RECyT
Año 18 / Suplemento Nº 1 / 2016 / 40–46

Retención de Sales de Boro en Tres Maderas Mexicanas. Evaluación Mecánica por Vibraciones

Retention of Boron Salts in Three Mexican Woods. Mechanical Assessment by Vibrations

Javier R. Sotomayor Castellanos[1,*], José M. Villaseñor Aguilar[1]

1 - Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Avenida Francisco J. Múgica S/N, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México.

* E-mail: madera999@yahoo.com

Resumen

El objetivo de la investigación fue determinar la densidad y el módulo de elasticidad de madera de *Guazuma ulmifolia*, *Spathodea campanulata* y *Abies religiosa* y observar el efecto del proceso de impregnación con sales de boro sobre estas propiedades. Se estudiaron lotes de 35 probetas normalizadas y se impregnaron con una solución con una concentración del 3% con el método baño caliente-frío. Antes y después del tratamiento de impregnación se realizaron pruebas de vibraciones. Los valores promedio de la densidad, frecuencia natural y módulo de elasticidad son proporcionales a los reportados para maderas mexicanas. Cuantitativamente, los resultados de retención son comparables con los de la bibliografía. Considerando que las tres especies fueron sometidas al mismo tratamiento de impregnado y probadas con un método de carácter no destructivo, se concluye que cada especie de madera responde mecánicamente de manera diferente e independiente al proceso de impregnación con sales de boro.

Palabras clave: Densidad; Módulo de elasticidad; Absorción; Retención; Baño caliente-frío.

Abstract

The aim of the research was to determine the density and the elasticity modulus of *Guazuma ulmifolia*, *Spathodea campanulata* and *Abies religiosa* wood and to observe the effect produced by a boron salts impregnation process on these properties. Thirty-five sets of standard specimens were studied, and impregnated with a 3% concentration solution with a hot-cold bath method. Before and after the treatment, transversal vibration tests were realized. Average values of density, natural frequency and elasticity modulus are proportional to Mexican woods previously reported. Quantitatively, results of boron salts retention were comparable with the ones reports in the bibliography. Considering that the three species were exposed to the same treatment of impregnation and tested with a non-destructive method, the research concluded that each wood species mechanically reacts in a different and independent way to the process of impregnation of Boron salts.

Keywords: Density; elasticity modulus; Absorption; Retention; Hot-cold bath.

Introducción

Para asegurar la integridad estructural de la madera y en consecuencia su funcionamiento como elemento resistente, la industria de la construcción requiere que las especies con potencial para su incorporación en el proceso constructivo estén caracterizadas mecánicamente y que se cuente con información confiable sobre su aptitud para procesos de preservado [1].

La determinación del módulo de elasticidad, determinado por métodos no destructivos, proporciona al ingeniero y/o constructor con madera, uno de los parámetros necesarios al cálculo estructural [2]. La determinación de la retención de substancia protectora de una especie es un indicador de la longevidad de la madera una vez en servicio [3].

El módulo de elasticidad derivado de pruebas de vibraciones transversales, produce información que puede ser utilizada como índice comparativo de la calidad de una especie en particular y como parámetro de ingeniería necesario al análisis estructural probabilístico y sísmico [4, 5].

Las sales de boro empleadas como preservador para la madera, cumplen una acción fungicida e insecticida, con poca toxicidad [6, 7]. De tal forma, que por ser también inodoras, incoloras e inflamables, la aplicación de boro en la madera es, actualmente, una de las estrategias más efectivas de preservación [8].

Las especies *Guazuma ulmifolia* Lam., *Spathodea campanulata P.* Beauv. y *Abies religiosa* (kunth) schltdl & cham., son maderas con potencial para diversificar su empleo. Sus características mecánicas y sus índices de calidad, destacan entre maderas con características tecnológicas similares [9]. Sin embargo, existe poca información tecnológica sobre ellas.

Las vibraciones transversales han demostrado su eficiencia en la determinación del módulo de elasticidad. Si se emplean como método de evaluación no destructivo, pueden ser útiles para observar el efecto de un tratamiento en una probeta de madera y poder observar su respuesta sin modificar de manera substancial su integridad física [10, 11]. De tal manera, que la evaluación del efecto de un proceso, en este caso de impregnación, puede ser observado en una muestra común de madera antes y después del tratamiento.

