madera de *Spathodea campanulata*, *Fraxinus americana* y *Albizia plurijuga* se aplicó un tratamiento caliente-frío de sales de boro con una concentración de 3%. Se realizaron pruebas de higroscopía y tanto antes como después del impregnado con sales de boro, se analizó la densidad básica, contenido de humedad, higroexpansiones radial, tangencial, longitudinal y volumétrica, puntos de saturación de la fibra, coeficientes de higroexpansión, índice de antiexpansión y relación de anisotropía. Después del baño, las características higroscópicas se modificaron según las especies y las direcciones observadas. El tratamiento mejora la estabilidad dimensional de *S. campanulata* en 63%, de *F. americana* en 21% y para *A. plurijuga* en 18%. Es recomendable investigar la influencia de las características anatómicas sobre las propiedades higroscópicas de estas especies.

Palabras claves: densidad básica, contenido de humedad, punto de saturación de la fibra, coeficiente de higroexpansión, índice de antiexpansión, anisotropía.

Hygroscopic characteristics of the woods *Spathodea campanulata*, *Fraxinus Americana* and *Albizia plurijuga* impregnated with boron

Abstract

The aim of the research was to evaluate whether the impregnation of wood with boron salts reduces its hygroscopicity and improves its dimensional stability. A hot-cold treatment of boron salts with a concentration of 3% was applied to small-sized specimens of *Spathodea campanulata*, *Fraxinus americana* and *Albizia plurijuga* wood. Hygroscopic tests were carried out and both before and after the boron salt impregnation, basic density, moisture content, radial, tangential, longitudinal and volumetric hygroexpansion, fibre saturation points, hygroexpansion coefficients, anti-expansion index and anisotropy ratio were analysed. After the bath, the hygroscopic characteristics were modified according to the species and the directions observed. The treatment improved the dimensional stability of *S. campanulata* by 63%, of *F. americana* by 21% and for *A. plurijuga* by 18%. It is advisable to investigate the influence of anatomical characteristics on the hygroscopic properties of these species.

Key words: basic specific gravity, moisture content, fiber saturation point, coefficient of swelling, anti-swelling index, anisotropy.

Recibido: 15 de septiembre de 2020

Aceptado: 18 de diciembre 2020

¹ Profesor de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México; madera999@yahoo.com; <https://orcid.org/0000-0002-1527-8801>

² Profesora de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México; lea.avilacalderon@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2646-2142>

³ Profesor de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México mariofusa@yahoo.com.mx; <https://orcid.org/0000-0001-5362-1204>

*Autor para correspondencia: madera999@yahoo.com

I. INTRODUCCIÓN

El concepto de estabilidad dimensional de una pieza de madera se refiere a la magnitud de su expansión geométrica en respuesta al aumento en su contenido de humedad (Kocaefe *et al.*, 2015; Sargent, 2019). Este fenómeno de higroexpansión se da en el dominio higroscópico y presenta una marcada anisotropía (Patera *et al.*, 2013; Engelund *et al.*, 2013; Nopens *et al.*, 2019). La fenomenología entre la madera y su contenido de humedad está reportada en macro-escala por Engelund *et al.* (2013) y en multi-escala por Derome *et al.* (2018). La caracterización de la estabilidad dimensional de la madera es de interés práctico en el diseño de edificios y estructuras sustentables que están expuestos a condiciones ambientales inciertas (Neagu *et al.*, 2005; Gereke y Niemz, 2010; Sargent, 2019), así como en la elaboración de muebles (Ajuziogu *et al.*, 2020), pisos, instrumentos musicales y una diversidad de artículos de madera.

Las principales estrategias para mejorar la estabilización dimensional de la madera son: tratamientos hidrófobos para superficies y tratamientos de impregnación con agentes de relleno (Kocaefe *et al.*, 2015), la modificación con procesos químicos (Sandberg *et al.*, 2017, Gérardin, 2016) y la modificación con tratamientos termo-higro-mecánicos (Esteves y Pereira, 2009; Laine *et al.*, 2013). En este contexto, el impregnado con sales de boro es un conjunto de técnicas que pretende optimizar la protección de la madera de su deterioro biológico (Tsunoda, 2001; Temiz *et al.*, 2008; Thévenon *et al.*, 2010; González-Laredo *et al.*, 2015; Obounou-Akong, 2015) y de su variación dimensional (Ayrilmis, 2013; Kotlyarova y Stepina, 2018). En esta tecnología, la retención es el indicador de la cantidad de sustancia que conserva una pieza de madera, por unidad de volumen, después de un tratamiento de impregnación (Berrocal *et al.*, 2004; Koumbi-Mounanga *et al.*, 2015).

El nivel de estabilidad dimensional de una especie de madera se evalúa con las higroexpansiones lineales y volumétrica (Tiryaki *et al.*, 2016; Fu *et al.*, 2019). Estos parámetros son útiles para caracterizar las propiedades físicas de una especie. Sin embargo, para homogeneizar resultados con respecto a la variación del contenido de humedad, es conveniente determinar los coeficientes de higroexpansión, los cuales ponderan la variación geométrica por el incremento en el contenido de humedad (Torelli y Gorišek, 1995; Lesar *et al.*, 2011). Para fines de

valoración del efecto de un proceso de estabilización dimensional, se utiliza el índice de antihiroexpansión, que contrasta los estados de la madera antes y después del tratamiento de humectación (Dubey *et al.*, 2011; Islam *et al.*, 2012; Soltani *et al.*, 2013; Qian *et al.*, 2013; Jiang *et al.*, 2015; Giridhar *et al.*, 2017, Qian *et al.*, 2018). En el mismo contexto, la relación de anisotropía es el parámetro que califica la estabilidad dimensional respecto a sus ejes tangencial y radial (Hernández, 2007; Shukla y Kandem, 2010).

Por otro lado, existe evidencia empírica de que el impregnado de la madera con sales de boro reduce su higroscopicidad (Kartal *et al.*, 2007; Lesar *et al.*, 2009; Caldeira 2010; Kotlyarova y Stepina, 2018). Sin embargo, debido a la diversidad en las características anatómicas entre especies y a las particularidades en los procedimientos experimentales, este argumento no se puede generalizar cuantitativamente para todas las maderas (Sargent, 2019). Así, parece razonable la caracterización de su comportamiento higroscópico desde un enfoque de observación especie por especie y de comparación entre una misma madera sin tratamiento y una con tratamiento.

La hipótesis de trabajo de esta investigación plantea que el impregnado de la madera con sales de boro reduce su higroscopicidad y con ello mejora su estabilidad dimensional. Para probar experimentalmente esta propuesta, en probetas de pequeñas dimensiones de *Spathodea campanulata*, *Fraxinus americana* y *Albizia plurijuga*, antes y después del tratamiento de impregnado con sales de boro, se evaluó la densidad básica, contenido de humedad e higroexpansión, así como los parámetros derivados: punto de saturación de la fibra, coeficiente de higroexpansión, índice de antiexpansión y relación de anisotropía. La hipótesis está restringida a la metodología aquí desarrollada y para las especies en estudio.

La presente investigación forma parte de la línea de investigación sobre el efecto de sustancias protectoras en las características físicas y mecánicas de la madera, línea desarrollada en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en Morelia, México. El material experimental y el tratamiento de impregnación son los mismos utilizados y reportados anteriormente por Sotomayor y Ávila (2019). Con todo, los resultados de las pruebas de higroscopía son originales e inéditos.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Se colectaron piezas de madera aserrada de *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga* en Michoacán, México. Para cada especie se prepararon 20 probetas con dimensiones de 2 cm por 2 cm de sección y 6 cm de largo, orientadas respectivamente en las direcciones radial, tangencial y longitudinal de la madera. Las probetas estaban formadas por madera de duramen y libres de defectos de crecimiento. La estrategia experimental consistió en dos etapas. La primera consistió en el tratamiento de impregnación por el método de baño caliente-frío y la segunda en aplicar etapas de humidificación y secado. Antes y después del tratamiento de impregnación, las probetas se almacenaron 12 meses en una cámara de acondicionamiento a una temperatura de 20°C (± 1 °C) y una humedad relativa del aire de 65% (± 5 %).

