

1 Protección de maderas tropicales mexicanas. Retención de sales de Boro.

2 Protection of Mexican Tropical Woods. Retention of Boron Salts.

3

4 *Javier-Ramón Sotomayor-Castellanos y José María Villaseñor Aguilar

5

6 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Avenida Francisco J. Múgica S/N. Ciudad

7 Universitaria. C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México.

8

9 Correos electrónicos: *madera999@yahoo.com, osmavia@yahoo.com.mx.

10 * Autor para correspondencia.

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25 Protección de maderas tropicales mexicanas. Retención de sales de Boro.

26 Protection of Mexican Tropical Woods. Retention of Boron Salts.

27

28 Resumen

29

30 Las sales de Boro son un agente protector para la madera con un amplio espectro en su acción
31 fungicida e insecticida y de poca toxicidad y por ser también inodoras, incoloras e inflamables, su
32 aplicación es una de las estrategias más efectivas de preservación. La investigación tuvo por
33 objetivo determinar la densidad, la absorción y la retención de sales de Boro de diez maderas
34 mexicanas. La investigación propuso como hipótesis de trabajo, que la capacidad de retención de
35 sales de Boro de la madera, depende principalmente de la especie y es independiente de su
36 densidad y de su porosidad. Se prepararon 30 litros de solución de sales de Boro con una
37 concentración al 3% y las probetas se impregnaron con el método “Baño caliente-frío”. Se diseñó
38 un experimento que comparó las medias de la densidad, la absorción y la retención, como las
39 variables de respuesta, evaluadas para cada una de las 10 especies de madera. La especie de
40 madera fue considerada el factor de variación. Los valores promedio de retención de sales de
41 Boro para todas las especies, fueron mayores que el límite inferior tóxico de retención reportado
42 en trabajos anteriores. Y se concluyó que cada especie tiene una retención de sales de Boro
43 diferente. Esta capacidad de absorción es particular a cada una de ellas y no está relacionada con
44 su densidad.

45

46 Palabras clave: densidad, absorción, protección de la madera, baño caliente-frío

47

48 Abstract

49
50 Boron salts are a wood protector agent with a wide spectrum in their fungicidal and insecticide
51 action and of low toxicity. These salts are odorless, colorless and flammable, their application is
52 one of the most effective preservation strategies. The goal of the research was to determine the
53 density, absorption and retention of the boron salts of ten Mexican woods. The research proposed
54 the following working hypothesis “the wood capacity of boron salts retention depends mainly on
55 the species and is independent of its density and porosity.” Thirty liters of boron salts solution
56 with a concentration of 3 % were prepared, the wood specimens were impregnated by following
57 the “hot-cold bath” method. It was designed an experiment that compared the density, absorption
58 and retention means as the response variables, assessed for each one of the ten wood species. The
59 wood species was considered as the variation factor. The average values of the boron salts
60 retention for all species were higher than the lower retention of toxicity limit reported in previous
61 research. It was concluded that each species has different boron salts retention. The absorption
62 capacity is specific to each species and it is not related to the wood density.

63

64 Key words: density, absorption, wood protection, hot-cold bath

65

66 Introducción

67

68 La combinación de las sales de Boro: Trihidróxido de boro (Ácido bórico) y Tetraborato de sodio
69 (Borato de Sodio), es un agente protector para la madera con un amplio espectro en su acción
70 fungicida e insecticida y de poca toxicidad para los mamíferos (Lloyd, Fogel y Vizel, 2001). Su
71 aplicación es óptima en elementos de madera sin contacto con el suelo, particularmente en
72 madera de uso estructural (Grace, Byrne, Morris y Tsunoda, 2006; Tsunoda, Byrne, Morris y

73 Grace, 2006) y la solubilidad de los compuestos de Boro le permite preservar especies de madera
74 que son difíciles de tratar con preservantes a base de cobre y zinc (Obanda, Shupe y Barnes,
75 2008). Además, sus propiedades de difusión al interior del plano leñoso le facilitan distribuirse de
76 manera uniforme, si la madera contiene un alto contenido de humedad. De tal forma, que por ser
77 también inodoras, incoloras e inflamables, la aplicación de Boro en la madera es, actualmente,
78 una de las estrategias más efectivas de preservación Tondi *et al.* (2012).

79
80 Una vez en servicio, las sales de Boro se disuelven en contacto con agua, proceso llamado
81 lixiviado. Obanda *et al.* (2008) recopilan estrategias propuestas recientemente para reducir la
82 solubilidad de las sales de Boro cuando son empleadas como preservadores en productos de
83 madera. Dado que el agua es el principal factor responsable de la migración del Boro al interior
84 de la madera, con el objeto de impedir la movilidad del preservante por el efecto del lixiviado, se
85 han propuesto tratamientos térmicos para reducir su higroscopicidad, procesos de densificando de
86 la madera para reducir los espacios vacíos en el tejido leñoso, así como técnicas de impregnación
87 con vapor (Baysal y Yalinkilic, 2005; Caldeira, 2010). Otras estrategias para mejorar el proceso
88 de preservación en la madera con sales de Boro pueden ser consultadas en Salman *et al.* (2014) y
89 Obounou-Akong, Gérardin, Thévenon y Gérardin-Charbonnier (2015).

