

## Retención y absorción de solución de sales de boro de diez maderas mexicanas

Retention and absorption of boron salts solution of ten mexican woods

Javier Ramón Sotomayor-Castellanos\*, José María Villaseñor Aguilar\*

### RESUMEN

Las sales de boro son un agente protector para la madera con un amplio espectro en su acción fungicida e insecticida, de poca toxicidad, inodoras, incoloras e incombustibles, y su aplicación es una de las estrategias más efectivas de preservación. La presente investigación tuvo por objetivo determinar la densidad de la madera, la absorción y la retención de sales de boro de diez maderas mexicanas. Se propuso como hipótesis de trabajo que la capacidad de retención de sales de boro de la madera depende, principalmente, de la especie, y es independiente de la densidad y de la porosidad. Se prepararon 30 litros de solución de sales de boro con una concentración al 3%. Las probetas se impregnaron con el método baño caliente-frío. Se diseñó un experimento de análisis de varianza para comparar los valores medios de la densidad de la madera, de la absorción y de la retención, como las variables de respuesta, evaluadas para cada una de las diez especies de madera. La especie de madera fue considerada el factor de variación. La absorción de sales de boro varió entre 136 kg/m<sup>3</sup> y 476 kg/m<sup>3</sup>. Los valores promedio de retención de sales de boro para todas las especies fueron mayores que el límite inferior tóxico de retención comprendido en el intervalo de retención que va de 0.2 kg/m<sup>3</sup> a 4.7 kg/m<sup>3</sup>, reportado en trabajos anteriores. Se concluye que cada especie tiene una retención de sales de boro diferente, y la capacidad de absorción es particular a cada una de ellas y no está relacionada con su densidad.

### ABSTRACT

Boron salts are a wood protector agent with a wide spectrum in their fungicidal and insecticide action and of low toxicity, odorless, colorless and nonflammable, and their application is one of the most effective preservation strategies. This research aims to determine the density of wood, absorption and retention of the boron salts of ten Mexican woods. The working hypothesis proposed in this investigation is that wood retention capacity of boron salts depends mainly on the species and is independent of its density and porosity. Thirty liters of boron salts solution with a concentration of 3 % were prepared, the wood specimens were impregnated by following the "hot-cold bath" method. It was designed an experiment that compared means of the density of wood, the absorption and the retention, as the response variables, assessed for each one of the ten wood species. Wood species was considered as the variation factor. Absorption of Boron salts varied between 136 kg/m<sup>3</sup> and 476 kg/m<sup>3</sup>. Average values of the boron salts retention for all species were higher than lower retention toxicity limit reported in previous researches (0.2 kg/m<sup>3</sup> to 4.7 kg/m<sup>3</sup>). It was concluded that each species has different boron salts retention. Absorption capacity is specific to each species and it is not related to the wood density.

Recibido: 22 de junio de 2015  
Aceptado: 29 de febrero de 2016

#### Palabras clave:

Densidad; preservación de la madera; baño caliente-frío; porosidad.

#### Keywords:

Density; wood preservation; hot-cold bath; porosity.

#### Cómo citar:

Sotomayor-Castellanos, J. R., & Villaseñor Aguilar, J. M. (2016). Retención y absorción de solución de sales de boro de diez maderas mexicanas. *Acta Universitaria*, 26(2), 12-19. doi: 10.15174/au.2016.835

### INTRODUCCIÓN

La combinación de las sales de boro, trihidróxido de boro (ácido bórico) y tetraborato de sodio (borato de sodio), es un agente protector para la madera con un amplio espectro en su acción fungicida e insecticida y de poca toxicidad para los mamíferos (Lloyd, Fogel & Vizel, 2001). Su aplicación es óptima en elementos de madera sin contacto con el suelo (Grace, Byrne, Morris & Tsunoda, 2006; Tsunoda, Byrne, Morris & Grace, 2006), y la solubilidad de los compuestos de boro le permite preservar especies de madera que son difíciles de tratar con preservantes a base de cobre y zinc (Obanda, Shupe & Barnes, 2008). Además, sus propiedades de difusión al interior del plano

\* Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Avenida Francisco J. Múgica s/n, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México, C.P. 58030. Correos electrónicos: madera999@yahoo.com; osmavia@yahoo.com.mx

leñoso le facilitan su distribución uniforme cuando la madera contiene un alto contenido de humedad. De tal forma que por ser también inodoras, incoloras e incombustibles, la aplicación de boro en la madera es, actualmente, una de las estrategias más efectivas de preservación (Tondi *et al.*, 2012).