Tratamiento de impregnación

Las probetas se humedecieron durante ocho horas en un baño de agua caliente con temperatura de 60°C. Posteriormente, se sumergieron en un baño frío con una temperatura de 23°C durante 16 horas en una solución acuosa con concentración al 3% de mezcla de ácido bórico (trihidróxido de boro, 39,4%) y borato de sodio (tetaborato de sodio, 60,6%). Antes y después del baño caliente-frío, las probetas se pesaron y se midieron sus dimensiones. Una vez terminado el tratamiento y

realizadas las mediciones pertinentes, las probetas se almacenaron por 12 meses en las mismas condiciones en que se estabilizó la madera antes del tratamiento. Posteriormente, se realizaron las pruebas de higroscopía.

Pruebas de higroscopía

Inicialmente se pesaron y midieron las dimensiones de las probetas con un contenido de humedad inicial de equilibrio con las condiciones de la cámara de climatización (CH_{ini}). Posteriormente, se sumergieron en agua a temperatura de 23°C durante 72 horas para lograr un contenido de humedad (CH_{sat}) mayor que el punto de saturación de la fibra (PSF). En este estado de humedad se pesaron y se midieron nuevamente las dimensiones de las probetas. En seguida, se secaron en un horno a una temperatura de 103°C durante 72 horas. Finalmente, se pesaron y se midieron sus dimensiones con un contenido de humedad anhidro ($CH_{anhidro}$). El dominio que va del contenido de humedad inicial hasta el contenido de humedad saturado se considera la etapa de hidratado, en la cual tiene lugar el proceso de higoexpansión (Figura 1). El dominio correspondiente a la etapa de secado y su consecuente fenómeno de higocontracción no se analizó puesto que, durante el hidratado, las sales de boro se disuelven y su retención se modifica (Ramos *et al.*, 2006, Lesar *et al.* 2009). Sin embargo, las mediciones en estado anhidro se utilizaron para calcular el punto de saturación de la fibra (Fórmula 5), los contenidos de humedad inicial (Fórmula 3) y el contenido de humedad saturado (Fórmula 4).

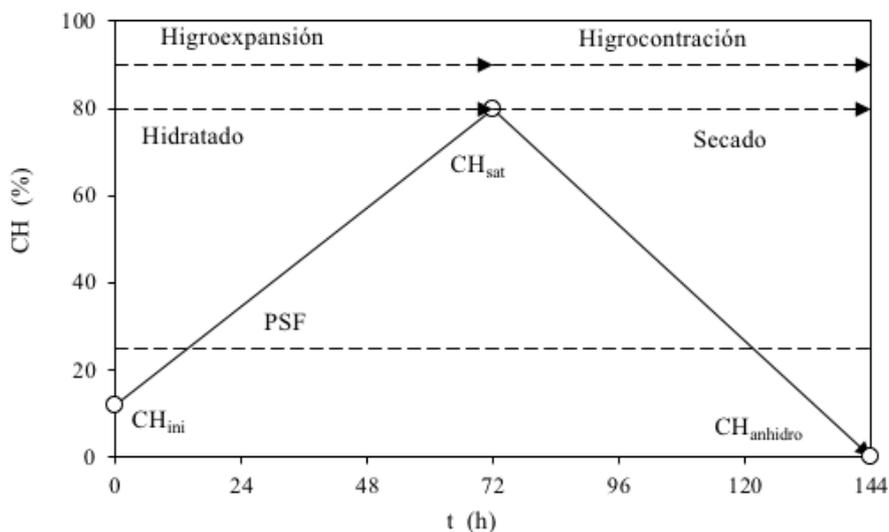


Figura 1. Pruebas de higroscopía.

Diseño experimental

La unidad experimental consistió en tres grupos de 20 probetas cada uno, correspondientes a las tres maderas. Cada grupo se organizó en dos muestras independientes de diez probetas cada una. La primera fue la muestra de control sin tratamiento, en adelante ST, y la segunda fue la muestra con tratamiento de impregnación, en adelante CT. La retención se consideró el parámetro de referencia para diferenciar en cada especie las probetas ST y CT.

En una primera etapa se calcularon las higroexpansiones lineales y volumétricas, las cuales dependen del intervalo comprendido entre el contenido de humedad inicial y del punto de saturación de la fibra, ambos parámetros particulares a cada probeta (Fórmulas 6 y 7), de tal forma que las higroexpansiones son convenientes para comparar resultados entre especies. Sin embargo, para observar el efecto del tratamiento de impregnación en muestras pareadas de una misma especie, se calcularon los coeficientes de higroexpansión (Fórmulas 8 y 9), mediciones apropiadas para homogenizar los resultados y analizar el fenómeno. Estos parámetros están ponderados por el intervalo entre el punto de saturación de la fibra (Fórmula 5) y el contenido de humedad inicial (Fórmula 3). Otras variables de respuesta, antes y después de las pruebas de higroscopía, fueron las densidades

básicas (Fórmula 2). Las retenciones (Fórmula 1) se calcularon como parámetros de referencia. Los índices de antihigroexpansión (Fórmula 10) y las relaciones de anisotropía (Fórmula 11) se calcularon como indicadores complementarios.

En una segunda etapa, se calcularon la media y el coeficiente de variación para las variables densidad básica, contenido de humedad inicial, punto de saturación de la fibra, higroexpansiones radial, tangencial, longitudinal y volumétrica. Para cada grupo de dos muestras correspondientes a resultados ST y CT, se practicaron análisis de varianza con la hipótesis nula: $H_0: X_{ST} + X_{CT} = 0$. El criterio de demarcación para estas pruebas fue aceptar una diferencia estadísticamente significativa para valores $P_{(\alpha = 0,05)} \leq 0,05$. La Tabla 1 presenta las fórmulas utilizadas para calcular los parámetros y los símbolos empleados. Se calcularon regresiones lineales y los coeficientes de determinación del punto de saturación de la fibra, higroexpansión, el índice de antihigroexpansión, y de la relación de anisotropía (T/R) en función de las densidades anhidras. Las ponderaciones para calificar la intensidad de las correlaciones fueron los valores del coeficiente de determinación sugeridos por Tippner *et al.* (2016): correlación muy alta: $1 \geq R^2 \geq 0,9$; correlación alta: $0,9 > R^2 \geq 0,7$; correlación media: $0,7 > R^2 \geq 0,4$; correlación baja: $0,4 > R^2 \geq 0,2$; y correlación nula: $R^2 < 0,2$.

Tabla 1. Fórmulas y símbolos utilizados

Fórmulas	No.	Referencias
$R = \left(\frac{P_{di} - P_{ai}}{V_{di}} \right) \times \left(\frac{C}{100} \right)$	(1)	Simsek <i>et al.</i> (2013)
$\rho_0 = \frac{P_{anhidro}}{V_{sat}}$	(2)	Koman y Feher (2015)
$CH_{ini} = \left(\frac{P_{ini} - P_{anhidro}}{P_{anhidro}} \right) \times 100$	(3)	Chiniforush <i>et al.</i> (2019)
$CH_{sat} = \left(\frac{P_{sat} - P_{anhidro}}{P_{anhidro}} \right) \times 100$	(4)	Chiniforush <i>et al.</i> (2019)
$PSF = \left(\frac{V_{sat} - V_{anhidro}}{V_{sat}} \right) \times \left(\frac{100}{0,9 \times \rho_0} \right)$	(5)	Fuentes-Salinas (2000)
$\alpha_i = \left(\frac{i_{sat} - i_{ini}}{i_{sat}} \right) \times 100$	(6)	Fu <i>et al.</i> (2019)
$\alpha_v = \left(\frac{V_{sat} - V_{ini}}{V_{sat}} \right) \times 100$	(7)	Fu <i>et al.</i> (2019)
$\lambda_i = \left(\frac{i_{sat} - i_{ini}}{i_{sat}} \right) \times \frac{100}{(PSF - CH_{ini})}$	(8)	Fuentes-Salinas (2000)
$\lambda_v = \left(\frac{V_{sat} - V_{ini}}{V_{sat}} \right) \times \frac{100}{(PSF - CH_{ini})}$	(9)	Fuentes-Salinas (2000)
$I_A = \left(\frac{\lambda_v ST - \lambda_v CT}{\lambda_v ST} \right) \times 100$	(10)	Giridhar <i>et al.</i> (2017)
$T/R = \frac{\lambda_T}{\lambda_R}$	(11)	Fuentes-Talavera <i>et al.</i> (2014)