90
91 Respecto a la aplicación de sales de Boro como protector de la madera, Berrocal, Muñoz y
92 González (2004) consiguen en probetas de *Gmelina arborea*, con dimensiones de 0.05 m x 0.025
93 m x 0.5 m, retenciones de 0.32 kg/m³ a 1.280 kg/m³, con un método de inmersión-difusión y una
94 concentración de sales de Boro de 12%. Dhamodaran y Gnanaharan (2007) aplicando sales de
95 Boro y empleando un método de presión con una concentración de 6% en piezas de madera de
96 *Eucalyptus grandis*, obtienen una retención de 3.7 kg/m³ a 11.6 kg/m³. Simsek, Baysal y Peker

97 (2010), empleando probetas de 0.02 m x 0.02 m x 0.36 m, con un proceso al vacío y siguiendo las
98 recomendaciones de la norma ASTM D 1413-76, con concentraciones de sales de Boro de 0.25%
99 a 3%, reportan retenciones de 17.42 kg/m³ para madera de *Fagus orientalis* y de 15.98 kg/m³
100 para la de *Pinus sylvestris*. Tondi *et al.* (2012), impregnando probetas de 0.025 m x 0.015 m x
101 0.05 m, empleando un proceso de preservación específicamente diseñado, y una concentración de
102 sales de Boro de 6%, encuentran retenciones de 2.88 kg/m³ a 9.16 kg/m³ para madera de *Fagus*
103 *sylvatica* y de 3.25 kg/m³ a 9.57 kg/m³ para la de *Pinus Sylvestris*. Salman *et al.* (2014),
104 empleando probetas de 0.015 m x 0.005 m x 0.050 m, aplicando un proceso de preservación con
105 temperatura de 103 °C, durante 48 h, con un tiempo de inmersión de 30 min y una concentración
106 de sales de Boro de 4%, logran una retención de 4.2 kg/m³ para madera de *Pinus sylvestris* y de
107 5.7 kg/m³ para la de *Fagus sylvatica*.

108

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

113

114 Trabajos sobre la aptitud para la preservación de maderas mexicanas (Cruz-De León, 2010;
115 Ávila-Calderón, Herrera-Ferreyra y Raya-González, 2012), recomiendan clasificaciones de
116 acuerdo a la facilidad y/o a la dificultad de la madera para su preservado, algunas de ellas basadas
117 en trabajos relevantes en su momento (Echenique-Manrique, 1970; Erdoiza-Sordo y Echenique-
118 Manrique, 1980; Echenique-Manrique y Plumptre, 1994), pero que, dado el desarrollo actual de
119 productos para la protección de la madera, se pueden clasificar como desactualizados.

120

121 Existe un importante potencial de especies mexicanas maderables y una demanda de
122 productos de madera preservada que se puede emplear como material de ingeniería. No obstante,
123 en la bibliografía mexicana, es difícil encontrar parámetros derivados de investigación, que
124 orienten a la industria acerca de la idoneidad de una especie en particular para protegerla con
125 sales de Boro.

126
127 La porosidad de la madera es un indicador de los espacios vacíos intercelulares, donde
128 pueden alojarse sustancias preservantes como las sales de Boro (Fuentes-Salinas, 2000).
129 Respecto a la porosidad de maderas mexicanas, Sotomayor-Castellanos y Ramírez-Pérez (2013),
130 relacionan el parámetro de porcentaje de espacios vacíos para 134 especies nacionales. Este
131 parámetro representa la porosidad de la madera de acuerdo con los trabajos de Plötze y Niemz
132 (2011), Tondi *et al.* (2012), Zauer, Pfriem y Wagenführ (2013) y Zauer, Hempel, Pfriem,
133 Mechtcherine y Wagenführ (2014).

134
135 La investigación tuvo por objetivo determinar la densidad, la absorción y la retención de
136 sales de Boro de las siguientes diez maderas mexicanas: *Tilia mexicana* Schltldl., *Cupressus*
137 *lindley* Klotzsch ex Endl., *Alnus acuminata* Kunth., *Cedrela odorata* L., *Fraxinus uhdei* (Wenz.)
138 Lingelsh., *Lysiloma bahamensis* Benth., *Fagus mexicana* Martínez., *Caesalpinia granadillo*
139 Pittier., *Platymiscium dimorphandrum* (J.D.Smith) Donn. Sm., y *Quercus* spp.

140
141 La investigación propone como hipótesis de trabajo, que la capacidad de retención de sales
142 de Boro de la madera, depende principalmente de la especie y es independiente de su densidad y
143 de su porosidad.

144

145 Materiales y métodos

146

147 Se recolectó madera aserrada de diez especies nativas de México (Tabla 1). La madera se
148 almacenó durante 24 meses en una cámara de acondicionamiento con una temperatura de 20 °C
149 (± 1 °C) y una humedad relativa del aire de 65 % (± 2 %), hasta que la madera presentó un peso
150 constante. Para cada una de las especies, se prepararon lotes de 35 probetas con dimensiones de
151 0,02 m x 0,02 m x 0,06 m, respectivamente en las direcciones radial, tangencial y longitudinal del
152 plano leñoso (Figura 1). La madera estuvo libre de anomalías estructurales y defectos de
153 crecimiento.

