

ENSAYO DE PRESERVACIÓN DE MADERA TRATADA CON Zn Y Mn EFECTIVIDAD DE TRATAMIENTO ANTILIXIVIANTE CON BÓRAX LUEGO DE CINCO AÑOS DE CONTACTO CON EL SUELO

PRESERVATION TRIAL FOR WOOD TREATED WITH Zn AND Mn AND EFFECTIVENESS OF TREATMENT WITH BORAX TO PREVENT LEACHING AFTER FIVE YEARS OF CONTACT WITH SOIL

C. Ibáñez^{1,*}, C. Mantero², M. Rabinovich¹, R. Escudero², J. Franco³

RESUMEN

A través de un ensayo de campo implementado de acuerdo a la norma EN 252, se evaluó la efectividad de tratamientos en etapas, tendientes a disminuir la lixiviación de una solución rica en Zn y Mn obtenida a partir de un proceso de reciclado aplicada en la madera por el método Bethell. La segunda etapa antilixivante agregó bórax por pincelado o por el método Bethell. Se utilizó madera de *Pinus taeda*. Este trabajo presenta el análisis de la evolución del proceso de deterioro a lo largo de 5 años de ensayo de campo y su evaluación. Se utilizó el índice climático de Scheffer como método de evaluación del riesgo microbiológico en el sitio del ensayo y se realizó un análisis microscópico de la madera, para verificar el tipo de deterioro presente. Los tratamientos al 3% y al 6% en Zn con agregado de bórax por el método Bethell fueron los de mejor desempeño entre los evaluados a pesar de no haber superado el desempeño del preservante de referencia. Se observó la presencia de los tres tipos de pudrición, blanca, marrón y blanda tanto en controles sin tratamiento como en maderas tratadas, en un sitio con condiciones intermedias para el deterioro.

Palabras clave: Cementerio de estacas, *Pinus taeda*, protección de maderas, reciclaje, tratamiento en etapas.

ABSTRACT

The effectiveness of treatments in stages aimed at reducing the leaching of a solution rich in Zn and Mn obtained from a recycling process introduced into the wood by the Bethell method and a second stage in which borax was added by brushing and by the Bethell method, was evaluated through a field test. *Pinus taeda* wood was used according to EN 252 (1989). This paper presents an analysis of the evaluation and evolution of the process of deterioration over 5 years test. Scheffer climate index was used as a method of microbiological risk assessment at the site of the test and microscopic analysis of wood was carried out to verify the type of damage. Treatments 3% and 6% in Zn with borax added by the Bethell method were the top performers among the evaluated none of them performed better than the reference preserver. The presence of the three types of rot, white, brown and soft both on untreated controls and treated wood, in a site with intermediate conditions for microbial deterioration was observed.

Keywords: Recycling, *Pinus taeda*, stage treatment, stakes graveyard, wood protection.

¹Sede Tacuarembó, Universidad de la República, Tacuarembó, Uruguay.

²Departamento Forestal, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

³Departamento de Biometría y Estadística, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

*Autor para correspondencia: marcela.ibanez@cut.edu.uy

Recibido: 01.06.2015 Aceptado: 04.02.2016

INTRODUCCIÓN

La durabilidad de la madera tratada o sin tratar, en contacto con suelo es influenciada por diversos factores tales como condiciones climáticas, tipo de suelo (pH, humedad, salinidad, composición química, cantidad disponible de nutrientes), micro flora del suelo (microorganismos) e insectos (Rayner y Boddy 1988, Råberg *et al.* 2013). Si además de estar en contacto con suelo, la madera está expuesta a la intemperie, alcanzando elevados contenidos de humedad, se clasifica dentro de la Clase de Riesgo 4, de acuerdo a la Norma UNE-EN 335-2 (2006), mientras que AWPA dentro del sistema de categorías de uso U1-14 (AWPA 2014), distingue tres subclases dentro de la categoría UC4 de mayor riesgo. El nivel de protección recomendado en este caso, para reducir o eliminar el riesgo de deterioro incluye tratamientos en profundidad con productos preservantes. Solo los procesos de impregnación que utilizan presión, como el de célula llena o Bethell (vacío– presión – vacío), que inyectan el preservante dentro de la estructura de la madera por acción de la presión aplicada, logran la profundidad requerida. Este proceso permite alcanzar altos niveles de penetración y retención del producto químico en la madera (Eaton y Hale 1993).

La naturaleza del riesgo biológico al que se expone la madera en uso, define también el producto a utilizar, el que debe poseer determinadas características generales. En particular debe penetrar profundamente en la madera y ser de alta resistencia a la lixiviación, pero sin causar impactos ambientales y sobre la salud como lo han hecho los preservantes tradicionales. Así productos a base de zinc y boro, de probada efectividad funguicida (AWPA 2014) penetran profundamente en la madera pero al mismo tiempo se lixivian fácilmente de la misma. Son numerosas las investigaciones que han buscado disminuir la lixiviación de estos compuestos, mediante la aplicación de un segundo compuesto y tratamiento (Dev *et al.* 1997, Yildiz y Dizman 2010) o aplicando directamente a la madera compuestos que combinan estos productos como el ZiBOC (Tripathi y Poonia 2015, Rawat *et al.* 2015)

El bórax y demás compuestos de boro son ingredientes activos de numerosos preservantes. Son efectivos como ignífugos y contra hongos e insectos, al mismo tiempo son de uso seguro aplicados de acuerdo a buenas prácticas industriales y no constituyen un problema ambiental por su baja ecotoxicidad (Lloyd *et al.* 1990, Rainer 1993, Lloyd 1998, Freeman *et al.* 2009, Köse *et al.* 2011). Estas propiedades del bórax, potencian la efectividad del zinc como conservador y se evita la lixiviación de las sales metálicas de la madera por la formación *in situ* de borato de zinc a nivel superficial. El borato de zinc es el menos lixiviable de todos los boratos. Presenta una reducida solubilidad en agua, por lo cual es difícil de aplicar a la madera sólida, es normal incorporarlo como polvo en madera compuesta (Laks y Manning 1995, 1997, Furuno *et al.* 2003); es conocida su efectividad como funguicida en dichos materiales (Kirkpatrick y Barnes 2006, Baditrala *et al.* 2013).

