



ESTUDIO DE LA RESISTENCIA AL FUEGO EN MADERAS DE PINO Y EUCALIPTO TRATADAS CON BORATO DE ZINC

STUDY OF FIRE RESISTANCE ON PINE & EUCALYPTUS WOOD IMPREGNATED WITH ZINC BORATE

Camargo, Álvaro ^{(1)*}; Mantero, Carlos⁽²⁾; Ibáñez, Marcela⁽³⁾

⁽¹⁾Lic. Bioquímica. Procesos Industriales de la Madera, Sede Tacuarembó, Universidad de la República, Tacuarembó, Uruguay

⁽²⁾Ing. Agr. Estación Experimental Prof. Bernardo Rosengurtt. Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Montevideo Uruguay.

⁽³⁾Dr. Química. Instituto Superior de Estudios Forestales. Sede Tacuarembó, Universidad de la República, Tacuarembó, Uruguay

* Contacto: alvaro.camargo@cut.edu.uy

CÓDIGO: F1-4619915

Resumen

En Uruguay las principales especies madereras comercialmente disponibles son el *Pinus taeda* L. y el *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, utilizados comúnmente en mueblería y construcción. En ambas aplicaciones, la combustibilidad del material es una desventaja, por lo cual la protección frente al fuego debe mejorarse. En ese sentido, la impregnación del material con un agente ignífugo (formulación química con capacidad de retardo al fuego) es una técnica comúnmente empleada. En este trabajo se determinaron los parámetros asociados a la resistencia al fuego como propagación de llama (cms^{-1}), área carbonizada (cm^2) e índice de carbonización (INC,%) para las especies madereras mencionadas, y se compararon esos valores con aquellos obtenidos al tratar esa madera con borato de zinc (ZnB), reconocido retardante de llama. La metodología se basó en ensayos de exposición de los materiales, a la llama laminar controlada, en un dispositivo denominado túnel de *Vandersall*. Los perfiles de carbonización obtenidos tras la exposición al fuego, se caracterizaron midiendo frente, ancho y espesor de carbonización a través de fotografías ópticas, utilizando el software para procesamiento y análisis de imágenes, FIJI. Así mismo, se analizó la morfología de las superficies carbonizadas sin tratar y tratadas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB). Los resultados indican que las maderas tratadas con ZnB mejoran su resistencia al fuego, la propagación de la llama decrece hasta un 27.26%, el área carbonizada hasta un 42.81% y el índice de carbonización hasta un 58.46% respecto a los materiales sin tratamiento.

Palabras-clave: Ignífugo, Borato de Zinc (ZnB)

Abstract

The commercially available timber species in Uruguay are *Pinus taeda* and *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, used for construction and furniture. As the combustibility of the material is a disadvantage for both of its uses, protection against fire must be controlled. In this regard, impregnating the wood with a fire retardant is a commonly used technique. In this work, the values of the parameters associated with fire resistance, such as flame propagation (cms^{-1}), carbonized area (cm^2) and carbonization index (INC, %) were determined for both wood species, and later compared with the values obtained after treating the wood with zinc borate (ZnB). Methodology was based on exposing the materials to a controlled laminar flame inside a *Vandersall's* tunnel. The carbonization profiles obtained after exposure to fire were characterized by measuring the front, width and thickness of carbonization through optical photographs using the software for image processing and analysis, FIJI. Morphology of both untreated and treated wood carbonized were analyze by scanning electron microscopy (SEM). The results indicate that wood treated with ZnB improves its fire resistance: flame propagation decreases by 27.26 %, carbonized area by 42.81 % and carbonization rate by 58.46 % when compared to the untreated material.