154

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

156

157 Se prepararon 30 litros de solución de sales de Boro con una concentración al 3%. La
158 solución consistió en Ácido bórico (39,4%) y Borato de sodio (60,6%) de acuerdo con la norma
159 NMX-C-410-ONNCCE-1999 (ONNCCE, 1999).

160

161 Las probetas se impregnaron con el método “Baño caliente-frío” (Ávila-Calderón *et al.*
162 2012). La madera se sumergió durante 8 horas en un baño de agua con temperatura de 60 °C y
163 presión atmosférica. Posteriormente, las probetas se sumergieron durante 16 horas en un baño
164 frío, con la solución de sales de Boro y temperatura de 23 °C y presión atmosférica.

165

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

168

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

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

170 Dónde:

171 A = Absorción (kg/m³)

172 P₁ = Peso inicial de la probeta antes del tratamiento (kg)

173 P₂ = Peso final de la probeta después del tratamiento (kg)

174 V = Volumen de la probeta después de tratamiento (m³)

175

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

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

177 Dónde:

178 R = Retención (kg/m³)

179 A = Absorción neta (kg/m³)

180 C = Concentración de la sustancia preservante (%)

181

182 La densidad y el contenido de humedad de la madera fueron determinados con un grupo

183 de probetas complementarias con características similares y provenientes del mismo lote de

184 probetas que se impregnaron.

185

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

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

187 Donde:

188 ρ = Densidad (kg/m^3)

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

190 V = Volumen de la probeta en estado saturado (m^3)

191

192 El contenido de humedad de la madera fue determinado con la fórmula (Bodig *et al.*

193 1982):

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

194 Donde:

195 CH = Contenido de humedad (%)

196 P_3 = Peso de la probeta sin tratamiento (kg)

197 P_4 = Peso de la probeta en estado seco (kg)

198

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

200 2012):

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

201

202 Donde:

203 φ = Porosidad de la madera (%)

204 ρ = Densidad (kg/m^3)

205 ρ_m = Densidad de la pared celular de la madera (kg/m^3)

206

207 El valor de la densidad de la pared celular de la madera fue de 1,540 kg/m³, de acuerdo
208 con Fengel & Wegener (1984).

209

210 Diseño experimental

211

212 Se realizaron análisis de varianza tipo arreglo experimental sencillo para comparar las medias de
213 la densidad, la absorción y la retención de las diez especies de madera estudiadas. El contenido
214 de humedad de la madera, la concentración de la solución de sales de Boro y los tiempos de
215 inmersión fueron parámetros constantes. Se aceptó que las diez muestras (especies) de madera
216 estuvieron distribuidas normalmente con la misma varianza σ^2 . Las hipótesis de investigación
217 fueron que las diez medias de la densidad, la absorción y la retención son iguales
218 respectivamente. Estas hipótesis implican que la especie de madera se comporta igual
219 independientemente de su densidad, absorción y retención. El nivel de significancia α escogido
220 para los análisis de varianza fue de 5 %.

221

222 Suponiendo una distribución normal con media cero ($\bar{x}=0$) y varianza constante (σ^2) e
223 independientes entre sí, para cada prueba de diferencia de medias se verificó la hipótesis nula
224 $H_0: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 = 0$, y se contrastó con la hipótesis alterna $H_A: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 \neq 0$. Los subíndices 1 y 2
225 representan el valor de las variables de respuesta para diferentes especies. El método empleado
226 para discriminar entre las medias fue una prueba de *Fisher* con una diferencia mínima
227 significativa de 95%.

228

229 Resultados

230 Los resultados se muestran en la Tabla 1. Las especies están tabuladas de acuerdo al valor
231 ascendente de su densidad. El contenido de humedad se refiere al de las probetas antes del
232 tratamiento.

233

234 Tabla 1. Contenido de humedad, densidad, absorción y retención de sales de Boro de diez
235 maderas tropicales. Fuente: Elaboración propia.

236

237 Discusión

238

239 Los valores promedio de retención de sales de Boro para todas las especies, presentados en la
240 Tabla 1, fueron mayores que el límite inferior tóxico de retención reportado en trabajos
241 anteriores. De acuerdo con Freitag & Morell (2005), el umbral mínimo de retención de sales de
242 Boro, necesario para proteger a la madera de las pudriciones ocasionadas por hongos y/o moho,
243 está comprendido en el intervalo de retención que va de 0.2 kg/m³ a 4.7 kg/m³. Por su parte,
244 Kartal (2006) propone una retención mínima de 1 kg/m³ para protección de la madera en
245 condiciones de servicio al exterior. La Asociación Americana de Preservadores de madera
246 (AWPS, 2014) recomienda una retención mínima de sales de Boro de 2.72 kg/m³, en la madera
247 para elementos estructurales empleados en interiores.