Ávila-Calderón *et al.* [12] reportan trabajos en los cuales el proceso de impregnación "baño caliente-frío" ha sido empleado con éxito para el estudio de la madera. Esta técnica solo necesita instrumentos accesibles y resulta un proceso económico.

En la literatura mexicana se encuentra información sobre las características de las especies en estudio [13], sobre la experimentación con sales de boro en la madera y sus estrategias de aplicación [14]. Igualmente, existe información relevante sobre los métodos de carácter no destructivo [15]. Sin embargo, no se encontraron trabajos publicados que integren pruebas de vibraciones en el efecto sobre el módulo de elasticidad de la madera, originado por la impregnación con sales de boro. De aquí surge la pregunta de investigación: ¿La impregnación de la madera con sales de boro altera su densidad y su módulo de elasticidad?

Para responder a esta pregunta, la investigación propone la siguiente hipótesis de trabajo: el tratamiento de impregnación con sales de boro, a una concentración de 3%, no modifica de manera significativa la densidad y el módulo de elasticidad de la madera impregnada con el método de baño caliente-frío. Esta proposición está delimitada al estudio de la muestra representativa de madera de las especies especificadas.

Con el objeto de verificar la hipótesis, la investigación tiene como objetivo determinar la densidad y el módulo de elasticidad de una muestra de maderas de *G. ulmifolia*, *S. campanulata* y *A. religiosa* y observar el efecto del proceso de impregnación con sales de boro sobre estas propiedades. El módulo de elasticidad siendo determinado con el método de vibraciones.

Materiales y Métodos

Se recolectó madera de *G. ulmifolia*, *S. campanulata* y *A. religiosa* en aserraderos del Estado de Michoacán, México. La madera se almacenó durante 24 meses en una cámara de acondicionamiento con una temperatura de 20 ºC (± 1 °C) y una humedad relativa del aire de 65% (± 2%), hasta que presentó un peso constante. Para cada una de las especies, se prepararon lotes de 35 probetas con dimensiones de 0,02 m x 0,02 m x 0,32 m, respectivamente en las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso y de acuerdo con la norma ISO 3129: 2012 [16]. La madera no contenía anomalías estructurales y defectos de crecimiento. Con el objeto de evitar flujo excesivo de líquidos en los extremos de las probetas, sus caras laterales fueron cubiertas con pintura vinílica.

Se prepararon 30 litros de solución de sales de boro con una concentración al 3%. La solución consistió en ácido bórico (39,4%) y borato de sodio (60,6%) de acuerdo con la norma NMX-C-410-ONNCCE-1999 [17].

Las probetas se impregnaron con el método "baño caliente-frío" siguiendo el protocolo propuesto por Ávila-Calderón *et al.* [12]. La madera se sumergió durante 8 horas en un baño de agua con temperatura de 60 ºC y presión atmosférica. Posteriormente, las probetas se sumergieron durante 16 horas en un baño frío, con la solución de sales de boro y temperatura de 23 °C y presión atmosférica.

Los pesos y dimensiones de las probetas fueron medidos antes y después del tratamiento. Posteriormente, se determinaron la absorción y la retención de las sales en cada probeta.

La absorción se determinó con la fórmula propuesta por Ávila-Calderón *et al.* [12]:

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

Donde:
A = Absorción (kg m-3)
P1 = Peso inicial de la probeta antes del tratamiento (kg)
P2 = Peso final de la probeta después del tratamiento (kg)
V = Volumen de la probeta después de tratamiento (m-3)

La retención se determinó con la relación propuesta por Simsek *et al.* [18]:

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

Donde:
R = Retención (kg m-3)
A = Absorción (kg m-3)
C = Concentración de la sustancia protectora (%)

La densidad de la madera fue calculada con la fórmula propuesta por Bodig y Jayne [19]:

$$\rho_{CH} = \frac{P}{V} \quad (3)$$

Donde:
ρCH = Densidad (kg m-3)
PCH = Peso de la probeta al momento del ensayo (kg)
VCH = Volumen de la probeta al momento del ensayo (m3)

El contenido de humedad inicial de la madera fue de-

terminado con tres grupos de probetas complementarias, correspondientes a cada una de las especies. El contenido de humedad se calculó con la fórmula propuesta por Bodig y Jayne [19]:

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

Donde:
CH = Contenido de humedad (%)
P1 = Peso de la probeta al momento del ensayo (kg)
P2 = Peso de la probeta en estado seco (kg)

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

Las pruebas de vibraciones transversales consistieron en medir la frecuencia natural de vibración perpendicular a la dirección longitudinal de la probeta. Con tal propósito, se utilizó el aparato Grindosonic®. El movimiento de las probetas se inició con un impacto elástico empleando un bastón flexible de 30 g de peso (Figura 1).