Al interior de la madera, la presencia de agua es el principal factor responsable de la migración del boro. Así, una vez en servicio, las sales de boro se disuelven en contacto con el agua, proceso llamado *lixiviado*. Con el objeto de impedir la movilidad del preservante por el efecto del lixiviado, se han propuesto tratamientos térmicos para reducir su higroscopicidad, procesos de densificación de la madera para reducir los espacios vacíos en el tejido leñoso, así como técnicas de impregnación con vapor (Baysal & Yalinkilic, 2005; Caldeira, 2010). Por su parte, Obanda *et al.* (2008) recopilan estrategias propuestas recientemente para reducir la solubilidad de las sales de boro cuando son empleadas como preservadores en productos de madera. Otras estrategias para mejorar el proceso de preservación en la madera con sales de boro pueden ser consultadas en Salman *et al.* (2014) y Obounou-Akong, Gérardin, Thévenon & Gérardin-Charbonnier (2015).

Respecto a la aplicación de sales de boro como protector de la madera, Berrocal, Muñoz & González (2004) consiguen en probetas de *Gmelina arborea*, con dimensiones de 0.05 m × 0.025 m × 0.5 m, retenciones de 0.32 kg/m<sup>3</sup> a 1.28 kg/m<sup>3</sup>, con un método de inmersión-difusión y una concentración de sales de boro de 12%. Dhamodaran & Gnanaharan (2007), aplicando sales de boro y empleando un método de presión con una concentración de 6% en piezas de madera de *Eucalyptus grandis*, obtienen una retención de 3.70 kg/m<sup>3</sup> a 11.60 kg/m<sup>3</sup>. Simsek, Baysal & Peker (2010), empleando probetas de 0.02 m × 0.02 m × 0.36 m, con un proceso al vacío y siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM D 1413-76, con concentraciones de sales de boro de 0.25% a 3%, reportan retenciones de 17.42 kg/m<sup>3</sup> para madera de *Fagus orientalis* y de 15.98 kg/m<sup>3</sup> para la de *Pinus sylvestris*. Tondi *et al.* (2012), impregnando probetas de 0.025 m × 0.015 m × 0.05 m, utilizando un proceso de preservación específicamente diseñado y una concentración de sales de boro de 6%, encuentran retenciones de 2.88 kg/m<sup>3</sup> a 9.16 kg/m<sup>3</sup> para madera de *Fagus sylvatica* y de 3.25 kg/m<sup>3</sup> a 9.57 kg/m<sup>3</sup> para la de *Pinus sylvestris*. Salman *et al.* (2014), usando probetas de 0.015 m × 0.005 m × 0.050 m, aplicando un proceso de preservación con temperatura de 103 °C, durante 48 h, con un tiempo de inmersión de 30 min y una concentración de sales de boro de 4%, logran una retención de 4.2 kg/m<sup>3</sup> para madera de *Pinus sylvestris* y de 5.7 kg/m<sup>3</sup> para la de *Fagus sylvatica*.

Cada investigación referida emplea especies de madera, concentraciones de sales de boro y métodos de aplicación diferentes, de tal forma que los resultados son difíciles de comparar. Estos autores han verificado la capacidad de retención de sales de boro en maderas con muy distintas estructuras anatómicas y con condiciones diversas de tiempo, presión y temperatura.

Trabajos sobre la aptitud para la preservación de maderas mexicanas (Ávila-Calderón, Herrera-Ferreira & Raya-González, 2012; Cruz-De León, 2010) recomiendan clasificaciones de acuerdo con la facilidad o la dificultad de la madera para su preservado, algunas de ellas basadas en trabajos relevantes en su momento (Echenique-Manrique, 1970; Echenique-Manrique & Plumtre, 1994; Erdoiza-Sordo & Echenique-Manrique, 1980), pero que, dado el desarrollo actual de productos para la protección de la madera, se pueden considerar desactualizados.

Existe un importante potencial de especies mexicanas maderables y una demanda de productos de madera preservada que se puede emplear como material de ingeniería (Ávila-Calderón *et al.*, 2012). No obstante, en la bibliografía mexicana es difícil encontrar parámetros derivados de investigación que orienten a la industria de la factibilidad de una especie en particular para ser protegida con algún agente preservante y, en especial, con sales de boro.