248

249 Cuantitativamente, los resultados de retención son comparable con los de Alfaro-Pérez
250 (2013). Aplicando un proceso de preservado por inmersión, el autor presenta valores de retención
251 de sales de Boro para nueve especies de madera tropicales: *Hymenaea courbaril* 23,2 kg/m³,
252 *Terminalia amazonia* 12,9 kg/m³, *Hieronyma alchorneoides* 8,1 kg/m³, *Cedrela odorata* 5,7
253 kg/m³, *Tectona grandis* 9,1 kg/m³, *Cupressus lusitanica* 14,9 kg/m³, *Enterolobium cyclocarpum*

254 7,0 kg/m³, *Calophyllum brasiliense* 15,0 kg/m³ y *Gmelina arborea* 8,7 kg/m³. A manera de
255 comparación, los valores para *C. odorata*, presentados por Alfaro-Pérez pueden considerarse
256 iguales a los resultados de esta investigación.

257
258 La madera tuvo un contenido de humedad inicial promedio de 11%, en un intervalo que
259 va desde 9.5% hasta 12.7%, y con un coeficiente de variación de 3.5%. La madera se acondicionó
260 a un estado de humedad seco y homogéneo entre especies. De tal forma, que se propone que la
261 variación en el contenido de humedad inicial de la madera, no intervino de manera significativa
262 en los resultados.

263
264 La densidad de las especies resultó con un intervalo que va desde 442 kg/m³ hasta 957
265 kg/m³, lo que permitió observar un amplio rango de esta variable. Una prueba de diferencia
266 mínima significativa de *Fisher*, posterior al análisis de varianza, demostró que, con excepción de
267 los pares de especies *F. uhdei* - *L. bahamensis* y *P. dimorphandrum* - *Quercus* spp., todas las
268 demás especies muestran diferencias estadísticamente significativas entre sí, con un nivel del
269 95% de confianza.

270
271 Sotomayor-Castellanos *et al.* (2013) reportan que los porcentajes de pared celular y de
272 espacios vacíos se relacionan proporcionalmente con la densidad de la madera. De tal forma, que
273 a mayor densidad, mayor porcentaje de pared celular y menor porcentaje de espacios vacíos. Es
274 decir, la higroscopicidad de la madera es proporcional a su densidad. Sin embargo, en este
275 estudio no se observó una relación entre la densidad y la absorción de sales de Boro (Figura 2).

276

277 Figura 2. Distribución de la absorción (A) en función de la densidad (ρ). Fuente: Elaboración
278 propia.

279

280 En el mismo contexto, la densidad se relaciona estructuralmente con la porosidad de la
281 madera (Plötze *et al.* 2011), de tal forma que la absorción de sales de Boro correspondería
282 estadísticamente con su porosidad. Una estimación de la porosidad de las maderas estudiadas,
283 empleando la fórmula (5), da como resultado una amplia dispersión de la absorción de sales de
284 Boro (A) en función de la Porosidad (ϕ) de la madera (Figura 3). El cálculo de su correlación: A
285 $= 3.65 \phi + 103$, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.15, sugiere que no existe una
286 relación entre la porosidad de la madera y la absorción de sales de Boro. La magnitud de las
287 porosidades estimadas son similares a las propuestas por Zauer *et al.* (2013) para madera de
288 *Picea abies* (L.) Karst., entre 67.3% y 71.4%, de *Acer pseudoplatanus* L. entre 63.1% y 65.8%, y
289 para *Fraxinus excelsior* L. entre 50.4% y 52.2%. De aquí, se puede deducir que la capacidad de
290 absorción de las maderas estudiadas depende más de la especie, que de su densidad y/o de su
291 porosidad, y de acuerdo con Zauer *et al.* (2013 y 2014), la determinación de la absorción de una
292 madera depende igualmente del método de medición y del estado tecnológico de la muestra
293 estudiada.

294

295 Figura 3. Dispersión de la absorción de sales de Boro (A) en función de la porosidad (ϕ) de la
296 madera y su línea de correlación. Fuente: Elaboración propia.

297

298 La Figura 4 presenta la porosidad (ϕ) en función de la densidad (ρ) y sus correlaciones
299 para datos de Plötze *et al.* (2011) y de esta investigación. En los dos casos, la porosidad
300 disminuye proporcionalmente cuando la densidad de la madera aumenta. En el caso de los datos

301 de Plötze *et al.* (2011), el coeficiente de determinación es muy alto. Sin embargo, para los datos
302 de esta investigación, el coeficiente R^2 es igual a la unidad, puesto que los datos son derivados
303 con la fórmula (5), en la cual la densidad está implícita en ella y la densidad de la pared celular se
304 mantiene constante. Con todo, de la lectura de las Figs. 3 y 4, sigue que la porosidad no tiene
305 relación con la absorción.

306
307 Efectivamente, de acuerdo con Plötze *et al.* (2011) y Zauer *et al.* (2013 y 2014), la
308 retención de una madera depende en gran medida de su estructura anatómica. El tipo de
309 porosidad y la proporción de tejidos que conforman una capa de crecimiento, son factores propios
310 del plano leñoso particular a cada madera, los cuales determinan su capacidad para absorber sales
311 de Boro y en consecuencia, su retención.