Keywords: Flame Retardant (FR), Zinc Borate (ZnB)



1. INTRODUCCIÓN

Las normativas de seguridad frente al fuego que categorizan el nivel de combustibilidad de la madera utilizada en obras con fines edilicios, aún es un tema en estudio en nuestro país (Moya & Baño 2016). Cada vez es más frecuente el empleo de la madera en obras de construcción, como casas, edificios, etc, debido a que ésta posee muchos beneficios frente a materiales convencionales, como por ejemplo, su capacidad de intercambiar agua y calor con el ambiente (Suleiman *et al* 1999; Korjenic *et al* 2010) y la de ser un material renovable (Falk 2009). Por otra parte, la madera se clasifica como un material combustible y por tanto debe ser tratada mediante algún método de protección frente al fuego para que pueda utilizarse sin riesgo, ya sea formando parte de estructuras mobiliarias, ornamentales o en materiales para construcción de viviendas. La descomposición termoquímica de la madera es un proceso que ocurre en varias etapas, y que es dependiente de la composición química y las propiedades fisicoquímicas de la madera (Di Blasi 2008). El método de protección frente al fuego por impregnación con agentes químicos con propiedades ignífugas, se utiliza desde hace mucho tiempo y se ha demostrado su eficacia (Yan *et al* 2019). La tendencia hacia compuestos más amigables con la naturaleza ha puesto a los boratos entre los más utilizados con fines de protección y no solo frente al fuego, sino también frente a microorganismos debido a sus propiedades antifúngicas y termicidas (Thévenon *et al* 2010; Ahmed *et al* 2004). Los ensayos de exposición al fuego, permiten caracterizar la resistencia al fuego de materiales ensayados en condiciones controladas. En este trabajo se utilizó un túnel de *Vandersall* (León & Carmona 2009) para exponer al fuego probetas de madera en condiciones normales y tratadas con borato de zinc (ZnB) durante un único tiempo de exposición a la llama. Como en el Uruguay, las principales especies madereras que se cultivan, procesan y comercializan son el *Pinus taeda* L. y el *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden (Geary 2001), estas especies fueron utilizadas en los ensayos. Los perfiles de carbonización obtenidos se compararon a través de parámetros que surgen de las dimensiones de los mismos, y que fueron realizadas a partir de fotografías ópticas procesadas con el software FIJI (Camargo & Ibáñez 2018; Schindelin *et al* 2012). Estos parámetros son: la propagación de llama, definida como la velocidad de avance por parte del frente de carbonización en cm s^{-1} , el área carbonizada, que surge de la formación de carbón en la cara de la probeta de madera expuesta a la llama expresada en cm^2 , y el índice de carbonización o relación de volúmenes de madera quemada y sin quemar. Se realizó también un estudio morfológico de las superficies carbonizadas utilizando microscopía electrónica de barrido (MEB) con el objetivo de evaluar comparativamente el daño estructural a nivel de las fibras en una etapa inicial de la degradación térmica de la madera sin tratar y tratada con ZnB.

2. METODOLOGÍA

2.1. Acondicionamiento de las muestras

Se utilizaron muestras de albura de *P.taeda* y *E.grandis* de dimensiones $25.000 (\pm 0.002) \times 9.000 (\pm 0.002) \times 1.000 (\pm 0.002)$ cm, procesadas mediante corte tangencial y radial, para exponer diferentes planos anatómicos en la superficie mayor de las probetas. Luego de secar en estufa durante 48 horas a 105 ± 2 °C se determinó la masa de cada probeta, las cuales fueron acondicionadas para el proceso de impregnado.

2.2. Impregnación por vacío-vacío

La impregnación se realizó de acuerdo con la norma EN-113 (1996) mediante el método de vacío-vacío, con una solución de ZnB micrométrico al 5% w/w, sintetizado en el laboratorio usando como precursores, ácido bórico y óxido de zinc en medio amoniacal con relación molar 4:1:4 para Zn:B:N.



Previo al ensayo de exposición al fuego, las probetas impregnadas y sin impregnar son secadas en horno a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 24 horas.

2.3. Exposición al fuego

Las probetas se exponen al fuego durante 30 segundos en un dispositivo denominado túnel de *Vandersall*. Este se compone de una cámara donde se soporta la probeta en su base superior, de manera que la misma forme un ángulo de 45° con respecto a la horizontal, y que el extremo inferior de ésta se halle en contacto con la llama en régimen de flujo laminar constante que proviene de un mechero tipo Bunsen (León & Carmona 2009; Camargo & Ibáñez 2018).

2.4. Análisis estructural mediante MEB

Se evaluaron las características morfológicas sobre las superficies de maderas expuestas al fuego sin tratar y tratadas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB). Se utilizó un equipo para microscopía electrónica (JEOL Ltda, Tokio, JP) modelo JCM 6000 Plus, operando a 10KV y en modalidad de detección de electrones secundarios.