La porosidad de la madera es un indicador de los espacios vacíos intercelulares, donde pueden alojarse sustancias preservantes como las sales de boro (Fuentes-Salinas, 2000). Respecto a la porosidad de maderas mexicanas, Sotomayor-Castellanos & Ramírez-Pérez (2013) relacionan y clasifican valores del parámetro de porcentaje de espacios vacíos para 134 especies nacionales. El porcentaje de espacios vacíos representa la magnitud de la porosidad de la madera de acuerdo con los trabajos de Plötze & Niemz (2011), Tondi *et al.* (2012), Zauer, Pfriem & Wagenführ (2013) y Zauer, Hempel, Pfriem, Mechtcherine & Wagenführ (2014).

La presente investigación tuvo por objetivo determinar la absorción y la retención de sales de boro y buscar una relación con la densidad de las maderas mexicanas *Tilia mexicana* Schltld., *Cupressus lindley* Klotzsch ex Endl., *Alnus acuminata* Kunth., *Cedrela odorata* L., *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh., *Lysiloma bahamensis* Benth., *Fagus mexicana* Martínez., *Caesalpinia grana-dillo* Pittier., *Platymiscium dimorphandrum* (J.D.Smith) Donn. Sm. y *Quercus* spp.

Por ello, se propone como hipótesis de trabajo que la capacidad de retención de sales de boro de la madera depende, principalmente, de la especie, y es independiente de su densidad y de su porosidad.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se recolectó madera aserrada, en condición verde, de diez especies nativas de México (tabla 1). La madera se almacenó durante 24 meses en una cámara de acondicionamiento con una temperatura de 20 °C (± 1 °C) y una humedad relativa del aire de 65% (± 2%), hasta que la madera presentó un peso constante. Para cada una de las especies se prepararon lotes de 35 probetas con dimensiones de 0.02 m × 0.02 m × 0.06 m, respectivamente, en las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso (figura 1). La madera estuvo libre de anomalías estructurales y defectos de crecimiento.

Se prepararon 30 l 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 (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE], 1999).

Las probetas se impregnaron con el método baño caliente-frío (Ávila-Calderón *et al.* 2012). La madera se sumergió durante 8 h en un baño de agua con temperatura de 60 °C y presión atmosférica. Posteriormente, las probetas se sumergieron durante 16 h 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, antes y después del tratamiento, fueron medidos. Posteriormente, se determinaron la absorción y la retención de las sales en cada probeta.

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

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

Donde:

A = Absorción (kg/m<sup>3</sup>)

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

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

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

**Tabla 1.** Contenido de humedad, densidad, absorción y retención de sales de boro de diez maderas tropicales.

Especie		CH (%)	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	A (kg/m <sup>3</sup> )	R (kg/m <sup>3</sup> )
<i>Tilia mexicana</i> Schltl.	x	10.49	442	473	14.18
	σ	0.18	35.70	23.13	0.69
	CV	1.72	8.08	4.89	4.89
<i>Cupressus lindleyi</i> Klotzsch ex Endl.	x	10.95	475	314	9.42
	σ	0.38	32.71	52.28	1.57
	CV	3.51	6.89	16.65	16.65
<i>Alnus acuminata</i> Kunth.	x	10.99	562	397	11.92
	σ	0.46	32.83	28.13	0.84
	CV	4.17	5.84	7.08	7.08
<i>Cedrela odorata</i> L.	x	12.68	591	177	5.30
	σ	0.73	66.59	61.25	1.84
	CV	5.75	11.26	34.68	34.68
<i>Fraxinus uhdei</i> (Wenz.) Lingelsh.	x	10.93	661	366	10.98
	σ	0.30	32.82	14.40	0.43
	CV	2.71	4.96	3.93	3.93
<i>Lysiloma bahamensis</i> Benth.	x	10.59	670	164	4.93
	σ	0.28	127.31	14.72	0.44
	CV	2.66	19.00	8.96	8.96
<i>Fagus mexicana</i> Martínez.	x	12.63	694	376	11.28
	σ	0.54	28.69	15.34	0.46
	CV	4.30	4.14	4.08	4.08
<i>Caesalpinia granadillo</i> Pittier.	x	10.75	882	305	9.14
	σ	0.06	24.34	10.71	0.32
	CV	0.52	2.76	3.51	3.51
<i>Platymiscium dimorphandrum</i> (J. D. Smith) Donn. Sm.	x	9.48	937	136	4.07
	σ	0.35	40.13	12.67	0.38
	CV	4.12	4.28	9.34	9.34
<i>Quercus</i> spp.	x	10.04	957	347	10.40
	σ	0.57	60.74	67.41	2.02
	CV	6.02	6.35	19.44	19.44

CH = Contenido de humedad; ρ = Densidad; A = Absorción; R = Retención; x = Media aritmética; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en por ciento. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 1.** Probetas de madera. Fuente: Elaboración propia.