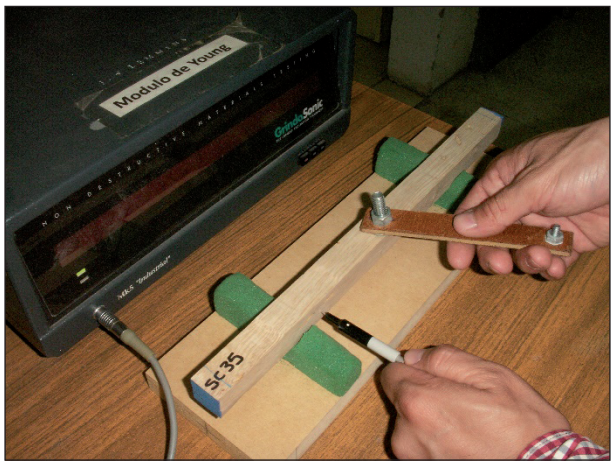

Figura 1: Pruebas de vibraciones transversales.

Las vibraciones fueron registradas con el sensor de vibración y las frecuencias se leyeron directamente en el aparato. Se realizaron tres solicitaciones y su promedio se empleó en los cálculos. La configuración de las pruebas se presenta en la Figura 2.

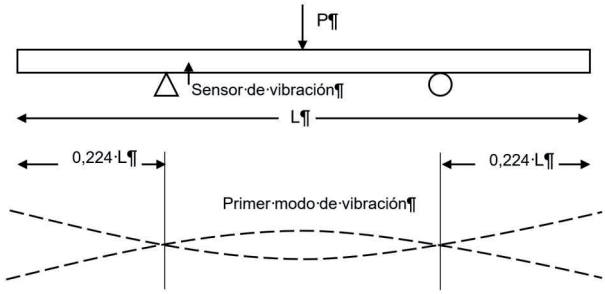

Figura 2: Configuración de las pruebas. P = Impacto; L = longitud de la viga.

El módulo de elasticidad en vibraciones transversales fue calculado con la fórmula propuesta por Machek *et al.* [20]:

$$E_{vt} = \frac{4\,\pi^2\, L_{vt}^{\ 4}\, f_{vt}^{\ 2}\, \rho_{12}}{m^4\ \ r^2} \left(1 + \frac{r^2}{l_{vt}^{\ 2}}\, K\right) \quad (5)$$

Donde:
Evt= Módulo de elasticidad en vibraciones transversales (Pa)
Lvt= Largo de la probeta (m)
lvt= Distancia entre apoyos (m)
fvt= Frecuencia natural de la probeta (Hz)
ρ12= Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg m-3)
m, K= Constantes adimensionales (12,65, 49,48)
r= Radio de giro de la sección transversal de la probeta (m2)

Con:
I= Momento de inercia de la sección transversal de la probeta (m4)
A= Área de la sección transversal de la probeta (m2)

Diseño experimental. Se diseñaron dos experimentos siguiendo las recomendaciones de Gutiérrez-Pulido y de la Vara-Salazar [21]. El primero comparó las medias de la retención para cada especie. En este caso, la especie de madera fue considerada el factor de variación. El segundo experimento contrastó las medias de la densidad y el módulo de elasticidad como las variables de respuesta, evaluadas para las mediciones con y sin tratamiento, para cada una de las tres especies estudiadas. Aquí el tratamiento de impregnación fue el factor de variación. El contenido de humedad de la madera, la concentración de la solución de sales de boro y los tiempos de inmersión se consideraron variables fijas.

Suponiendo una distribución normal con media cero () y varianza constante (σ2) e independientes entre sí, para cada prueba de diferencia de medias se verificó la hipótesis nula , y se contrastó con la hipótesis alterna. Los subíndices 1 y 2 representan el valor de las variables de respuesta para antes y después del tratamiento de preservación. El método empleado para discriminar entre las medias fue una prueba de Fisher con una diferencia mínima significativa de 95%. Se efectuaron pruebas con 35 réplicas en cada especie, antes y después del tratamiento, totalizando 210 muestras observadas. Los cálculos estadísticos fueron realizados con el programa Statgraphics®.