312
313 Figura 4. Porosidad (ϕ) en función de la densidad (ρ) y sus correlaciones para datos de Plötze *et*
314 *al.* (2011) y de esta investigación. Elaboración propia.

315
316 Los resultados de la Tabla 1, mostrados explícitamente en la Figura 5, muestran que el
317 ordenamiento de la retención no coincide con el de la densidad. Para fines de comparación, los
318 valores de cada especie se presentan ordenados de acuerdo a su densidad (Figura 5) y a su
319 retención (Figura 6). La contrastación de las ordenaciones, permite comparar las especies en
320 relación con su densidad y su retención

321
322 Figura 5. Ordenamiento de la especie respecto a la densidad (ρ). Fuente: Elaboración propia.

323
324 Figura 6. Ordenamiento de la especie respecto a la retención (R). Fuente: Elaboración propia.

325

326 Respecto a la variación de la retención de sales de Boro entre las diferentes especies
327 estudiadas, el análisis de varianza (Tabla 2) aportó un valor P menor que 0.05. En consecuencia,
328 se propone que existe una diferencia significativa entre algunas medias de las 10 variables, en
329 este caso la retención de sales de Boro en cada especie. La cantidad de solución preservante que
330 absorbió la madera fue diferente para cada especie.

331

332 La Tabla 2 presenta igualmente los resultados de la prueba de comparación de rangos
333 múltiple, realizada posteriormente al análisis de varianza, y empleada para determinar cuáles
334 medias son significativamente diferentes de otras. En la Tabla 2 se identificaron 7 grupos
335 homogéneos según la alineación de las X's en las columnas. Este arreglo significa que no existen
336 diferencias significativas entre aquellas especies que comparten una misma columna de X's. En
337 este caso, para los pares: *L. bahamensis*-*C. odorata*, *C. granadillo*-*C. lindley* y *F. uhdei*-*F.*
338 *mexicana*. Este resultado de apareamiento de especies respecto a su capacidad de retención, no
339 coincide con el de la densidad.

340

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

342 Fuente: Elaboración propia.

343

344 Conclusiones

345

346 La investigación determinó la densidad, la absorción y la retención de sales de Boro de diez
347 maderas mexicanas. La especie se consideró el factor de variabilidad y así se pudieron comparar
348 los resultados entre los datos derivados de cada una de ellas.

349

350 Los resultados sugieren que la capacidad de retención de sales de Boro de la madera,
351 depende principalmente de la especie y no está relacionada con su densidad.

352

353 Los valores promedio de retención de sales de Boro para todas las especies, fueron
354 mayores que el límite inferior tóxico de retención, reportados en trabajos anteriores.

355 Cuantitativamente, los resultados son comparables con los reportados en la bibliografía.

356

357 Referencias

358

359 Alfaro-Pérez, J. D. (2013). Estudio de retención y penetración de tres preservantes comerciales en
360 nueve especies maderables presentes en costa rica. *Ingeniería*, 23 (1), 107-119. doi:

361 10.15517/ring.v23i1.9825

362

363 AWPS. (2014). P5-07 Standard for Waterborne Preservatives. American Wood-Preservers'
364 Association. Chicago, USA.

365

366 Ávila-Calderón, L. E. A., Herrera-Ferreyra, M. A. & Raya-González, D. (2012). *Preservación de*
367 *la Madera en México*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

368

369 Baysal, E. & Yalinkilic, M. K. (2005). A new boron impregnation technique of wood by vapor
370 boron of boric acid to reduce leaching boron from wood. *Wood Science and Technology*, 39, 187-

371 198. doi: 10.1007/s00226-005-0289-1

372

373 Berrocal, A., Muñoz, F. & González, G. (2004). Ensayo de penetrabilidad de dos preservantes a
374 base de boro en madera de melina (*Gmelina arborea*) crecida en Costa Rica. *Kurú: Revista*
375 *Forestal*, 1(3), 1-12.
376

377 Bodig, J. & Jayne, B. A. (1982). *Mechanics of wood and wood composites*. New York: Van
378 Nostrand Reinhold.
379

380 Caldeira, F. (2010). Boron in Wood Preservation. A Review in its Physico-Chemical Aspects.
381 *Silva Lusitana*, 18(2), 179-196.
382

383 Cruz-De León, J. (2010). *Manual para la protección contra el deterioro de la madera*. México:
384 Comisión Nacional Forestal.
385

386 Dhamodaran, T. K. & Gnanaharan, R. (2007). Boron impregnation treatment of *Eucalyptus*
387 *grandis* Wood. *Bioresource Technology*, 98, 2240-2242. doi: 10.1016/j.biortech.2006.08.012
388

389 Echenique-Manrique, R. & Plumtre, R. A. (1994). *Guía para el uso de maderas de Belice y*
390 *México*. Guadalajara: Consejo Británico.
391

392 Echenique-Manrique, R. (1970). *Descripción, características y usos de 25 maderas tropicales*
393 *mexicanas*. Volumen 1. Serie Maderas de México. México: Cámara Nacional de la Industria de la
394 Construcción.
395