<p>Símbolos</p> <p>R = Retención (kg m⁻³) (Fórmula 1)</p> <p>P = Peso (kg) (Fórmulas 1, 2, 3 y 4)</p> <p>C = Concentración (%) (Fórmula 1)</p> <p>V = Volumen (m³) (Fórmulas 2, 5, 7 y 9)</p> <p>ρ_0 = Densidad básica (kg m⁻³) (Fórmula 2)</p> <p>CH = Contenido de humedad (%) (Fórmulas 3 y 4)</p> <p>PSF = Punto de saturación de la fibra (%) (Fórmula 5)</p> <p>α = Higroexpansión (%) (Fórmulas 6 y 7)</p> <p>λ = Coeficiente de higroexpansión (%/%) (Fórmulas 8 y 9)</p> <p>I_A = Índice de antihigroexpansión (%) (Fórmula 10)</p> <p>ST = Sin tratamiento (Fórmula 10)</p> <p>CT = Con tratamiento (Fórmula 10)</p> <p>T/R = Relación de anisotropía (sd) (Fórmula 11)</p>	<p>Subíndices</p> <p>ai = Antes impregnación</p> <p>di = Después impregnación</p> <p>anhidro = Estado de humedad anhidro</p> <p>sat = Estado de humedad saturado</p> <p>ini = Estado de humedad inicial</p> <p>i = Medición en R, T, L</p> <p>R = Radial</p> <p>T = Tangencial</p> <p>L = Longitudinal</p> <p>V = Volumétrico</p> <p>sd = Sin dimensiones</p> <p>-</p> <p>-</p>
---	--

III. RESULTADOS

En la Tabla 2 se presentan las medias y los coeficientes de variación para las densidades básicas, contenidos de humedad, puntos de saturación de la

fibra, higroexpansiones, coeficientes de higroexpansión, retenciones, índices de antihigroexpansión y relaciones de anisotropía de las tres maderas estudiadas, de las muestras ST y CT.

Tabla 2. Densidades básicas, contenidos de humedad, puntos de saturación de la fibra, higroexpansiones, coeficientes de higroexpansión, retenciones y relaciones de anisotropía.

Especies	ρ_0 (kg m ⁻³)	CH _{ini} (%)	PSF (%)	α_R (%)	α_T (%)	α_L (%)	α_V (%)
<i>S. campanulata</i> (ST)	269 (7) #	13,7 (15)	30 (17)	4,44 (28)	8,89 (18)	0,16 (38)	13,43 (19)
<i>S. campanulata</i> (CT)	253 (7)	14,8 (9)	37 (18)	1,80 (27)	5,42 (23)	0,09 (44)	7,32 (20)
<i>F. americana</i> (ST)	534 (6)	10,6 (3)	21 (5)	2,41 (19)	4,51 (24)	0,39 (33)	7,02 (16)
<i>F. americana</i> (CT)	531 (6)	11,0 (6)	24 (11)	2,00 (19)	4,33 (18)	0,04 (75)	6,43 (14)
<i>A. pluriyuga</i> (ST)	697 (2)	10,5 (22)	19 (6)	2,47 (25)	5,18 (32)	0,10 (50)	7,76 (17)
<i>A. pluriyuga</i> (CT)	683 (3)	11,0 (5)	21 (8)	3,38 (29)	4,84 (10)	0,03 (33)	8,32 (13)
	Retención (kg m ⁻³)	I _A (%)	T/R (sd)	λ_R (%/%)	λ_T (%/%)	λ_L (%/%)	λ_V (%/%)
<i>S. campanulata</i> (ST)	-	-	2,0	0,30	0,61	0,007	0,91
<i>S. campanulata</i> (CT)	6,4	63	3,0	0,09	0,25	0,005	0,34
Diferencias (ST) vs. (CT)	-	-	+33	-70	-59	-29	-63
<i>F. americana</i> (ST)	-	-	1,9	0,23	0,43	0,010	0,66
<i>F. americana</i> (CT)	5,2	21	2,2	0,16	0,35	0,008	0,53
Diferencias (ST) vs. (CT)	-	-	+33	-30	-19	-20	-20
<i>A. pluriyuga</i> (ST)	-	-	2,1	0,34	0,71	0,014	1,06
<i>A. pluriyuga</i> (CT)	3,7	18	1,4	0,35	0,51	0,011	0,87
Diferencias (ST) vs. (CT)	-	-	-33	+3	-28	-21	-18

ρ_0 = Densidad básica; CH_{ini} = Contenido de humedad inicial; PSF = Punto de saturación de la fibra; α = Higroexpansión; λ = Coeficiente de higroexpansión; R = Radial; T = Tangencial; L = Longitudinal; V = Volumétrico; I_A = Índice de anti higroexpansión; T/R = Relación de anisotropía; ST = Sin tratamiento; CT = Con tratamiento. #CV = Coeficiente de variación en por ciento y entre paréntesis; sd = Sin dimensiones.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Retenciones

La retención de sales de boro en las maderas de *S. campanulata*, *F. americana* y *A. pluriyuga* disminuye a medida que sus densidades aumentan. Las magnitudes de las retenciones obtenidas en la presente investigación son del mismo orden que las reportadas y analizadas por Sotomayor y Ávila (2019), quienes utilizaron el mismo material y tratamiento que en la presente investigación. En términos cuantitativos, estos resultados son comparables con especies tropicales de México y

Centroamérica reportadas por Alfaro (2013), Sotomayor y Villaseñor (2016), Moya y Berrocal (2015) y Sotomayor y Correa (2016).

Los valores promedio de retención de sales de boro para las tres especies fueron mayores que el límite inferior tóxico de retención de sales de boro de 2,72 kg m⁻³ recomendado por la Asociación Americana de Preservadores de Madera (American Wood-Preservers' Association, 2014) para elementos estructurales empleados en interiores. De manera que estas maderas pueden ser impregnadas con sales de boro con una

concentración del 3%, empleando el método baño caliente-frío, para su uso como elementos estructurales en interiores.

Densidades básicas

Se seleccionaron tres especies con densidades básicas que van desde 269 kg m⁻³ de *S. campanulata* hasta 697 kg m⁻³ de *A. plurijuga*. Esta estrategia permitió observar un amplio rango de densidad y comparar resultados promedio de las variables propuestas por el diseño experimental con el enfoque especie por especie. Los resultados de los análisis de varianza no indican diferencias estadísticamente significativas entre las densidades básicas ST y CT, resultado que se refuerza por la similitud entre los coeficientes de variación para las densidades básicas ST y CT de las tres especies.

Sotomayor *et al.* (2018) reportan, para un proceso de impregnado de baño caliente-frío similar al de esta investigación, que la densidad después del tratamiento con sales de boro al 3% aumenta 2,6% para *Guazuma ulmifolia* y 3,6% para *Abies religiosa*; en contraste, la densidad de *S. campanulata* disminuyó 5,9%. Su resultado para *S. campanulata* coincide con el de la presente investigación. En el sentido contrario, Simsek y Baysal (2015) reportan un incremento en la densidad de la madera de *Fagus orientalis* ocasionado, entre otros factores, por el peso de las sales de boro, la diversidad en la porosidad de la especie en estudio y, cuando es el caso, el efecto de la temperatura empleada para impregnar la madera. Igualmente, Pereira *et al.* (2017) indican un aumento de 3,4% en la densidad de *Eucalyptus sp.* tratada con sales de boro.

En la literatura usualmente no se presenta a la densidad como una variable explicativa para correlacionar parámetros higroscópicos de la madera. Para ilustrar los resultados, en los apartados siguientes, los resultados de los puntos de saturación de la fibra, las higroexpansiones volumétricas, los coeficientes de higroexpansión, los índices anti higroexpansión y las relaciones de anisotropía, se grafican en función de las densidades básicas.

Contenidos de humedad

Los contenidos de humedad iniciales ST y CT no indican diferencias estadísticamente significativas para *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga*. Para fines prácticos, el contenido de humedad inicial se puede considerar como el contenido de humedad en equilibrio.

En el mismo sentido, los coeficientes de variación del contenido de humedad para *S. campanulata* y *A. plurijuga* disminuyeron como efecto del tratamiento. Sin embargo, el coeficiente de variación del contenido de humedad de *F. americana* aumentó después del baño.