Resultados y Discusión

La Tabla 1 presenta la densidad, la frecuencia natural y el módulo de elasticidad con y sin tratamiento de impregnación, así como absorción y retención de sales de

boro para las especies *S. campanulata*, *G. ulmifolia* y *A. religiosa*.

Tabla 1: Densidad, características mecánicas de la madera, absorción y retención de sales de boro.

	ρ_{CH}	f_n	E_{vt}	ρ_{CH}	fn	E_{vt}	A	R
	(kg m^{-3})	(Hz)	(MPa)	(kg m^{-3})	(Hz)	(MPa)	(kg m^{-3})	(kg m^{-3})
	Sin tratamiento			Con tratamiento				
	G. ulmifolia (determinaciones realizadas: 35)							
	730	686	8 765	749	697	9 688	323,2	9,70
σ	46	55	1 165	42	53	1 249	13,48	0,40
CV (%)	6,37	7,98	13,29	5,61	7,58	12,89	4,17	4,17
	S. campanulata (determinaciones realizadas: 35)							
	357	655	3 765	336	685	3 591	477,0	14,31
σ	30	69	649	26	68	716	20,04	0,60
CV (%)	8,52	10,47	17,25	7,63	9,93	19,94	4,20	4,20
	A. religiosa (determinaciones realizadas: 35)							
	587	539	6 707	601	549	7 403	240,9	7,23
σ	298	262	3 462	307	267	3 829	41,96	1,26
CV (%)	50,70	48,52	51,61	51,08	48,59	51,72	17,42	17,42

ρ_{CH} = Densidad; f_n = Frecuencia natural; E_{vt} = Módulo de elasticidad; A = Absorción; R = Retención; = Media aritmética; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en porciento.

Los valores promedio de la densidad, frecuencia natural y módulo de elasticidad son semejantes a los reportados para maderas mexicanas [9]. Los coeficientes de variación son comparables con los encontrados en características higroscópicas de las maderas mexicanas [22], con excepción de *A. religiosa*, que mostró un coeficiente de variación dos veces superior a los de *S. campanulata* y *G. ulmifolia*.

La frecuencia y el módulo de elasticidad aumentaron en las probetas con tratamiento, con excepción de la densidad y el módulo de elasticidad de *S. campanulata*. Esta ligera mejoría puede ser atribuida al incremento de la masa de las probetas y su influencia en el cálculo del módulo de elasticidad con la fórmula (5), en la cual está implícita la masa de la probeta en su densidad al momento del ensayo.

Si la retención de sales de boro en *G. ulmifolia* es de 9,70 kg m-3, el peso adicional de la substancia preservadora en una probeta cuyo volumen es de 0,000128 m3, es de 0,00125 kg. Este pequeño incremento se ve reflejado en el aumento de la frecuencia natural en probetas con tratamiento, puesto que la inercia de la probeta aumenta significativamente y se necesita más fuerza para acelerar el sistema. Es decir, si se requiere más energía para poner en vibración la probeta, es consecuente de que su rigidez ha aumentado. El módulo de elasticidad siendo el parámetro que explica la rigidez del material, aumentará. Este fenómeno ejemplifica el incremento aparente del módulo de elasticidad en probetas con tratamiento de *S. campanulata* y *G. ulmifolia*. En contraste, *A. religiosa* presenta una disminución en su módulo de elasticidad, consecuencia de la disminución aparente de su densidad, una vez tratada la madera.

Retención de sales de boro. Cuantitativamente, los resultados de retención son comparables con los de Alfaro-Pérez [23]. Aplicando un proceso de preservado por inmersión, el autor presenta valores de retención de sales de boro para nueve especies de maderas tropicales: Hymenaea courbaril 23,2 kg m-3, Terminalia amazonia 12,9 kg m-3, Hieronyma alchorneoides 8,1 kg m-3, Cedrela odorata 5,7 kg m-3, Tectona grandis 9,1 kg m-3, Cupressus lusitanica 14,9 kg m-3, Enterolobium cyclocarpum 7 kg m-3, Calophyllum brasiliense 15 kg m-3 y Gmelina arborea 8,7 kg m-3. A manera de comparación, los valores para C. odorata, de esta investigación, pueden considerarse iguales a los resultados presentados por Alfaro-Pérez [23].