2.5. Análisis estadístico

Se utilizó un análisis de varianza de factor único como modelo estadístico para determinar diferencias y similitudes entre los parámetros evaluados en madera sin tratar y tratada con ZnB. La comparación entre medias se realizó para un $\alpha = 0.05$ utilizando un test de Tukey.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Exposición al fuego

Los valores promedios para los parámetros determinados a partir de medidas sobre los perfiles de carbonización se resumen en la *Tabla 1*. En todos los casos, los valores promedios de propagación de llama fueron menores cuando la madera fue impregnada con ZnB, con respecto a la madera sin tratamiento.

Tabla 1: Valores promedios de propagación de llama, área carbonizada e índice de carbonización obtenidos para 30 segundos de exposición al fuego. Letras diferentes en las columnas indican grupos con diferencia estadística para $\alpha = 0.05$.

Especies	<i>P.taeda</i>		<i>E.grandis</i>	
	Tangencial	Radial	Tangencial	Radial
Propagación de llama (cms^{-1})	0.4780 \mathbf{a} (No ZnB) 0.3750 \mathbf{b} (ZnB)	0.4353 \mathbf{a} (No ZnB) 0.3167 \mathbf{b} (ZnB)	0.4514 \mathbf{a} (No ZnB) 0.3533 \mathbf{b} (ZnB)	0.5439 \mathbf{a} (No ZnB) 0.4504 \mathbf{b} (ZnB)
Área Carbonizada (cm^2)	42.83 \mathbf{a} (No ZnB) 42.31 \mathbf{a} (ZnB)	53.16 \mathbf{a} (No ZnB) 36.95 \mathbf{b} (ZnB)	74.12 \mathbf{a} (No ZnB) 42.39 \mathbf{b} (ZnB)	72.80 \mathbf{a} (No ZnB) 60.95 \mathbf{b} (ZnB)



Indice de Carbonización (InC%)	0.0747a (No ZnB) 0.0738a (ZnB)	0.1576a (No ZnB) 0.0655b (ZnB)	0.1981a (No ZnB) 0.1246b (ZnB)	0.2177a (No ZnB) 0.1094b (ZnB)
--------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------

Los valores promedios de propagación de llama obtenidos para madera sin tratamiento, son muy cercanos entre sí, exceptuando el registrado para el plano radial de *E.grandis*; éste se aparta de los demás hacia valores levemente mayores. Lo mismo ocurre cuando la madera es tratada con ZnB, con tendencia hacia valores menores en *P.taeda* de sección radial. La diferencia obtenida entre valores promedio de los parámetros para madera sin tratar y tratada con ZnB expresado en porcentaje, representa el efecto del tratamiento con ZnB sobre el comportamiento o resistencia al fuego de las maderas estudiadas. Es así que el tratamiento con ZnB logro reducir la propagación de llama en 21.56% y 27.26% para los planos tangencial y radial de *P.taeda*, y en 21.73% y 17.19% para los planos tangencial y radial de *E.grandis*, respectivamente.

Se obtuvieron mayores valores promedios de áreas carbonizadas en madera de *E.grandis*, 1.7 y 1.4 veces más grandes en el plano tangencial y radial respectivamente con respecto a las halladas en *P.taeda*, con diferencia significativa estadística para un valor de $\alpha = 0.05$ entre maderas sin y con tratamiento. Por otra parte, esto no sucedió para el área carbonizada sobre el plano tangencial de *P.taeda* entre madera sin y con tratamiento al mismo grado de confianza (ver *Tabla 2*), lo cual significa que no se registró un efecto positivo o disminución de área carbonizada en madera tratada expuesta al fuego, con respecto a la obtenida en madera sin tratar. El tratamiento con ZnB logro disminuir el área carbonizada en un 26.33% sobre el plano radial de *P.taeda* y en un 42.81% y 16.28% sobre los planos tangencial y radial de *E.grandis* respectivamente.