396 Erdoiza-Sordo, J. J. & Echenique-Manrique, R. (1980). *Preservación de madera de pino con*
397 *sales de boro*. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos. Serie: La madera y
398 su uso en la construcción. México: Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos.
399

400 Fengel, D. & Wegener, G. (1984). *Wood-chemistry, ultrastructure, reactions*. New York: Walter
401 de Gruyter. doi: 10.1002/pol.1985.130231112
402

403 Freitag, C. & Morrell, J. J. (2005). Development of threshold values for boron and fluoride in
404 non-soil contact applications. *Forest Products Journal*, 55, 97-101.
405

406 Fuentes-Salinas, M. (2000). Estimación del Punto de Saturación de la Fibra (PSF) de las maderas.
407 *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 6(1), 79-81.
408

409 Grace, J. K., Byrne, A., Morris, P. I. & Tsunoda, K. (2006). Performance of borate-treated
410 lumber after 8 years in an above-ground termite field test in Hawaii. International Research
411 Group on Wood Protection. IRG/WP 06-30390. IRG Secretariat, Stockholm, Sweden.
412

413 Kartal, S. N. (2006). Combined effect of boron compounds and heat treatments on wood
414 properties: boron release and decay and termite resistance. *Holzforschung*, 60(4), 455-458. doi:
415 10.1515/HF.2006.072
416

417 Lloyd, J. D., Fogel, J. L. & Vizek, A. (2001). The use of Zirconium as an inert fixative for borates
418 in Preservation. International Research Group on Wood Preservation. IRG/WP 01-30256. IRG
419 Secretariat, Stockholm, Sweden.

420

421 Obanda, D. D., Shupe, T. F. & Barnes, H. M. (2008). Reducing leaching of boron-based wood
422 preservatives. A review of research. *Bioresource Technology*, 99, 7312-7322. doi:
423 10.1016/j.biortech.2007.12.077

424

425 Obounou-Akong, F., Gérardin, P., Thévenon, M. F. & Gérardin-Charbonnier, C. (2015).
426 Hydrogel-based boron salt formulations for wood preservation. *Wood Science and Technology*,
427 49, 443-456. doi: 10.1007/s00226-015-0701-4

428

429 ONNCCE. (1999). Norma Mexicana NMX-C-410-ONNCCE-1999. Industria de la Construcción
430 - Vivienda de Madera - Retención y Penetración de Sustancias Preservadoras en Madera -
431 Métodos de Prueba. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la
432 Construcción y Edificación.

433

434 Plötze, M. & Niemz, P. (2011). Porosity and pore size distribution of different wood types as
435 determined by mercury intrusion porosimetry. *European Journal of Wood Products*, 69, 649-657.
436 doi: 10.1007/s00107-010-0504-0

437

438 Salman, S., Pétrissans, A., Thévenon, M. F., Dumarcay, S., Perrin, D., Pollier, B. & Gérardin, P.
439 (2014). Development of new wood treatments combining boron impregnation and thermo
440 modification: effect of additives on boron leachability. *European Journal of Wood Products*, 72,
441 355-365. doi: 10.1007/s00107-014-0787-7

442

443 Simsek, H., Baysal, E. & Peker, H. (2010). Some mechanical properties and decay resistance of
444 wood impregnated with environmentally-friendly borates. *Construction and Building Materials*,
445 24, 2279-2284. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.028

446
447 Sotomayor-Castellanos, J. R. & Ramírez-Pérez, M. (2013). Densidad y características
448 higroscópicas de maderas mexicanas. Base de datos y criterios de clasificación. *Investigación e*
449 *Ingeniería de la Madera*, 9(3), 3-29.

450
451 Tondi, G., Wieland, S., Lemenager, N., Petutschnigg, A., Pizzi, A. & Thevenon, M. F. (2012).
452 Efficacy of tannin in fixing boron in wood: fungal and termite resistance. *BioResources*, 7(1),
453 1238-1252.

454
455 Tsunoda, K., Byrne, A., Morris, P. I. & Grace, J. K. (2006). Performance of borate-treated
456 lumber after 10 years in a protected, above-ground field test in Japan (Final report) International
457 Research Group on Wood Protection. IRG/WP 06-30395. IRG Secretariat, Stockholm, Sweden.

458
459 Zauer, M., Pfriem, A. & Wagenführ, A. (2013). Toward improved understanding of the cell-wall
460 density and porosity of wood determined by gas pycnometry. *Wood Science and Technology*, 47,
461 11971211. doi: 10.1007/s00226-013-0568-1

462
463 Zauer, M., Hempel, S., Pfriem, A., Mechtcherine, V. & Wagenführ, A. (2014). Investigations of
464 the pore-size distribution of wood in the dry and wet state by means of mercury intrusion
465 porosimetry. *Wood Science and Technology*, 48, 1229-1240. doi: 10.1007/s00226-014-0671-y