Para las tres especies, la prueba de diferencia de medias dio como resultado un valor P menor que 0,05 (Figura 3). Así, se puede rechazar la hipótesis nula en favor de la alterna. En consecuencia, existe una diferencia significativa entre las medias de las 3 variables. Este resultado sugiere que cada especie retiene diferentes cantidades de substancia preservadora, siendo *S. campanulata* la que más absorbe, seguida de *G. ulmifolia* y finalmente *A. religiosa*.

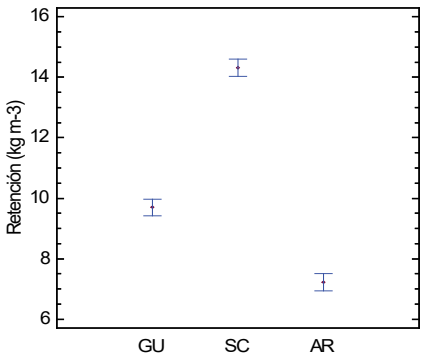

Figura 3: Medias de la retención para *G. ulmifolia* (GU), *S. campanulata* (SC) y *A. religiosa* (AR), con sus límites de confianza (α = 0.5).

Tratamiento de impregnación. Las pruebas de diferencias de medias para probetas con y sin tratamiento proporcionaron los siguientes resultados: las características físicas y mecánicas de cada especie se modifican de manera diferente según la especie observada.

Estadísticamente, *G. ulmifolia* no altera su densidad ni su frecuencia natural. Sin embargo, su módulo de elasticidad varía por el efecto del tratamiento. La densidad de *S. campanulata* varía, pero su frecuencia natural y su módulo de elasticidad no se modifican. La frecuencia natural de *A. religiosa* no se altera, mientras que su densidad y módulo de elasticidad se modifican.

Los valores promedio de retención de sales de boro para las especies, presentados en la Tabla 1, fueron mayores que el límite inferior tóxico de retención reportado en

trabajos anteriores. De acuerdo con Freitag y Morell [24], el umbral mínimo de retención de sales de boro, necesario para proteger a la madera de las pudriciones ocasionadas por hongos y/o moho, está comprendido en el intervalo de retención que va de 0,2 kg m-3 a 4,7 kg m-3. Por su parte, Kartal [25] propone una retención mínima de 1 kg m-3 para protección de la madera en condiciones de servicio al exterior. La Asociación Americana de Preservadores de madera [26] recomienda una retención mínima de sales de boro de 2,72 kg m-3, en la madera para elementos estructurales empleados en interiores.

La densidad, la frecuencia natural y el módulo de elasticidad de la madera con tratamiento son proporcionales a los parámetros correspondientes de la madera sin tratamiento, pero particulares a cada especie. Para poner en perspectiva este resultado, las particularidades de estas mediciones se presentan gráficamente en las Figuras 4, 5 y 6.

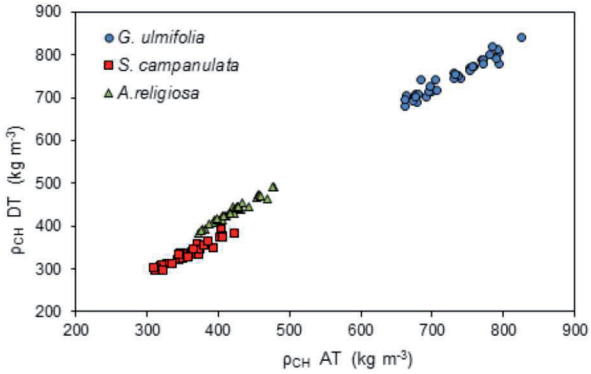

Figura 4: Dispersión de la densidad (ρCH) antes del tratamiento (AT) en función de la densidad después del tratamiento (DT).

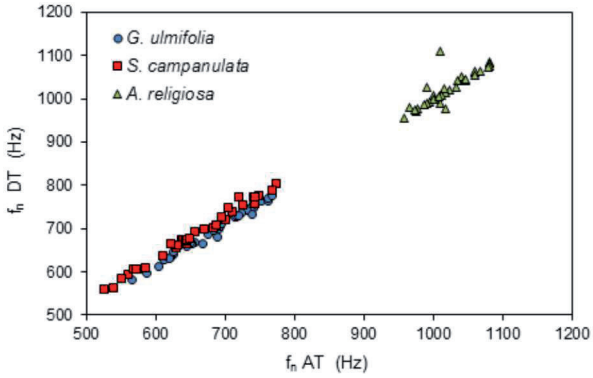

Figura 5: Dispersión de la frecuencia natural (fn) antes del tratamiento (AT) en función de la frecuencia natural después del tratamiento (DT).