El valor promedio para el índice de carbonización de *E.grandis* sin tratar fue 2.6 y 1.4 veces mayor para los planos tangencial y radial respectivamente, con respecto a *P.taeda*. Esta tendencia guarda relación con los demás parámetros, dado que los valores promedios de propagación de llama son similares entre sí, y los de área carbonizada son mayores en *E.grandis*. De acuerdo con esto, y con la definición de índice de carbonización, a mayor valor de área carbonizada, mayor valor de índice de carbonización, como puede verse a través de la siguiente expresión:

$$INC\% = \frac{a_{\max} \times e_{\max}}{a_i \times e_i} \quad [1]$$

donde:

- ◆ a_{\max} representa el perfil o área de carbonización expresado en cm^2
- ◆ e_{\max} es el espesor de carbonización expresado en cm
- ◆ a_i es el área total de la cara expuesta de la probeta expresado en cm^2
- ◆ e_i es el espesor total de la probeta expresado en cm

De igual manera que para el área carbonizada, el promedio para el índice de carbonización no presentó diferencia estadística significativa para un valor de $\alpha = 0.05$ entre madera de *P.taeda* de sección tangencial sin tratar y tratada con ZnB. Por otra parte, ambos planos de madera de *P.taeda* tratada obtuvieron valores menores de media para el índice de carbonización con respecto a los hallados en *E.grandis*. Mediante la ecuación [1] puede entenderse como el tratamiento con ZnB, favoreció al decremento, tanto del área de carbonización (a_{\max}) como de su espesor (e_{\max}). El tratamiento con ZnB



4º CONGRESO
LATINOAMERICANO
DE ESTRUCTURAS
DE MADERAS

logro reducir el índice de carbonización en un 13.25% y 58.46% sobre el plano radial de *P.taeda* y en un 37.11% y 49.74% sobre los planos tangencial y radial de *E.grandis* respectivamente.

3.2. Análisis estructural mediante MEB

3.2.1 Comparación de superficies carbonizadas sin tratar vs. tratadas con ZnB

Se observa mayor daño a nivel de fibras en superficies sin tratar (figura 1 a, b, c y d) ocasionados por la exposición al fuego, con respecto a superficies tratadas con ZnB (figura 1. A, B, C y D). Esto se debe al recubrimiento por parte de ZnB que se visualiza como una capa protectora en las imágenes correspondientes a superficies tratadas y expuestas al fuego (figura 1. A, B, C y D). La cobertura de ZnB no aparece exactamente igual en todas las superficies, así como tampoco su distribución es la misma, sino que depende directamente de la anatomía de cada especie y de cómo durante el proceso