Los contenidos de humedad iniciales fluctuaron entre un mínimo de 10,5% y un máximo de 13,7%. Después del tratamiento de impregnado la madera recobró su contenido de humedad en equilibrio, con un intervalo que va de 10,5% para *A. plurijuga* (ST) a 14,8% para *S. campanulata* (CT). Los resultados de la Tabla 2 muestran que la madera impregnada con sales de boro es más higroscópica en comparación con la madera no tratada, fenómeno que ha sido reportado por Lesar *et al.* (2011).

A pesar de las pequeñas diferencias entre especies en el contenido de humedad inicial, durante las pruebas de higroscopía se observa solamente el efecto del hidratado de la madera. En efecto, después de 72 horas de hidratado, la madera de las tres especies alcanzó contenidos de humedad superiores a los puntos de saturación de la fibra: *S. campanulata* (ST) 144%, *S. campanulata* (CT) 123%, *F. americana* (ST) 60%, *F. americana* (CT) 61%, *A. plurijuga* (ST) 48% y *A. plurijuga* (CT) 45%, alcanzando el dominio higroscópico superior (Fredriksson, 2019). Estos resultados permitieron medir las higroexpansiones máximas. No obstante, es necesario considerar que los pesos y las extensiones fueron medidas macroscópicas y externas, y se realizaron en un número reducido de probetas. Los resultados son útiles como referencia para estudios más extensos.

Comparando cada una de las muestras correspondientes a la madera ST y CT de una misma especie, los contenidos de humedad iniciales fueron análogos. Sin embargo, los contenidos de humedad saturados indican diferencias para *S. campanulata* de 14,6% y para *A. plurijuga* de 6%. Para estas maderas, el tratamiento disminuye la absorción de agua y sus resultados coinciden con los reportados por Lesar *et al.* (2009) y Lesar *et al.* (2011). Sin embargo, queda por explicar los resultados de *F. americana*, que tuvo un incremento de 1.6%, es decir, el tratamiento no modificó de manera importante su contenido de humedad saturado.

Durante la etapa caliente del tratamiento de impregnado, la temperatura fue de 60 °C y durante la etapa de secado de las pruebas de higroscopía la temperatura fue de 103 °C, magnitudes menores a 160°C,

condición necesaria para modificar la composición química y/o la estructura anatómica de la madera y así poder observar algún efecto en el contenido de humedad o en otras propiedades físicas y mecánicas (O’Leary y Hodges, 2001; Sahin, 2010; Murata *et al.*, 2013; Fu *et al.*, 2019). Sin embargo, durante la etapa de hidratado de las pruebas de higroscopía las probetas estuvieron sumergidas durante 72 horas en agua, situación que provocó el lixiviado de las sales de boro (Obanda *et al.*, 2008; Zhang, 2015). En efecto, las sales de boro tienen una estructura cristalina y se unen mecánicamente en los lúmenes y paredes celulares de la madera (Ramos *et al.*, 2006; Lesar *et al.*, 2009), de tal forma que los cristales se disuelven cuando el contenido de humedad en la madera se satura. Así, la estrategia experimental podría mejorarse si se controla y mide el proceso de lixiviado de las sales de boro durante las etapas de hidratado y de secado.

Puntos de saturación de la fibra

El punto de saturación de la fibra para las tres especies aumenta como resultado del tratamiento con

sales de boro y se observan diferencias estadísticamente significativas entre los valores de madera ST y CT. Caso particular es *F. americana* cuyos resultados indican anomalías en la distribución de sus muestras. No obstante, la comparación de medianas (Prueba de Kruskal-Wallis) confirma igualmente una diferencia significativa para los puntos de saturación de la fibra entre la madera ST y CT. En el mismo sentido, los coeficientes de variación son diferentes según se trate de la especie.

Desde otra perspectiva, el punto de saturación de la fibra disminuye a medida que las densidades aumentan. Las correlaciones entre los puntos de saturación de la fibra de *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga* en función de las densidades básicas son para la madera ST: $PSF = -0,0274 \rho_0 + 37$ ($R^2 = 0,97$) y para madera CT: $PSF = -0,0389 \rho_0 + 46$ ($R^2 = 0,97$). Comparativamente con los datos de Tamarit-Urias y Fuentes-Salinas (2003) para 63 maderas mexicanas y de Hernández (2007) para 9 maderas peruanas, la correlación resultante $PSF = -0,0234 \rho_0 + 40$ ($R^2 = 0,43$) muestra la misma tendencia que las de esta investigación (Figura 2). Por motivos de escala, no se visualizan los 72 datos de la bibliografía.

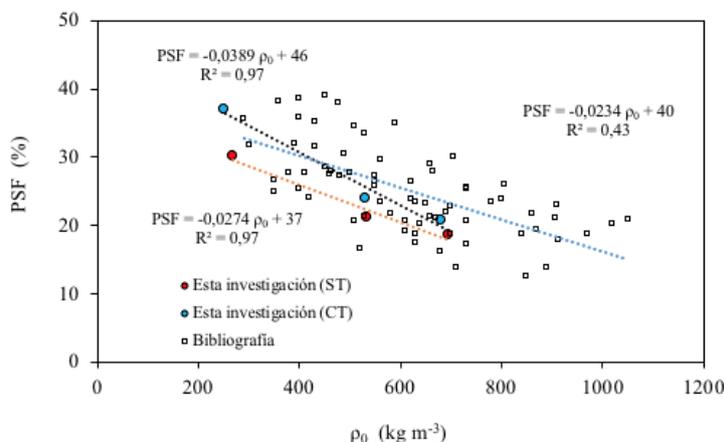


Figura 2. Puntos de saturación de la fibra en función de las densidades básicas.

Higroexpansiones

Como efecto del tratamiento con sales de boro, las higroexpansiones disminuyen para *S. campanulata* y *F. americana*, lo que confirma su utilidad para disminuir las higroexpansiones en madera de *Pinus* spp, como reporta Kotlyarova y Stepina (2018). Por su parte, Lesar *et al.* (2011) para madera de *Picea abies* ($\rho_{CH} = 688 \text{ kg m}^{-3}$) y Kartal *et al.* (2007) para la de *Cryptomeria japonica* ($\rho_{CH} = 421 \text{ kg m}^{-3}$) reportan que, como efecto del impregnado con sales de boro, disminuye la capacidad de absorción de agua, lo que se traduce en la disminución de

las higroexpansiones. Sin embargo, estos investigadores hacen notar que las repercusiones de los compuestos de boro sobre la higroscopía de la madera difieren según el tipo y retención de sustancia utilizada y de la especie en estudio. Posiblemente este es el caso para los resultados de *A. plurijuga*: no obstante que las higroexpansiones tangenciales y longitudinales disminuyeron, las higroexpansiones radiales aumentaron después del tratamiento en un 37%. Este resultado se tradujo en un incremento en las higroexpansiones volumétricas en un 7%.

Los coeficientes de variación indican que las dispersiones de las mediciones de las higroexpansiones son muy amplias para *S. campanulata* y *A. plurijuga* en comparación con las de *F. americana* (Tabla 2). Además, aumentan o disminuyen según la dirección de medición, en consecuencia, las higroexpansiones volumétricas aumentan 5% para *S. campanulata* y disminuyen 13% para *F. americana* y 31% para *A. plurijuga*. En el mismo contexto, las higroexpansiones presentan un carácter anisotrópico con la relación: $\alpha_T > \alpha_R \gg \alpha_L$, cuyas magnitudes son particulares para cada especie y estado de la madera. Estos resultados son similares a los reportados para once maderas mexicanas ($399 \text{ kg m}^{-3} < \rho_o < 906 \text{ kg m}^{-3}$) por Silva et al. (2010): $\alpha_T/\alpha_R = 2,1$; y por Ávila y Herrera (2012): $\alpha_T/\alpha_R = 1,9$ para *Enterolobium cyclocarpum* ($\rho_o = 380 \text{ kg m}^{-3}$).

En un proceso de hidratación de probetas de pequeñas dimensiones de *Pinus pinaster*, *Picea abies* y *Pinus sylvestris*, Silva et al. (2014) muestran que son suficientes 24 horas de hidratado para alcanzar la máxima magnitud de las higroexpansiones. Esto permite inferir que el tiempo de hidratado de 72 horas de la presente investigación fue suficiente para alcanzar contenidos de humedad en estado saturado superiores a los puntos de saturación de la fibra. En efecto, los contenidos de humedad en estado saturado calculados con la Fórmula (4) (Tabla 1) son: *S. campanulata* (ST) = 144%, *S. campanulata* (CT) = 123%, *F. americana* (ST) = 60%, *F. americana* (CT) = 61%, *A. plurijuga* (ST) = 48% y *A. plurijuga* (CT) = 45%.