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

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

Donde:

R = Retención (kg/m<sup>3</sup>)

A = Absorción neta (kg/m<sup>3</sup>)

C = Concentración de la sustancia preservante (%)

La densidad y el contenido de humedad de la madera fueron determinados con grupos de cinco probetas complementarias de cada especie con características similares y provenientes del mismo lote de probetas que se impregnaron.

La densidad de la madera fue calculada con la fórmula (Bodig & Jayne, 1982):

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

Donde:

$\rho$  = Densidad (kg/m<sup>3</sup>)

P = Peso de la probeta en estado seco (kg)

V = Volumen de la probeta en estado saturado (m<sup>3</sup>)

El contenido de humedad de la madera fue determinado con la fórmula (Bodig & Jayne, 1982):

$$CH = \frac{P_3 - P_4}{P_4} \quad (4)$$

Donde:

CH = Contenido de humedad (%)

P<sub>3</sub> = Peso de la probeta sin tratamiento (kg)

P<sub>4</sub> = Peso de la probeta en estado seco (kg)

Posteriormente, se estimó la porosidad de la madera, empleando la fórmula (Tondi *et al.* 2012):

$$\varphi = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_m}\right) \times 100 \quad (5)$$

Donde:

$\varphi$  = Porosidad de la madera (%)

$\rho$  = Densidad (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_m$  = Densidad de la pared celular de la madera (kg/m<sup>3</sup>)

El valor de la densidad de la pared celular de la madera fue de 1540 kg/m<sup>3</sup>, de acuerdo con Fengel & Wegener (1984).

## Diseño experimental

Se realizaron análisis de varianza para comparar las medias de la densidad, la absorción y la retención de las diez especies de madera estudiadas. El contenido de humedad de la madera, la concentración de la solución de sales de boro y los tiempos de inmersión fueron parámetros constantes. Se aceptó que los valores de densidad, de absorción y de retención de las diez especies de madera estuvieran distribuidas normalmente con la misma varianza  $\sigma^2$ . La hipótesis de investigación fue que las diez medias de la densidad, la absorción y la retención son iguales. El nivel de significancia  $\alpha$  escogido para los análisis de varianza fue de 5%.

Suponiendo una distribución normal con media cero ( $\bar{x} = 0$ ) y varianza constante ( $\sigma^2$ ) e independientes entre sí, para cada prueba de diferencia de medias se verificó la hipótesis nula  $H_0: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 = 0$ , y se contrastó con la hipótesis alterna  $H_A: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 \neq 0$ . Los subíndices 1 y 2 representan cada especie. El método empleado para discriminar entre las medias fue una prueba de Fisher con una diferencia mínima significativa de 95%.

## RESULTADOS

Los resultados se muestran en la tabla 1. Las especies están tabuladas de acuerdo con el valor ascendente de su densidad. El contenido de humedad de las probetas es el calculado antes del tratamiento.

## DISCUSIÓN

Los valores promedio de retención de sales de boro para todas las especies, presentados en la tabla 1, fueron mayores que el límite inferior tóxico de retención reportado en trabajos anteriores. De acuerdo con Freitag & Morrell (2005), el umbral mínimo de retención de sales de boro, necesario para proteger a la madera de las pudriciones ocasionadas por hongos o moho, está comprendido en el intervalo de retención que va de 0.2 kg/m<sup>3</sup> a 4.7 kg/m<sup>3</sup>. Por su parte, Kartal (2006) propone una retención mínima de 1 kg/m<sup>3</sup> para protección de la madera en condiciones de servicio al exterior. La *American Wood-Preservers' Association* (AWPA, 2014) recomienda una retención mínima de sales de boro de 2.72 kg/m<sup>3</sup> en la madera para elementos estructurales empleados en interiores.



Cuantitativamente, los resultados de retención son comparables con los reportados por Alfaro-Pérez (2013). Aplicando un proceso de preservado por inmersión, el autor presenta valores de retención de sales de boro para nueve especies de madera tropicales: *Hymenaea courbaril* 23.2 kg/m<sup>3</sup>, *Terminalia amazonia* 12.9 kg/m<sup>3</sup>, *Hieronyma alchorneoides* 8.1 kg/m<sup>3</sup>, *Cedrela odorata* 5.7 kg/m<sup>3</sup>, *Tectona grandis* 9.1 kg/m<sup>3</sup>, *Cupressus lusitanica* 14.9 kg/m<sup>3</sup>, *Enterolobium cyclocarpum* 7.0 kg/m<sup>3</sup>, *Calophyllum brasiliense* 15.0 kg/m<sup>3</sup> y *Gmelina arborea* 8.7 kg/m<sup>3</sup>. A manera de comparación, los valores para *C. odorata* presentados por Alfaro-Pérez (2013) pueden considerarse iguales a los resultados de esta investigación.