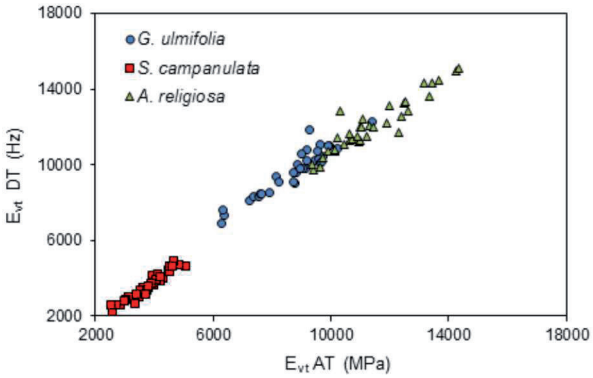

Figura 6: Dispersión del módulo de elasticidad (Evt) antes del tratamiento (AT) en función del módulo de elasticidad después del tratamiento (DT).

En los gráficos referidos, el ordenamiento de los valores difiere según el parámetro que se observe. Para la densidad, *G. ulmifolia* se distingue de *S. campanulata* y *A. religiosa*. En el caso de la frecuencia natural, es *A. religiosa* que se diferencia de *G. ulmifolia* y *S. campanulata*. Finalmente, para el módulo de elasticidad, *S. campanulata* se distingue de los valores de *G. ulmifolia* y *A. religiosa*.

Considerando que las tres especies fueron sometidas al mismo tratamiento de impregnado con un proceso de baño caliente-frío y probadas con un método de carácter no destructivo, se puede sugerir que, después de la aplicación de sales de boro con una concentración de 3%, cada especie de madera responde mecánicamente de manera diferente.

Este resultado no implica necesariamente un deterioro en la calidad de la madera. Las diferencias aritméticas entre los módulos de elasticidad de la madera sin y con tratamiento, son del orden de -4,6% para *S. campanulata*, de +10,5% para *G. ulmifolia* y de +10,4% para *A. religiosa*.

Es particular el caso de *S. campanulata* que fue la especie que retuvo alrededor del más del 100% de sales de boro, en comparación con *G. ulmifolia* y *A. religiosa*, y fue la única madera para la cual disminuyeron su densidad y módulo de elasticidad.

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

Conclusiones

Se determinaron las características densidad y módulo de elasticidad de madera de *G. ulmifolia*, *S. campanulata* y *A. religiosa* y se pudo observar la modificación de los valores promedio de estas características, ocasionada por el proceso de impregnación con sales de boro con concentración de 3%.

Para el caso de la densidad, la hipótesis de trabajo se verifica para la madera de *G. ulmifolia*. El tratamiento no modifica de manera significativa esta madera. En contraste, la hipótesis no se verifica para las maderas de *S. campanulata* y *A. religiosa*. Es decir el tratamiento aplicado modificó su densidad.

Para el módulo de elasticidad, la hipótesis de trabajo se verifica para la madera de *S. campanulata* y sucede lo opuesto para las maderas de *G. ulmifolia* y *A. religiosa*. En éstas, el módulo varió como efecto del tratamiento aplicado.

Cada especie se comporta de manera diferente cuando se impregna con sales de boro por el proceso de baño caliente-frío. Asimismo, para cada una de las especies estudiadas, los valores promedio de retención de sales de boro son mayores que el límite inferior tóxico de retención reportado en trabajos anteriores. Resultado que puede contribuir a que sean mejor apreciadas como materia prima para su industrialización.