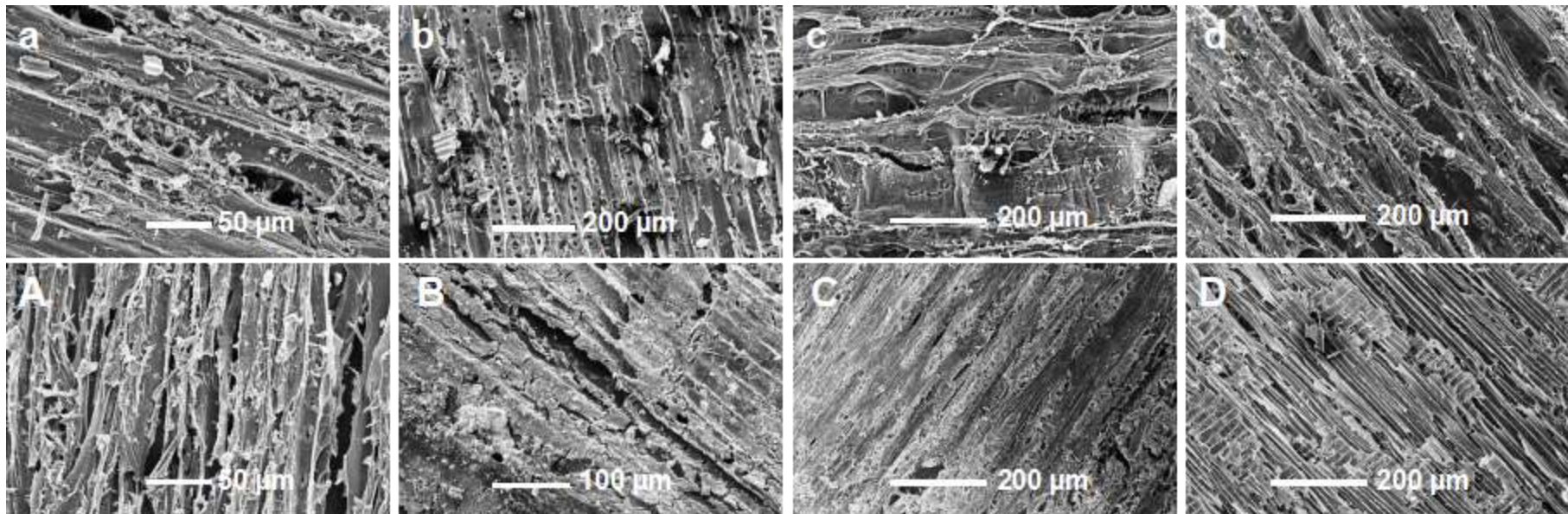


Figura 1: Imágenes MEB de superficies de *P.taeda* (aA, bB) y *E.grandis* (cC, dD) expuestas al fuego en túnel de Vandersall. Sección tangencial (a, c) y radial (b, d) sin tratamiento, y sección tangencial (A, C) y radial (B, D) tratada con ZnB.

de impregnación, las mismas absorban, distribuyan y retengan las especies del ZnB (Sotomayor-Castellanos & Villaseñor 2016). De todas las superficies tratadas con ZnB, la de sección radial de *P.taeda* (fig1. B) es la que muestra una distribución más homogénea y de mayor espesor, hecho que guarda relación con los parámetros de resistencia al fuego determinados, ya que, para esta especie fue el plano o cara anatómica que obtuvo menores valores promedios de velocidad de llama, área carbonizada e índice de carbonización.

3.2.2 Morfología de superficies carbonizadas sin tratamiento ignífugo

El análisis morfológico de las superficies carbonizadas, es útil para evidenciar daños a nivel de fibras y comprender la evolución de la carbonización a través de estructuras originadas durante el proceso de degradación térmica (Camargo & Ibáñez 2018).

Las imágenes de superficies carbonizadas sin tratamiento muestran un mayor grado de deterioro térmico en *E.grandis*, independientemente de la sección expuesta al fuego. Esto se denota en el nivel de deformación de las fibras, en especial las que se encuentran delimitando con vasos (flechas fig.1 c y d). En superficies de *P.taeda* la deformación de fibras, no es tan evidente, aunque si se observan residuos del material originados por roturas de éstas. Por otro lado, el mecanismo por el cual la madera se descompone para formar partículas de carbón, involucra reacciones termoquímicas de los compuestos presentes en las fibras: holocelulosa y lignina (Lowden & Hull 2013). En *P.taeda* las partículas formadas a partir de los componentes de la superficie tienen aspecto amorfo y una distribución desordenada, mientras que en *E.grandis* las mismas tienen forma de esfera (flecha fig.2 D) y evolucionan desde el interior de las fibras (flecha fig.2 C).