La madera tuvo un contenido de humedad inicial promedio de 11%, en un intervalo que va desde 9.5% hasta 12.7%, y con un coeficiente de variación de 3.5%. La madera se acondicionó a un estado de humedad seco y homogéneo entre especies, de tal forma que la variación en el contenido de humedad inicial de la madera no intervino de manera significativa en los resultados.

La densidad de las especies resultó con un intervalo que va desde 442 kg/m<sup>3</sup> hasta 957 kg/m<sup>3</sup>, lo que permitió observar un amplio rango de esta variable. Una prueba de diferencia mínima significativa de Fisher, posterior al análisis de varianza, demostró que, con excepción de los pares de especies *F. uhdei* - *L. bahamensis* y *P. dimorphandrum* - *Quercus* spp., todas las demás especies muestran diferencias estadísticamente significativas entre sí, con un nivel del 95% de confianza.

Sotomayor-Castellanos & Ramírez-Pérez (2013) reportan que los porcentajes de pared celular y de espacios vacíos se relacionan proporcionalmente con la densidad de la madera. Así, a mayor densidad, mayor porcentaje de pared celular y menor porcentaje de espacios vacíos; es decir, la higroscopicidad de la madera es inversamente proporcional a su densidad. Sin embargo, en este estudio no se observó una relación entre la densidad y la absorción de sales de boro (figura 2).

En el mismo contexto, la densidad se relaciona estructuralmente con la porosidad de la madera (Plötze & Niemz, 2011), de tal forma que la absorción de sales de boro correspondería estadísticamente con su porosidad. Una estimación de la porosidad de las maderas estudiadas, empleando la ecuación (5), da como resultado una amplia dispersión de la absorción de sales de boro (A) en función de la porosidad ( $\phi$ ) de la madera (figura 3). El cálculo de su correlación:  $A = 3.65 \phi + 103$ , con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.15,

sugiere que no existe una relación entre la porosidad de la madera y la absorción de sales de boro. La magnitud de las porosidades estimadas son similares a las propuestas por Zauer *et al.* (2013) para madera de *Picea abies* (L.) Karst. entre 67.3% y 71.4%, de *Acer pseudoplatanus* L. entre 63.1% y 65.8% y para *Fraxinus excelsior* L. entre 50.4% y 52.2%. De aquí se puede deducir que la capacidad de absorción de las maderas estudiadas depende más de la especie que de su densidad o de su porosidad; y de acuerdo con Zauer *et al.* (2013 y 2014), la determinación de la absorción de una madera depende igualmente del método de medición y del estado tecnológico de la muestra estudiada.

La figura 4 presenta la porosidad ( $\phi$ ) en función de la densidad ( $\rho$ ) y sus correlaciones para datos de Plötze & Niemz (2011) y de esta investigación. En los dos casos, la porosidad disminuye proporcionalmente cuando la densidad de la madera aumenta. En el caso de los datos de Plötze & Niemz (2011), el coeficiente de determinación es muy alto. Sin embargo, para los datos de esta investigación, el coeficiente  $R^2$  es igual a la unidad, puesto que los datos son derivados con la ecuación (5), en la cual la densidad está implícita en ella y la densidad de la pared celular se mantiene constante. Sin embargo, de la lectura de las figuras 3 y 4 se deduce que la porosidad no tiene relación con la absorción.

Efectivamente, de acuerdo con Plötze & Niemz (2011) y Zauer *et al.* (2013 y 2014), la retención de una madera depende, en gran medida, de su estructura anatómica. El tipo de porosidad y la proporción de tejidos que conforman una capa de crecimiento son factores propios del plano leñoso particular a cada madera, los cuales determinan su capacidad para absorber sales de boro y, en consecuencia, su retención.