Las mediciones de las higroexpansiones son útiles para comparar especies entre sí. Sin embargo, son poco favorables para observar el efecto del tratamiento sobre la madera. Las higroexpansiones fueron calculadas con las fórmulas (6) y (7) a partir de las dimensiones exteriores de las probetas en los estados iniciales y saturados. Estas mediciones no consideran las diferentes cantidades de humedad absorbidas por cada especie, entre el estado inicial y el saturado después de 72 horas de hidratado de la madera (Figura 1). Por tanto, el agua absorbida es diferente para cada especie ST o CT. En términos de contenido de humedad, mientras que las probetas sin tratamiento de *S. campanulata* absorbieron en promedio 130%, y las probetas con tratamiento 108%, las probetas de *F. americana* absorbieron respectivamente 49% y 50% y las de *A. plurijuga* 38% y 34%.

El fenómeno de la higroexpansión de la madera es explicado en la literatura combinando diferentes puntos

de vista. Un primer argumento es la interacción, a nivel molecular y de fibrillas, entre los diferentes componentes químicos de la madera y la humedad. De tal forma que se producen los fenómenos de absorción-adsorción de fluidos en el tejido ligno-celulósico (O'leary y Hodges, 2001; Berry y Roderick, 2005; Repellin y Guyonnet, 2005; Sahin, 2010; Patera et al., 2013). Un segundo enfoque explicativo es el acomodo y forma anatómica de la estructura jerárquica a nivel de pared celular, de una célula, de una capa de crecimiento y considerando un volumen elemental de materia (Nakano, 2003; Rafsanjani et al., 2014; Joffre et al., 2016; Derome et al., 2018; Chiniforush et al., 2019).

En el mismo sentido, la disminución en la magnitud de la higroexpansión en la madera como efecto del tratamiento con sales de boro es interpretado por el bloqueo de los lúmenes celulares por cristales de boro y por la alteración de los componentes químicos presentes en la pared celular. Otros factores son la especie, el contenido de humedad y densidad de la madera en estudio (Hernández, 2007; Islam et al., 2012; Qian et al., 2019; Kocaefe et al., 2015; Sargent, 2019); la concentración, retención y clase de las sustancias de impregnación, (Temiz et al., 2008; Lesar et al., 2011; Qian et al., 2013; Petr y Aleš, 2014; González-Laredo et al., 2015; Giridhar et al., 2017; Qian et al., 2018; He et al., 2019); así como los tiempos, presiones y temperaturas aplicados en los procesos (Esteves y Pereira, 2009; Caldeira, 2010; Soltani et al., 2013; Gérardin, 2016; Fu et al., 2019). Como resultado, la biodiversidad de especies, reflejada en densidades y en estructuras anatómicas y en planos leñosos particulares a cada especie, árbol y tipo de tejido, así como las diferentes perspectivas experimentales, repercuten en una amplia variabilidad en los parámetros de higroscopía que caracterizan a una madera.

Coeficientes de higroexpansión

Las magnitudes de los coeficientes de higroexpansión (Tabla 2) representan las mediciones de las higroexpansiones divididas entre el intervalo de los estados de contenido de humedad inicial y el correspondiente al punto de saturación de la fibra (Fórmulas 8 y 9). De esta manera, se homogenizan los cálculos directos de las higroexpansiones y se puede evidenciar el efecto del impregnado. En lo subsecuente, para aligerar el texto, el término *coeficiente de higroexpansión* se sustituye por *coeficiente* y se

especifica la dirección de anisotropía y/o volumétrico.

Los coeficientes indican disminuciones que van desde -18% para el coeficiente volumétrico de *A. plurijuga* hasta -70% del coeficiente radial de *S. campanulata*; con excepción de los coeficientes radiales de *A. plurijuga* los cuales indican un aumento de +3%. Esta particularidad en *S. campanulata* se refleja en la correlación entre los coeficientes volumétricos y las densidades para las

probetas ST la cual es $\lambda_V = 0,0002 \rho_0 + 0,7694$ ($R^2 = 0,05$). Sin embargo, la correlación entre las probetas CT es $\lambda_V = 0,0012 \rho_0 + 0,012$ con un coeficiente de determinación alto ($R^2 = 0,89$) (Figura 3). Este resultado es comparable con los datos reportados por Torelli y Gorišek, (1995) para 43 maderas, cuya correlación es $\lambda_V = 0,0006 \rho_0 + 0,1954$ con un coeficiente de determinación alto ($R^2 = 0,79$). Por motivos de escala, en la figura 3 no se visualizan los 43 datos de la bibliografía.

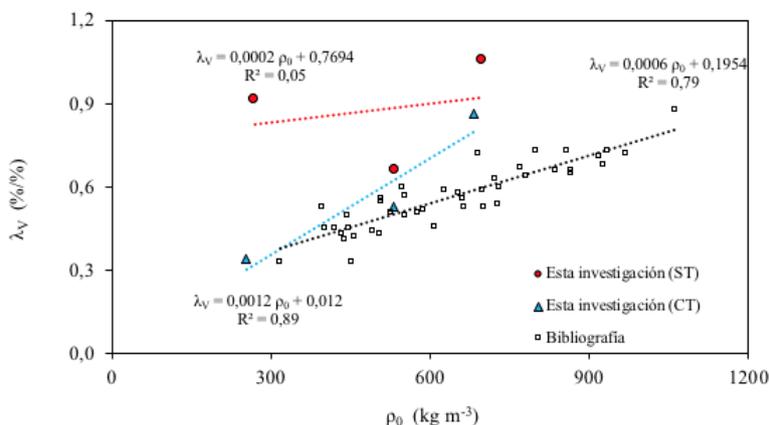


Figura 3. Coeficientes de higoexpansión volumétrica en función de las densidades.

Índices de anti higoexpansión

El efecto de un tratamiento con preservantes químicos sobre la higoexpansión de la madera se mide por el índice de antihigoexpansión. Valores positivos y altos de este índice indican que el tratamiento reduce de manera significativa la higoexpansión volumétrica. El tratamiento de sales de boro con concentración del 3% mejora la estabilidad dimensional de la madera. Los índices de antihigoexpansión tienden a disminuir a medida que la densidad básica se incrementa (Tabla

2), con una correlación respecto a las densidades de $I_A = -0,1095 \rho_0 + 89$ ($R^2 = 0,89$) (Figura 4). Caso especial es *S. campanulata*, madera con densidad básica muy baja ($\rho_0 = 269 \text{ kg m}^{-3}$) cuyo índice de antihigoexpansión es de 63%, el más alto. Si bien las magnitudes son comparables a las reportadas en la bibliografía por Dubey *et al.*, (2011); Islam *et al.*, (2012); Qian *et al.*, (2013); Soltani *et al.*, (2013); Jiang *et al.*, (2015) y Giridhar *et al.* (2017), la correlación de estos datos con las densidades es baja: $I_A = 0,073 \rho_0 + 4,7$ ($R^2 = 0,21$).

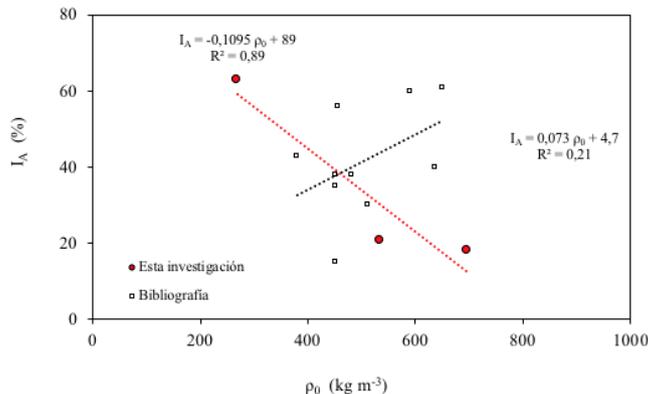


Figura 4. Índices de anti higoexpansión en función de las densidades..