466



467

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

469

470

471

472

473

474

475

476

477

478

479

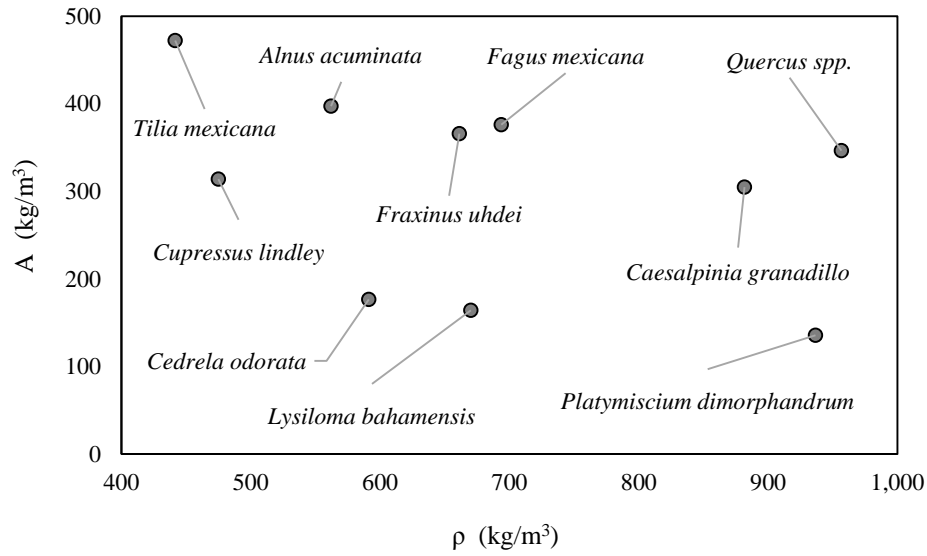
480

481

482

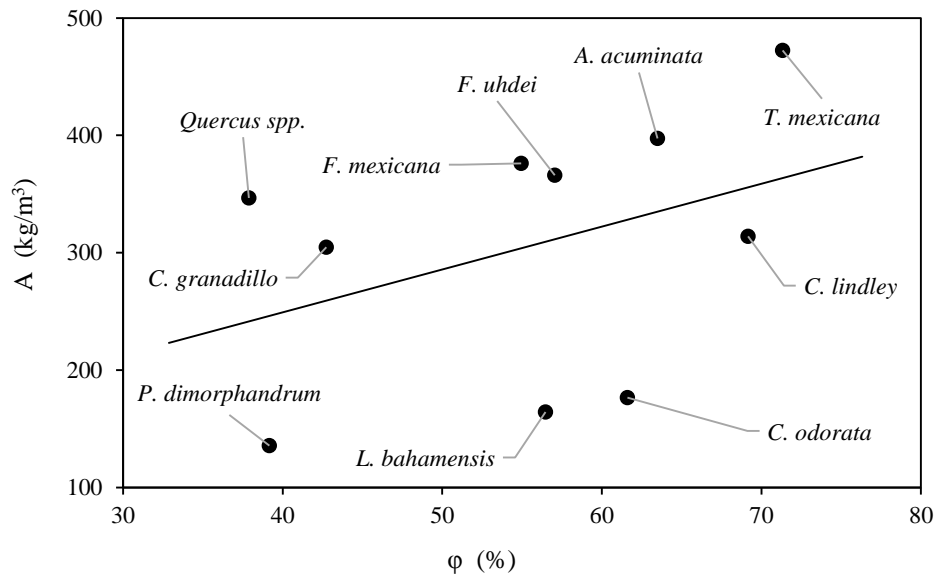
483

484



485
 486 Figura 2. Distribución de la absorción (A) en función de la densidad (ρ). Fuente: Elaboración
 487 propia.

488
 489
 490
 491
 492
 493
 494
 495
 496
 497
 498
 499
 500



501

502 Figura 3. Dispersión de la absorción de sales de Boro (A) en función de la porosidad (φ) de la
 503 madera y su línea de correlación. Fuente: Elaboración propia.