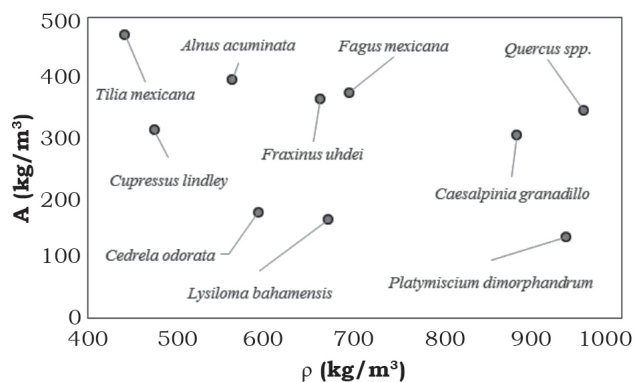
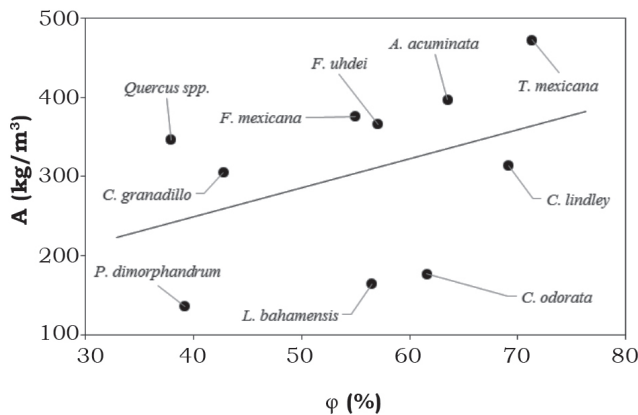
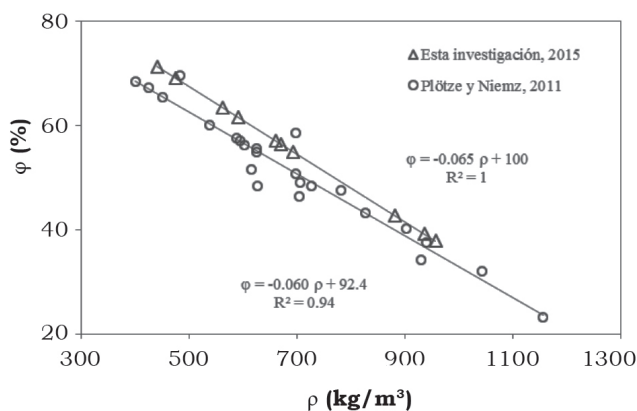


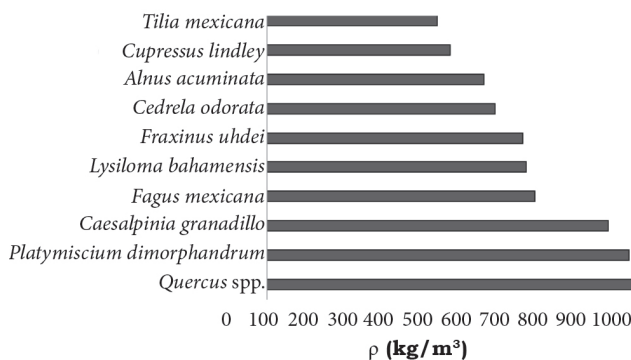
Figura 2. Distribución de la absorción (A) en función de la densidad ( $\rho$ ). Fuente: Elaboración propia.



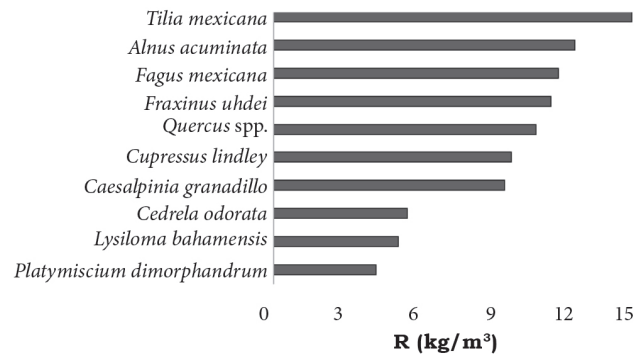
**Figura 3.** Dispersión de la absorción de sales de boro (A) en función de la porosidad ( $\phi$ ) de la madera y su línea de correlación:  $A = 3.65 \phi + 103$ , con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.15.  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 4.** Porosidad ( $\phi$ ) en función de la densidad ( $\rho$ ) y sus correlaciones para datos de Plötze & Niemz (2011) y de esta investigación.  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5.** Ordenamiento de la especie respecto a la densidad ( $\rho$ ).  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 6.** Ordenamiento de la especie respecto a la retención (R).  
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la tabla 1, mostrados explícitamente en la figura 5, muestran que el ordenamiento de los valores y la retención de cada especie no coinciden con el de la densidad de la madera. Para fines de comparación, los valores de cada especie se presentan ordenados de acuerdo con su densidad (figura 5) y a su retención (figura 6). La contrastación de las ordenaciones permite comparar las especies en relación con su densidad y su retención.