Referencias

1. **American Institute of Timber Construction Timber Construction Manual**. Wiley & Sons. USA. 2012.
2. **Pellerin R. F. y Ross, R.J.** *Nondestructive Evaluation of Wood.* Forest Products Society. 2002.
3. **Fengel, D. y Wegener, G. Wood Chemistry, Ultrastructure, Reaction**. De Gruter. 1984.
4. **Probabilistic model code**. *Part 3.5-Timber.* Joint Committee on Structural Safety. 2006.
5. **Dietsch, P. y Köhler, J.** *Assessment of Timber Structures.* Modelling of the Performance of Timber Structures. European Science Foundation. Shaker Verlag. 2010.
6. **Tsunoda, K**. *Preservatives properties of vapor-boron-treated wood and wood based composites*. Journal of Wood Science. 47(2): 149-53. 2001.
7. **Obanda, D.D.; Shupe, T. y Barnes, H.M.** *Reducing leaching of boron-based wood preservatives*. A review of research. Bioresource Technology. 99(15): 7312-7322. 2008.
8. **Tondi, G.M.; Wieland, S.; Lemenager, N.; Petutschnigg, A.; Pizzi, A. y Thevenon, M.F.** *Efficacy of tannin in fixing boron in wood: fungal and termite resistance*. BioResources. 7(1): 1238-1252. 2012.
9. **Sotomayor-Castellanos, J.R.; Guridi-Gómez, L.I. y García-Moreno, T.** *Características acústicas de la madera de 152 especies mexicanas*. Velocidad del ultrasonido, módulo de elasticidad, índice material y factor de calidad. Base de datos. Investigación e Ingeniería de la Madera. 6(1): 3-32. 2010.
10. **Brémaud, I.; Gril, J. y Thibaut, B.** *Anisotropy of wood vibrational properties: dependence on grain angle and review of literature data*. Wood Science and Technology. 45(4): 735-754. 2011.
11. **Íñiguez-González, G.; Arriaga-Martitegui, F.; Esteban-Herrero, M. y Argüelles-Álvarez, R.** *Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural*. Informes de la Construcción. 59(506): 97-105. 2007.
12. **Ávila-Calderón, L.E.A.; Herrera-Ferreyra, M.A. y Raya-González, D.** *Preservación de la Madera en México*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 2012.
13. **Sotomayor-Castellanos, J.R.** *Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 2015.
14. **Cruz-de León, J.** *Manual para la protección contra el deterioro de la madera*. Comisión Nacional Forestal. 2010.
15. **Sotomayor-Castellanos, J.R.** *Caracterización mecánica de la madera con métodos no destructivos*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 2014.
16. **ISO 3129: 2012**. *Wood - Sampling methods and general requirements for physical and mechanical tests*. International Organization for Standardization. 2012.
17. **NMX-C-410-ONNCCE-1999**. Industria de la Construcción - Vivienda de Madera - Retención y Penetración de Sustancias Preservadoras en Madera - Métodos de Prueba. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. 1999.
18. **Simsek, H.; Baysal, E. y Peker, H.** *Some mechanical properties and decay resistance of wood impregnated with environmentally friendly borates*. Construction and Building Materials. 24(11): 2279-2284. 2010.
19. **Bodig, J. y Jayne, B.A.** *Mechanics of Wood and Wood Composites*. Van Nostrand Reinhold. 1982.
20. **Machek, L.; Militz, H. y Sierra-Alvarez, R.** *The influence of wood moisture content on dynamic modulus of elasticity measurements in durability testing*. Forschung verwertung. 53(5): 97-100. 2001.
21. **Gutiérrez-Pulido, H. y de la Vara-Salazar, R.** *Análisis y diseño de experimentos*. Mc Graw Hill. 2012.
22. **Sotomayor-Castellanos, J.R. y Ramírez-Pérez, M.** *Densidad y características higroscópicas de maderas mexicanas.* Base de datos y criterios de clasificación. Investigación e Ingeniería de la Madera. 9(3): 3-29. 2013.
23. **Alfaro-Pérez, J.D.** *Estudio de retención y penetración de tres preservantes comerciales en nueve especies maderables presentes en Costa Rica. Ingeniería*. 23(1): 107-119. 2013.
24. **Freitag, C. y Morrell, J.J.** *Development of threshold values for boron and fluoride in non-soil contact applications.* Forest Products Journal. 55(4): 97-101. 2005.

25. **Kartal, S.N.** *Combined effect of boron compounds and heat treatments on wood properties: boron release and decay and termite resistance*. Holzforschung. 60(4): 455-458. 2006.
26. **AWPS P5-07**. *Standard for Waterborne Preservatives*. American Wood-Preservers' Association. 2014.

Recibido: 10/11/15.
Aprobado: 26/07/16.