Relaciones de anisotropía

Las magnitudes de las relaciones de anisotropía para la madera ST y CT (Tabla 2) de este trabajo son similares a las reportadas en la bibliografía. Torelli y Gorišek (1995) reportan para 43 especies mexicanas un mínimo de 1,0 y un máximo de 2,7; Shukla y Kandem (2010) reportan para nueve especies de Camerún un mínimo de 1,1 y un máximo de 2,4 y Hernández (2007) reporta para nueve especies del Perú y *Acer saccharum* un mínimo de 1,0 y un máximo de 2,4. De acuerdo con Silva *et al.* (2010), la clasificación de su estabilidad dimensional según la relación de anisotropía T/R es la siguiente: *S. campanulata* (ST), buena; *S. campanulata* (CT), mala; *F. americana* (ST), buena; *F. americana* (CT), regular; *A. plurijuga* (ST), buena; y *A. plurijuga* (CT), muy buena. En el mismo contexto, las diferencias aritméticas de las relaciones de anisotropía entre las maderas ST y CT aumentan 33% para *S. campanulata* y *F. americana*. En contraste, para *A. plurijuga*, esta diferencia disminuye 33%.

Lahtela *et al.* (2014) distinguen entre la modificación química de la madera y el impregnado con sustancias protectoras. La primera se refiere al tratamiento donde un reactivo reacciona dentro de los componentes de la pared celular. Las reacciones también se pueden formar al llenar los lúmenes celulares con resinas o productos químicos. En cambio, el impregnado se refiere a los tratamientos donde la madera es llenada con un material inerte o una solución incapaz de hacer enlaces químicos con otros materiales, como es el caso del tratamiento con sales de boro utilizando el baño caliente-frío.

Las alteraciones al interior de la pared celular disminuyen la anisotropía, mientras que las modificaciones que llenan el lumen celular la aumentan (Sargent, 2019). Los cambios dimensionales en maderas

tratadas dependen de los cambios estructurales resultantes del tratamiento (Ohmae *et al.*, 2002) como pueden ser: la modificación química o impregnación en la pared celular; la impregnación de la pared celular y revestimiento de la superficie interna del lumen celular; y el relleno del lumen celular con el reactivo mientras la pared celular permanece sin tratamiento, como ocurre en el tratamiento de baño caliente-frío. Así, la relación de anisotropía se incrementa cuando el lumen celular se rellena con soluciones acuosas de sales de boro. De tal forma, las diferencias entre la madera ST y CT (Tabla 2) son negativas para *S. campanulata* y *F. Americana*. Sin embargo, este parámetro es positivo para *A. plurijuga*, posiblemente como efecto de la temperatura y la baja retención de sales de boro (3,7 kg m⁻³).

La correlación entre la relación de anisotropía en función de las densidades en las maderas ST es de $T/R = 0,0002 \rho_0 + 1,91$ ($R^2 = 0,15$); y para las maderas CT es de $T/R = -0,0036 \rho_0 + 3,97$ ($R^2 = 0,97$). La Figura 5 presenta las correlaciones de esta investigación y las compara con la correlación calculada con datos de Silva *et al.*, (2010), Ávila y Herrera (2012) y Fuentes-Talavera *et al.*, (2014): $T/R = -0,0001 \rho_0 + 2,1$ ($R^2 = < 0,1$). El coeficiente de determinación para maderas ST de esta investigación es bajo y el derivado de la correlación calculada con datos de la bibliografía califica como inexistente. En cambio, el coeficiente de determinación correspondiente a las maderas CT de *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga* califica como muy alto. En efecto, se trata de tres especies diferentes y con tres estructuras anatómicas distintas. Si la relación de anisotropía está relacionada principalmente respecto al arreglo celular anatómico, dicha estructura posiblemente no se vea modificada por el tratamiento. Para efectos de comprender mejor el fenómeno es necesario considerar que el tamaño y cantidad de rayos medulares difieren para cada especie.

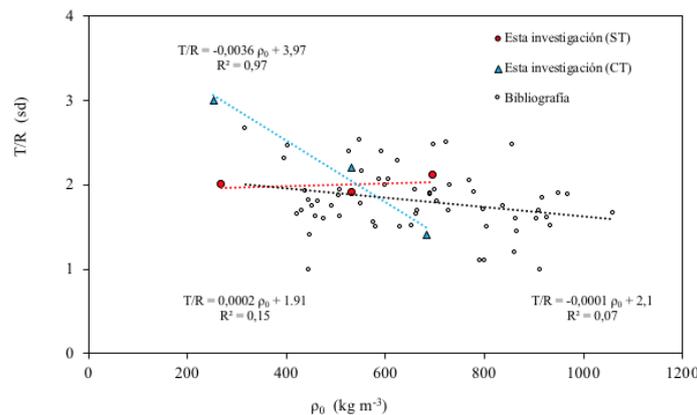


Figura 5. Relaciones de anisotropía en función de las densidades.

El efecto combinado de la organización celular y la anisotropía local de las paredes celulares, así como las diferentes propiedades de los componentes químicos de la madera son responsables de la anisotropía transversal (Ohmae *et al.*, 2002; Perré, P. 2002; Badel *et al.*, 2006; Shukla y Kandem, 2010; Rafsanjani *et al.*, 2012; Patera *et al.*, 2013; Zhang, 2015; Derome *et al.*, 2018; Sargent, 2019). Sintetizando la información reportada por estos autores, los principales factores para interpretar la anisotropía de las higoexpansiones entre las direcciones tangencial y radial de la madera son: la variedad en la geometría y organización celular, así como en la forma y espesor de la pared celular, particularmente el ángulo de microfibrillas en la capa S2; las diferencias en el espesor y las propiedades higroscópicas de las paredes celulares en las direcciones radial y tangencial; la presencia y el tamaño de las células de radios; así como el porcentaje y distribución en la pared celular de celulosa, hemicelulosas y lignina. Con base en los resultados de la anisotropía en esta investigación, no es posible explicar el diferente comportamiento que se obtuvo entre estas tres maderas y los dos tipos de tratamiento, por lo que se necesitan hacer más investigaciones en este campo.

V. CONCLUSIONES

Las maderas de *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga* fueron sometidas al mismo tratamiento de impregnado y, después de un baño caliente-frío de sales de boro con una concentración de 3%, sus características higroscópicas se modificaron de mane- ra específica según las especies y las direcciones observadas. El tratamiento mejora la estabilidad dimensional de *S. campanulata* en 63%, de *F. americana* en 21% y para *A. plurijuga* en 18%.

Este trabajo se basó en mediciones de laboratorio y tiene un carácter empírico. Para ampliar esta línea de investigación se sugiere desarrollar modelos para explicar las reacciones entre los componentes químicos de la madera y las sustancias de impregnación. Asimismo, es deseable investigar el efecto de otros mecanismos involucrados en el tratamiento con sales de boro. Igualmente, es recomendable indagar sobre la influencia de las características anatómicas del plano leñoso sobre las propiedades higroscópicas de estas especies.

V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Wood-Preservers' Association (AWPA). (2014). P5-07 Standard for Waterborne Preservatives. American Wood-Preservers' Association. Chicago, United States.
- Ajuziogu, G. C., Amujiri, A. N., Njoku, E. U., Ozokolie, C. B., y Ojua, E. O. (2020). Determination of swelling and dimensional stability of some nigerian timber species. *Annual Research & Review in Biology*, 35(1), 24-29. DOI: 10.9734/ARRB/2020/v35i130177
- Ávila, L. E., y Herrera, M. A. (2012). Efecto de los extrañbles en tres propiedades físicas de la madera de *Enterolobium cyclocarpum* procedente de Michoacán, México. *Bosque*, 33(2), 227-232. DOI: 10.4067/S0717-92002012000200013
- Ayrlimis, N. (2013). Combined effects of boron and compatibilizer on dimensional stability and mechanical properties of wood/HDPE composites. *Composites: Part B*, 44, 745-749. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.04.002
- Alfaro Pérez, J. D. (2013). Estudio de retención y penetración de tres preservantes comerciales en nueve especies maderables presentes en Costa Rica. *Ingeniería*, 23(1), 107-119. DOI: 10.15517/ing.v23i1.9825
- Badel, E., Bakour, R., y Perré, P. (2006). Investigation of the relationships between anatomical pattern, density and local swelling of oak wood. *IAWA Journal* 27(1), 55-71. DOI: 10.1163/22941932-90000137
- Berry, S. L., y Roderick, M. L. (2005). Plant-water relations and the fibre saturation point. *New Phytologist*, 168, 25-37. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2005.01528.x
- Berrocal, A., Muñoz, F., y González, G. (2004). Ensayo de penetrabilidad de dos preservantes a base de boro en madera de melina (*Gmelina arborea*) crecida en Costa Rica. *Kurú: Revista Forestal*, 1(3), 1-12.