Respecto a la variación de la retención de sales de boro entre las diferentes especies estudiadas, el análisis de varianza (tabla 2) aportó un valor P menor que 0.05. En consecuencia, se encontró que existe una diferencia significativa entre algunas medias de las diez variables; en este caso, la retención de sales de boro en cada especie. La cantidad de solución preservante que absorbió la madera fue diferente para cada especie.

La tabla 2 presenta igualmente los resultados de la prueba de comparación de rangos múltiple, realizada posteriormente al análisis de varianza, y empleada para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. En la tabla 2 se identificaron siete grupos homogéneos según la alineación de las X's en las columnas. Este arreglo significa que no existen diferencias significativas entre aquellas especies que comparten una misma columna de X's. En este caso, para los pares: *L. bahamensis*-*C. odorata*, *C. granadillo*-*C. lindley* y *F. uhdei*-*F. mexicana*. Este resultado de apareamiento de especies respecto a su capacidad de retención no coincide con el de la densidad.

## CONCLUSIONES

La investigación determinó la densidad, la absorción y la retención de sales de boro de diez especies de

maderas mexicanas. La especie se consideró el factor de variabilidad, y así se pudieron comparar los resultados entre los datos derivados de cada una de ellas.

Los resultados sugieren que la capacidad de retención de sales de boro de la madera depende, principalmente, de la especie, y no está relacionada con su densidad. Probablemente, el acomodo y constitución de los elementos anatómicos de la madera, por ejemplo el espesor de la pared celular y la proporción de tejidos que conforman una capa de crecimiento, influyen en la facilidad para el preservado.

Los valores promedio de retención de sales de boro para todas las especies fueron mayores que el límite inferior tóxico de retención, reportados en trabajos anteriores. Cuantitativamente, los resultados son comparables con los reportados en la bibliografía.

**Tabla 2.** Resultados del análisis de varianza y de comparación de rangos múltiple de la retención.

Análisis de varianza				
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Razón F
Entre grupos	3 506.51	9	389.61	325.02
Intra grupos	406.37	339	1.199	
Total	3 912.89	348		
Comparación múltiple				
Especie	R (kg/m <sup>3</sup> )	Grupos homogéneos*		
<i>P. dimorphandrum</i>	4.07	X		
<i>L. bahamensis</i>	4.93		X	
<i>C. odorata</i>	5.30		X	
<i>C. granadillo</i>	9.14			X
<i>C. lindley</i>	9.42		X	
<i>Quercus</i> spp.	10.40			X
<i>F. uhdei</i>	10.98			X
<i>F. mexicana</i>	11.28			X
<i>A. acuminata</i>	11.92			X
<i>T. mexicana</i>	14.18			X

GL = Grados de libertad; R = Retención; \* No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellas especies que compartan una misma columna de X's. Fuente: Elaboración propia.

## REFERENCIAS

- 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
- American Wood-Preservers' Association (AWPA). (2014). *P5-07 Standard for Waterborne Preservatives*. Chicago, USA: American Wood-Preservers' Association.
- Ávila-Calderón, L. E. A., Herrera-Ferreira, M. A., & Raya-González, D. (2012). *Preservación de la madera en México*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Baysal, E., & Yalinkiic, M. K. (2005). A new boron impregnation technique of wood by vapor boron of boric acid to reduce leaching boron from wood. *Wood Science and Technology*, 39(3), 187-198. doi: 10.1007/s00226-005-0289-1
- Berrocal, A., Muñoz, F., & 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.
- Bodig, J., & Jayne, B. A. (1982). *Mechanics of wood and wood composites*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Caldeira, F. (2010). Boron in Wood Preservation. A Review in its Physico-Chemical Aspects. *Silva Lusitana*, 18(2), 179-196.
- Cruz-De León, J. (2010). *Manual para la protección contra el deterioro de la madera*. México: Comisión Nacional Forestal.
- Dhamodaran, T. K., & Gnanaharan, R. (2007). Boron impregnation treatment of *Eucalyptus grandis* Wood. *Bioresource Technology*, 98(11), 2240-2242. doi: 10.1016/j.biortech.2006.08.012
- Echenique-Manrique, R. (1970). *Descripción, características y usos de 25 maderas tropicales mexicanas*. México: Cámara Nacional de la Industria de la Construcción (vol.1, Serie: Maderas de México).
- Echenique-Manrique, R., & Plumtre, R. A. (1994). *Guía para el uso de maderas de Belice y México*. Guadalajara: Consejo Británico.
- Erdoiza-Sordo, J. J., & Echenique-Manrique, R. (1980). *Preservación de madera de pino con sales de boro*. México: Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos, Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos (Serie: La madera y su uso en la construcción).
- Fengel, D., & Wegener, G. (1984). *Wood-chemistry, ultrastructure, reactions*. New York: Walter de Gruyter. doi: 10.1002/pol.1985.130231112
- Freitag, C., & Morrell, J. J. (2005). Development of threshold values for boron and fluoride in non-soil contact applications. *Forest Products Journal*, 55(4), 97-101.
- Fuentes-Salinas, M. (2000). Estimación del Punto de Saturación de la Fibra (PSF) de las maderas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 6(1), 79-81.
- Grace, J. K., Byrne, A., Morris, P. I., & Tsunoda, K. (2006). *Performance of borate-treated lumber after 8 years in an above-ground termite field test in Hawaii*. Stockholm, Sweden: International Research Group on Wood Protection, IRG/WP 06-30390, IRG Secretariat.