504

505

506

507

508

509

510

511

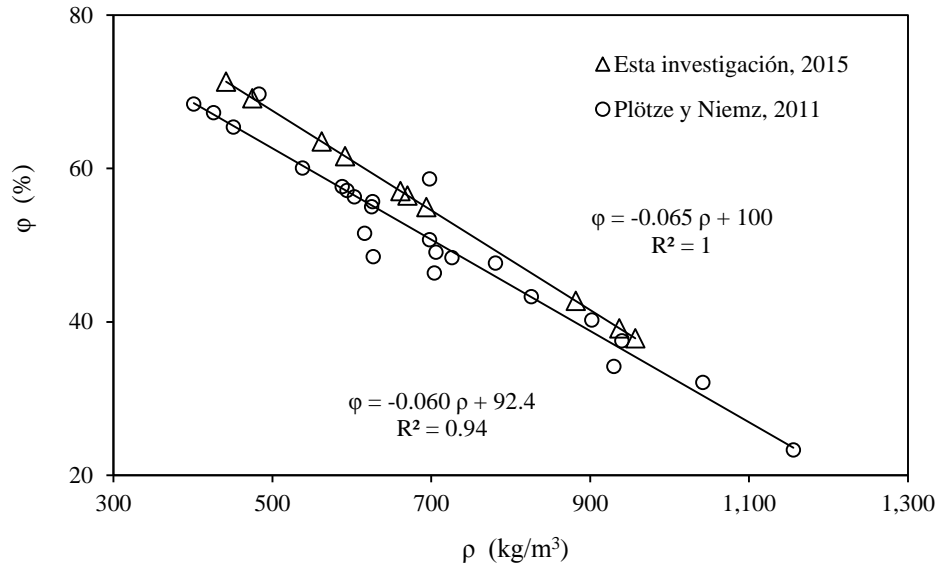
512

513

514

515

516



517

518 Figura 4. Porosidad (φ) en función de la densidad (ρ) y sus correlaciones para datos de Plötze *et*

519 *al.* (2011) y de esta investigación. Fuente: Elaboración propia.

520

521

522

523

524

525

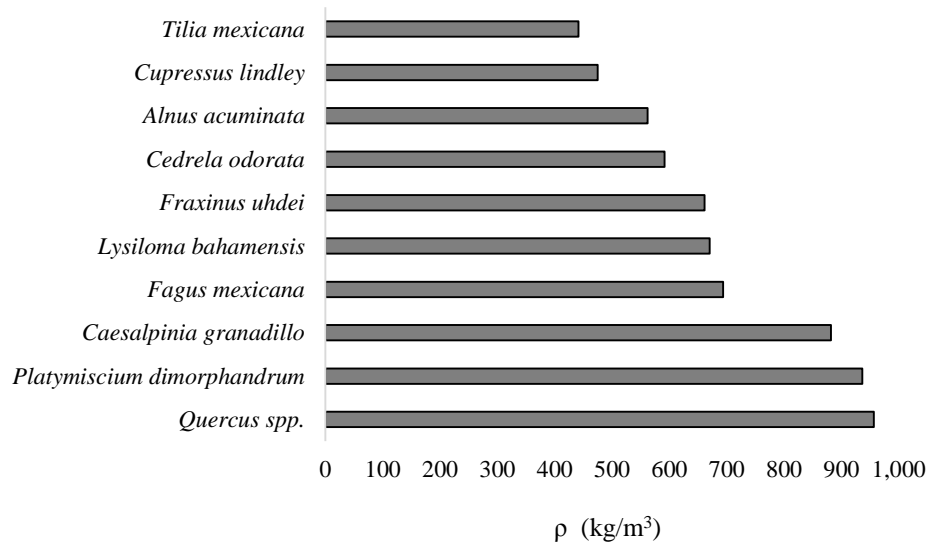
526

527

528

529

530



531

532 Figura 5. Ordenamiento de la especie respecto a la densidad (ρ). Fuente: Elaboración propia.

533

534

535

536

537

538

539

540

541

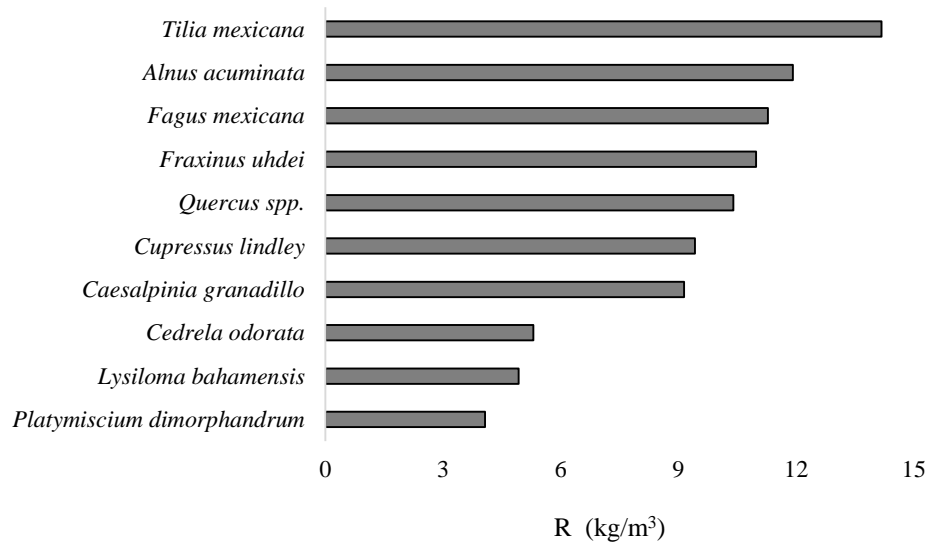
542

543

544

545

546



547

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

549

550

551

552

553

554

555

556

557

558

559

560

561

562

563 Tabla 1. Contenido de humedad, densidad, absorción y retención de sales de Boro de diez
 564 maderas tropicales. Fuente: Elaboración propia.

Especie		CH (%)	ρ (kg/m ³)	A (kg/m ³)	R (kg/m ³)
<i>Tilia mexicana</i> Schltdl.	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 lindley</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 porciento.

565

566

567

568

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

570 Fuente: Elaboración propia.

Análisis de varianza				
Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón <i>F</i>
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 ³)	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 spp.</i>	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.

571

572