- Caldeira, F. (2010). Boron in Wood Preservation. A Review in its Physico-Chemical Aspects. *Silva Lusitana*, 18(2), 179-196.
- Chiniforush, A. A., Akbarnezhad, A., Valipour, H., y Malekmohammadi, S. (2019). Moisture and temperature induced swelling/shrinkage of softwood and hardwood glulam and LVL: An experimental study. *Construction and Building Materials*, 207, 70-83. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.114
- Dubey, M. K., Pang, S., y Walker, J. (2011). Effect of oil heating age on colour and dimensional stability of heat treated *Pinus radiata*. *European Journal of Wood Products*, 69, 255-262. DOI: 10.1007/s00107-010-0431-0
- Derome, D., Zhang, C., Chen, M., y Carmeliet, J. (2018). Understanding swelling of wood through multiscale modeling. 7th International Building Physics Conference. Healthy, Intelligent and Resilient Buildings and Urban Environments. Syracuse, NY, USA. DOI: 10.14305/ibpc.2018.be-9.06
- Engelund, E. T., Thygesen, L. G., Svensson, S., y Hill, C. A. S. (2013). A critical discussion of the physics of wood-water interactions. *Wood Science and Technology*, 47(1), 141-161. DOI: 10.1007/s00226-012-0514-7
- Esteves, B.M., y Pereira, H.M. (2009). Wood modification by heat treatment: a review. *BioResources*, 4(1), 370-404. DOI: 10.15376/BIORES.4.1.370-404
- Fredriksson, M. (2019). On Wood-Water Interactions in the Over-Hygroscopic Moisture Range-Mechanisms, Methods, and Influence of Wood Modification. *Forests*, 10(9), 1-16. DOI: 10.3390/f10090779
- Fu, Z., Zhou, Y., Gao, X., Liu, H., y Zhou, F. (2019). Changes of water related properties in radiata pine wood due to heat treatment. *Construction and Building Materials*, 227, 116692. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116692
- Fuentes-Salinas, M. (2000). Estimación del punto de saturación de la fibra (PSF) de las maderas. *Revista Chapingo Serie Ciencia Forestales y del Ambiente*, 6(1), 79-81.
- Fuentes-Talavera, F. J., Silva-Guzmán, J. A., Rodríguez-Anda, R., Sanjuán-Dueñas, R., y Richter, H. (2014). Perfil de estabilidad dimensional de las maderas primavera y rosa morada. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(24), 56-68. DOI: 0.29298/rmcf.v5i24.319
- Gérardin, P. (2016). New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood. A review. *Annals of Forest Science*, 73(3), 559-570. DOI: 10.1007/s13595-015-0531-4
- Gereke, T., y Niemz, P. (2010). Moisture-induced stresses in spruce cross-laminates. *Engineering Structures*, 32(2), 600-606. DOI: 0.1016/j.engstruct.2009.11.006
- Giridhar, B. N., Pandey, K. K., Prasad, B.E., Bisht, S.S., y Vagdevi, H.M. (2017). Dimensional stabilization of wood by chemical modification using isopropenyl acetate. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 19(1), 15-20. DOI: 0.4067/S0718-221X2017005000002
- González-Laredo, R. F., Rosales-Castro, M., Rocha-Guzmán, N. E., Gallegos-Infante, J. A., Moreno-Jiménez, M. R., y Karchesy, J. J. (2015). Wood preservation using natural products. *Madera y Bosques*, 21, 63-76. DOI: 10.21829/myb.2015.210427
- He, Z., Qian, J., Qu, L., Yan, N., y Yi, S. (2019). Effects of Tung oil treatment on wood hygroscopicity, dimensional stability and thermostability. *Industrial Crops & Products*, 140, 111647. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.111647
- Hernández, R. E. (2007). Effects of extraneous substances, wood density and interlocked grain on fiber saturation point of hardwoods. *Wood Material Science and Engineering*, 2, 45-53. DOI: 10.1080/17480270701538425
- Islam, Md. S., Hamdan, S., Rusop, M., Rahman, Md. R., Ahmed, A. S., y Mohd Idrus, M. A. M. (2012). Dimensional stability and water repellent efficiency measurement of chemical modified tropical light hardwood. *BioResources*, 7(1), 1221-1231. DOI: 10.15376/BIORES.7.1.1221-1231

- Jiang, J., Li, J., y Gao, Q. (2015). Effect of flame retardant treatment on dimensional stability and thermal degradation of wood. *Construction and Building Materials*, 75, 74-81. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.10.037
- Joffre, T., Isaksson, P., Dumont, P. J. J., Rolland du Roscoat, S., Sticko, S., Orgéas, L. y Gamstedt, E. K. (2016). A method to measure moisture induced swelling properties of a single wood cell. *Experimental Mechanics*, 56, 723-733. DOI: 10.1007/s11340-015-0119-9
- Kartal, S. N., Hwang, W. J., y Imamura, Y. (2007). Water absorption of boron-treated and heat-modified wood. *Journal of Wood Science*, 53, 454-457. DOI: 10.1007/s10086-007-0877-9
- Kocaefe, D., Huang, X., y Kocaefe, Y. (2015). Dimensional Stabilization of Wood. *Current Forestry Reports*, 1, 151-161. DOI: 10.1007/s40725-015-0017-5
- Koman, S., y Feher, S. (2015). Basic density of hardwoods depending on age and site. *Wood Research*, 60(6), 907-912.
- Kotlyarova, I. A., y Stepina, I. V. (2018). Decrease in swelling capacity of pine wood modified with aminoborates. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 463(2), 022007. DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022007
- Koumbi-Mounanga, T., Morris, P. I., Lee, M. J., Saadat, N. M., Leblon, B., y Cooper, P. A. (2015). Prediction and evaluation of borate distribution in Eastern black spruce (*Picea mariana* var. *mariana*) wood products. *Wood Science and Technology*, 49(3), 457-473. DOI: 10.1007/s00226-015-0714-z
- Laine, L., Belt, T., Rautkari, L., Ramsay, J., Hill, C. A. S., y Hughes, M. (2013). Measuring the thickness swelling and set-recovery of densified and thermally modified Scots pine solid wood. *Journal of Materials Science*, 48, 8530-8538. DOI: 10.1007/s10853-013-7671-4
- Lahtela, V., Hämäläinen, K., y Kärki, T. (2014). The effects of preservatives on the properties of wood after modification (Review paper). *Baltic Forestry*, 20(1), 189-203.
- Lesar, B., Gorišek, Z., y Humar, M. (2009). Sorption Properties of Wood Impregnated with Boron Compounds, Sodium Chloride and Glucose. *Drying Technology*, 27, 94-102. DOI: 10.1080/07373930802565947
- Lesar, B., Straže, A., y Humar, M. (2011). Sorption Properties of Wood Impregnated with Aqueous Solution of Boric Acid and Montan Wax Emulsion. *Journal of Applied Polymer Science*, 120, 1337-1345. DOI: 10.1002/app.33196
- Moya, R., y 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*, 60(3), 359-374.
- Murata, K., Watanabe, Y., y Nakano, T. (2013). Effect of Thermal Treatment on Fracture Properties and Adsorption Properties of Spruce Wood. *Materials*, 6, 4186-4197. DOI: 10.3390/ma6094186
- Nakano, T. (2003). Effects of Cell Structure on Water Sorption for Wood. *Holzforschung*, 57, 213-218. DOI: 10.1515/HF.2003.031
- Neagu, R.C., Gamstedt, E.K., y Lindström, M. (2005). Influence of wood-fibre hygroexpansion on the dimensional instability of fibre mats and composites. *Composites Part A, Applied Science and Manufacturing*, 36(6), 772-788. DOI: 10.1016/j.compositesa.2004.10.023
- Nopens, M., Riegler, M., Hansmann, C., y Krause, A. (2019). Simultaneous change of wood mass and dimension caused by moisture dynamics. *Scientific Reports*, 9, 1-11. DOI : 10.1038/s41598-019-46381-8
- Obounou-Akong, F., Gérardin, P., Thévenon, M. F., y 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