- Kartal, S. N. (2006). Combined effect of boron compounds and heat treatments on wood properties: boron release and decay and termite resistance. *Holzforchung*, 60(4), 455-458. doi: 10.1515/HF.2006.072
- Lloyd, J. D., Fogel, J. L., & Vizel, A. (2001). *The use of Zirconium as an inert fixative for borates in Preservation*. Stockholm, Sweden: International Research Group on Wood Preservation, IRG/WP 01-30256, IRG Secretariat.
- Obanda, D. D., Shupe, T. F., & Barnes, H. M. (2008). Reducing leaching of boron-based wood preservatives. A review of research. *Bioresource Technology*, 99(15), 7312-7322. doi: 10.1016/j.biortech.2007.12.077
- Obounou-Akong, F., Gérardin, P., Thévenon, M. F., & Gérardin-Charbonnier, C. (2015). Hydrogel-based boron salt formulations for wood preservation. *Wood Science and Technology*, 49(3), 443-456. doi: 10.1007/s00226-015-0701-4
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE) (1999). *Norma Mexicana NMX-C-410-ONNCCE-1999. Industria de la Construcción-Vivienda de Madera-Retención y Penetración de Sustancias Preservadoras en Madera-Métodos de Prueba*. México: ONNCCE.
- Plötze, M., & Niemz, P. (2011). Porosity and pore size distribution of different wood types as determined by mercury intrusion porosimetry. *European Journal of Wood Products*, 69(4), 649-657. doi: 10.1007/s00107-010-0504-0
- Salman, S., Pétrissans, A., Thévenon, M. F., Dumarcay, S., Perrin, D., Pollier, B., & Gérardin, P. (2014). Development of new wood treatments combining boron impregnation and thermo modification: effect of additives on boron leachability. *European Journal of Wood Products*, 72(3), 355-365. doi: 10.1007/s00107-014-0787-7
- Simsek, H., Baysal, E., & Peker, H. (2010). Some mechanical properties and decay resistance of wood impregnated with environmentally-friendly borates. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2279-2284. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.028
- Sotomayor-Castellanos, J. R., & Ramírez-Pérez, M. (2013). Densidad y características higroscópicas de maderas mexicanas. Base de datos y criterios de clasificación. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 9(3), 3-29.
- Tondi, G., Wieland, S., Lemenager, N., Petutschnigg, A., Pizzi, A., & Thevenon, M. F. (2012). Efficacy of tannin in fixing boron in wood: fungal and termite resistance. *BioResources*, 7(1), 1238-1252.
- Tsunoda, K., Byrne, A., Morris, P. I., & Grace, J. K. (2006). Performance of borate-treated lumber after 10 years in a protected, above-ground field test in Japan (Final report). Stockholm, Sweden: International Research Group on Wood Protection, IRG/WP 06-30395, IRG Secretariat.
- Zauer, M., Pfriem, A., & Wagenführ, A. (2013). Toward improved understanding of the cell-wall density and porosity of wood determined by gas pycnometry. *Wood Science and Technology*, 47(6), 1197-1211. doi: 10.1007/s00226-013-0568-1
- Zauer, M., Hempel, S., Pfriem, A., Mechtcherine, V., & Wagenführ, A. (2014). Investigations of the pore-size distribution of wood in the dry and wet state by means of mercury intrusion porosimetry. *Wood Science and Technology*, 48(6), 1229-1240. doi: 10.1007/s00226-014-0671-y