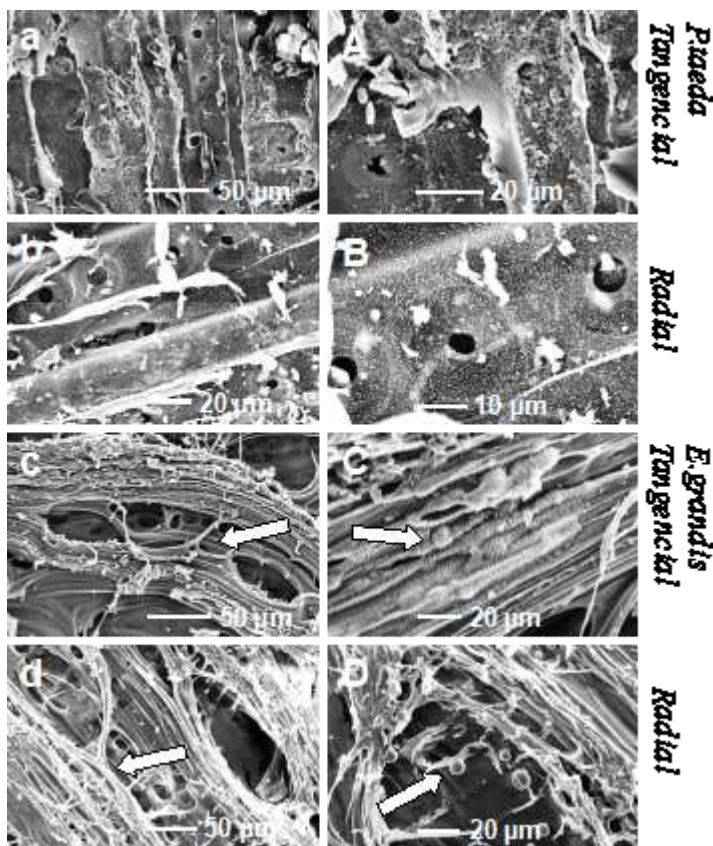


Figura 2: Imágenes MEB de superficies carbonizadas de *P.taeda* y *E.grandis* en diferentes magnificaciones

4. CONCLUSIONES

La impregnación de maderas con ZnB para promover su resistencia al fuego, fue efectiva bajo las condiciones experimentales de exposición. La capacidad de retardo al fuego es diferente entre las especies estudiadas, así como también es diferente en función de la composición anatómica presente en el plano expuesto a la llama. La especie con mejor comportamiento al fuego, en función de los parámetros estudiados para madera sin tratar y tratada con ZnB, es *P.taeda*, mostrando una mejora de los mismos cuando el plano expuesto al fuego es el radial. Esto coincide con lo observado mediante MEB, ya que el recubrimiento es de mayor espesor y más homogéneo sobre este plano.

AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) de la Universidad de la República, Uruguay.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, B. M. French, J. R.J. & Vinden, P. (2004). Evaluation of borate formulations as wood preservatives to control subterranean termites in Australia. *Holzforschung.*, v. 58, p. 446–454.
- Di Blasi, C. (2008). Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. *Prog. Energy Combust. Sci.*, n, 34. p. 47–90.
- Camargo, A. & Ibáñez. C. M. (2018). Initial study of micronized zinc borate as flame retardant in *Eucalyptus grandis* from Uruguay. *MRS Adv.*, v. 3, n. 61, p. 3551-3556.
- Falk, R. H. (2009). Wood as a sustainable building material. *For. Prod. J.*, v. 59, n. 9, p. 6-12.
- Geary, T.F. (2001). Afforestation in Uruguay: study of a changing landscape. *J. For.*, n. 99, p. 35-39.
- Korjenic, A. Teblich, H. & Bednar, T. (2010). Increasing the indoor humidity levels in buildings with ventilation systems: Simulation aided design in case of passive houses. *Build. Simul.* n. 3, p. 295-310.
- León, A. & Carmona R. (2009). Estudio comparativo del punto de ignición y avance de llama en madera de pino radiata versus un compuesto de madera–resina termoplástica. 4o Congreso Chileno de Ciencias Forestales, Talca, Jun.
- Lowden, L. A. & Hull, T. R. (2013). Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. *Fire Sci. Rev.*, v. 2, n. 4, p. 1-19.
- Moya, L. & Baño, V. (2016). Hacia la normalización de estructuras de madera en Uruguay: Estado del arte y propuesta para generar un cuerpo normativo para madera estructural. Documento de Investigación, No5. Universidad ORT de Montevideo & Facultad de Arquitectura, Uruguay.
- Schindelin, J. Arganda-Carreras, I. & Frise, E. et al. (2012). Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nat. Methods.*, v. 9, n. 7, p. 676-682.
- Sotomayor-Castellanos, J. R. & Villaseñor J.M. (2016). Retention and absorption of boron salts solution of ten mexican woods. *Acta univ.*, v. 26, n 2, p. 12-19.
- Suleiman, B. M. Larfeldt, J. Leckner, B. & Gustavsson, M. (1999). Thermal conductivity and diffusivity of wood. *Wood Sci. Technol.*, n. 33, p.465-473.
- Thévenon, M.F. Tondi, G. Pizzi A. Environmentally Friendly Wood Preservative System Based on Polymerized Tannin Resin-Boric Acid For Outdoor Applications. *Madera-Cienc Tecnol.*, Vol 12, n, 3. p, 253-257.
- Yan, L. Xu, Z. & Liu, D. (2019). Synthesis and application of novel magnesium phosphate ester flame retardants for transparent intumescent fire-retardant coatings applied on wood substrates. *Prog Org Coat.*, n, 129. p, 327–337.