- O'Leary, P., y Hodges, P. A. (2001). The relationship between full penetration uptake and swelling of different fluids. *Wood Science and Technology*, 35(3), 217-227. DOI: 0.1007/s002260100096
- Ohmae, K., Minato, K., y Norimoto, M. (2002). The Analysis of Dimensional Changes Due to Chemical Treatments and Water Soaking for Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) Wood. *Holzforschung*, 56, 98-102. DOI: 10.1515/HF.2002.016
- Obanda, D. N., Shupe, T. F., y 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
- Patera, A., Derome, D., Griffa, M., y Carmeliet, J. (2013). Hysteresis in swelling and in sorption of wood tissue. *Journal of Structural Biology*, 182, 226-234. DOI: 0.1016/j.jsb.2013.03.003
- Pereira Baraúna, E. E., Mota Nunes, A., Cabral Moulin, J., Campos Monteiro, T., Chaves Arantes, M. D., y Benigno Paes, J. (2017). Influence of boron compounds on the physical properties of Eucalyptus sp wood. *Scientia forestalis*, 45(113), 197-204.
- Perré, P. (2002). Wood as a multi-scale porous medium: observation, experiment, and modelling. First Intern. Conf. European Soc. for Wood Mechanics (selected and reviewed papers), EPFL, Lausanne, Switzerland.
- Petr, P., y Aleš, D. (2014). Moisture absorption and dimensional stability of poplar wood impregnated with sucrose and sodium chloride. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 16(3), 299-311. DOI: 10.4067/S0718-221X2014005000023
- Qian Y., Olov, K., Sheikh, A. A., y Moren, T. (2013). Dimensional stability and water repellency of European aspen improved by oxidized carbohydrates. *BioResources*, 8(1), 487-498. DOI: 10.15376/biores.8.1.487-498
- Qian, J., He, Z., Li, J., Wang, Z., Qu, L., y Yi, S. (2018). Effect of wax and dimethyl silicone oil pretreatment on wood hygroscopicity, chemical components, and dimensional stability. *BioResources*, 13(3), 6265-6279.
- Qian, J., Li, J., Wang, Z., Qu, L., Ding, Y., Yi, S., y He, Z. (2019). Effects of wax and dimethyl silicone oil mixed impregnation on dimensional stability of two hardwoods. *Wood Research*, 64 (1), 165-176.
- Rafsanjani, A., Derome, D., Wittel, F. K., y Carmeliet, J. (2012). Computational up-scaling of anisotropic swelling and mechanical behavior of hierarchical cellular materials. *Composites Science and Technology*, 72(6), 744-751. DOI: 10.1016/j.compscitech.2012.02.001
- Rafsanjani, A. Stiefel, M., Jefimovs, K., Mokso, R., Derome, D., y Carmeliet, J. (2014). Hygroscopic swelling and shrinkage of latewood cell wall micropillars reveal ultrastructural anisotropy. *Journal of The Royal Society Interface*, 11, 20140126. DOI: 10.1098/rsif.2014.0126
- Ramos, A. M., Caldeira J. F., y Botelho, C. (2006). Boron fixation in wood: studies of fixation mechanisms using model compounds and maritime pine. *Holz Roh Werkst*, 64, 445-450. DOI: 10.1007/s00107-006-0139-3
- Repellin, V., y Guyonnet, R. (2005). Evaluation of heat treated wood swelling by differential scanning calorimetry in relation with chemical composition. *Holzforschung*, 59(1), 28-34. DOI: 10.1515/HF.2005.005
- Sahin, H. T. (2010). Experimental determination of the anisotropic swelling and water sorption properties of chestnut wood. *Wood Research*, 55 (1), 33-40.
- Sandberg, D., Kutnar, A., y Mantanis, G. (2017). Wood modification technologies. A review. *Forest*, 10, 895-908. DOI: 10.3832/for2380-010
- Sargent, R. (2019). Evaluating dimensional stability in solid wood: a review of current practice. *Journal of Wood Science*, 65, 36-47. DOI: 10.1186/s10086-019-1817-1

- Shukla, S. R., y Kamdem, D. P. (2010). Dimensional stability of nine tropical hardwoods from Cameroon. *Journal of Tropical Forest Science*, 22(4), 389-396.
- Silva Guzmán, J. A., Fuentes Talavera, F. J., Rodríguez Anda, R., Torres Andrade, P. A., Lomelí Ramírez, M. A., Ramos Quirarte, J., Waitkus, C., y Richter, H. G. (2010). *Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas*. Comisión Nacional Forestal, México.
- Silva, C., Branco, J. M., Camões, A., y Lourenço, P. B. (2014). Dimensional variation of three softwood due to hygroscopic behavior. *Construction and Building Materials*, 59, 25-31. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.02.037
- Simsek, H., Baysal, E., Yilmaz, M., y Culha, F. (2013). Some mechanical properties of wood impregnated with environmentally-friendly boron and copper based chemicals. *Wood Research*, 58(3), 495-504.
- Simsek, H., y Baysal, E. (2015). Some physical and mechanical properties of borate-treated oriental beech wood. *Drvna Industrija*, 66(2), 97-103. DOI: 10.5552/drind.2015.1356
- Soltani, M., Nafaji, A., Yousefian, S., Naji, H. R., y Bakar, E. S. (2013). Water repellent effect and dimension stability of beech wood impregnated with nano-zinc oxide. *BioResources*, 8(4), 6280-6287. DOI: 10.15376/biores.8.4.6280-6287
- Sotomayor Castellanos, J. R., y Ávila Calderón, L. E. A. (2019). Retención y penetración de sales de boro en tres maderas angiospermas: *Spathodea campanulata*, *Fraxinus americana* y *Albizia plurijuga*. *Ciencia y Tecnología*, 12(2), 23-31. DOI: 10.18779/cyt.v12i2.323
- Sotomayor Castellanos, J. R., y Correa Jurado, S. (2016). Retención de sales de boro en la madera y su efecto en el módulo de elasticidad dinámico. *Revista Científica*, 24, 90-99. DOI: 0.14483/10.14483/udistrital.jour.RC.2016.24.a9
- Sotomayor Castellanos, J. R., y 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.
- Sotomayor Castellanos, J. R., Giraldo Forero, M. P., Gené Sera, J., Correal Mòdol, E., y Vilches Casals, M. (2018). Efecto de sales de boro en la densidad y en el módulo de elasticidad de tres maderas mexicanas. *Revista Ingeniería*, 28(2), 31-44. DOI: 10.15517/ri.v28i2.31608
- Tamarit-Urias, J. C., y Fuentes-Salinas, M. (2003). Parámetros de humedad de 63 maderas latifoliadas mexicanas en función de su densidad básica. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 9(2), 155-164.
- Temiz, A., Alfredsen, G., Eikenes, M., y Terziev, N. (2008). Decay resistance of wood treated with boric acid and tall oil derivatives. *Bioresource Technology*, 99, 2102-2106. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.08.052
- Thévenon, M. F., Tondi, G., y Pizzi, A. (2010). Environmentally friendly wood preservative system based on polymerized tannin resin-boric acid for outdoor applications. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 12(3), 253-257. DOI: 10.4067/S0718-221X2010000300009
- Tippner, J., Hrivnák, J., y Kloiber, M. (2016). Experimental Evaluation of Mechanical Properties of Softwood using Acoustic Methods. *BioResources*, 11(1), 503-518. DOI: 10.15376/biores.11.1.503-518
- Torelli, N., y Gorišek, Ž. (1995). Mexican tropical hardwoods - dimensional stability. *Hoiz als Roh- und Werkstoff*, 53, 277-280. DOI: 10.1007/s001070050090
- Tsunoda, K. (2001). Preservative properties of vapor-boron-treated wood and wood-based composites. *Journal of Wood Science*, 47, 149-153. DOI: 10.1007/BF00780565
- Tiryaki, S., Bardak, S., Aydın, A., y Nemli, G. (2016). Analysis of volumetric swelling and shrinkage of heat treated woods: experimental and artificial neural network modeling approach. *Maderas. Ciencia y*

tecnología, 18(3), 477-492. DOI: 10.4067/S0718-221X2016005000043

Zhang, W. (2015). Leachability of boron from trimethyl borate (TMB)/poplar wood composites prepared by solgel process. *Wood Research*, 60(3), 471-476.