En 2008 en el laboratorio, continuando con el estudio de la utilización de una solución rica en sales de zinc y manganeso obtenida a partir de un proceso de reciclado de pilas como conservador para madera (Ibáñez *et al.* 2008), inicia un ensayo de campo de acuerdo a la norma EN 252. Para ello madera de *Pinus taeda* fue tratada en una primera etapa con dicha solución mediante tratamiento con presión (Bethell). Luego esta madera fue sometida a un segundo tratamiento con sales de boro para formar borato de zinc. La aplicación de las sales de boro se hizo tanto a presión como mediante un proceso sin presión como el pincelado, para reducir costos en futuros procesos industriales, a los efectos de comparar efectividades (Ibáñez *et al.* 2012). Este trabajo presenta el análisis y la evolución del proceso de deterioro de la madera de *Pinus taeda* sometida al mencionado tratamiento en etapas, luego de cinco años de ensayo de campo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Madera a ensayar (selección, acondicionamiento e impregnación)

Se usaron probetas de distintos árboles del mismo rodal coetáneo y monoespecífico, de (500 ± 1) mm x $(50 \pm 0,3)$ mm x $(25 \pm 0,3)$ mm de *Pinus taeda* L. Se seleccionaron para el ensayo 91 probetas con densidades dentro del rango de la media $0,47 \pm 15\%$, de acuerdo a la norma EN 252 (1989). Se secaron hasta un contenido de humedad de $14\% \pm 2\%$.

De las 91 probetas seleccionadas, diez se usaron como testigos sin tratamiento del ensayo de campo y veintiuna fueron tratadas con el protector alternativo de referencia utilizado que fue CCA (óxidos de cobre, cromo y arsénico) a dos niveles de retención: diez probetas fueron tratadas a una retención de 8 kg m^{-3} y 11 probetas a una retención de 12 kg m^{-3} de preservante (CCA).

Las sesenta probetas restantes se impregnaron con la solución obtenida del reciclado en estudio, a cuatro concentraciones: 0,8; 1,5; 3 y 6% de Zn (15 probetas por nivel de concentración en Zn de solución). La impregnación se realizó por el método Bethell (30 min. de vacío inicial, 60 min. a 10 kg cm^{-2} de presión, 30 min. de vacío final) en un cilindro de impregnación de laboratorio de un metro de largo.

La solución obtenida del proceso de reciclado de pilas (pH 2) contenía sulfatos metálicos en las siguientes concentraciones: Zn^{2+} a 32 g L^{-1} , Mn^{2+} a 15 g L^{-1} , Cd^{2+} a $0,5 \text{ mg L}^{-1}$, Pb^{2+} a $0,63 \text{ mg L}^{-1}$, Hg^{2+} a $0,7 \text{ mg L}^{-1}$, Cu^{2+} a 34 mg L^{-1} , Ni^{2+} a 38 mg L^{-1} y Cr^{3+} a 2 mg L^{-1} . La reducción en el contenido de los metales pesados que acompañan al Zn y al Mn a niveles de mg L^{-1} como los que aporta cualquier fertilizante aceptado (EPA 1999), se logra mediante un proceso de cementación con Zn (Noubactep 2010). La máxima concentración de la solución que se logra a partir del proceso de reciclado es del 3% en Zn, por lo cual para lograr la concentración del 6% en Zn (3% en Mn) se agregaron sales comerciales (Perrin SA, Uruguay) en la misma proporción.

Las 15 probetas tratadas correspondientes a cada concentración de la solución en estudio, se dividieron en tres grupos: 5 quedaron tratadas solo con la solución del reciclado sin segundo tratamiento, 10 fueron tratadas con bórax al 2% como segundo tratamiento, aplicado mediante dos procedimientos: 5 probetas tratadas por pincelado y 5 por vacío presión vacío.

La Tabla 1 contiene la denominación de cada ensayo, su descripción y la retención alcanzada en la madera luego del primer tratamiento con la solución del reciclado.

Instalación del ensayo

El cementerio de estacas se estableció en el Centro Regional Sur de la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República ($34^{\circ}36'43''$ S, $56^{\circ}13'06,14''$ O), en un suelo que en la clasificación del USDA corresponde a un: Mixture, Termic, Active, Fine Tipic Argiudol, en agosto de 2008. Las probetas se colocaron en el campo al azar, enterradas 25 cm en dos filas de 30 probetas y una de 31, separadas 50 cm entre filas y entre probetas.

Tabla 1. Denominación y descripción de los tratamientos del ensayo.

Denominación	Tratamiento	Retención kg.m ⁻³
A1	0,8%Zn	1,17
A2	0,8%Zn+Bpinc	1,17
A3	0,8%Zn+Bvpv	1,17
B1	1,5%Zn	2,91
B2	1,5%Zn+Bpinc	2,91
B3	1,5%+Bvpv	2,91
C1	3%Zn	7,37
C2	3%Zn+Bpinc	7,37
C3	3%Zn+Bvpv	7,37
D1	6%Zn	21,22
D2	6%Zn+Bpinc	21,22
D3	6%Zn+Bvpv	21,22
E	Blanco	0
F	CCA 8 kgm ⁻³	8
G	CCA 12 kgm ⁻³	12

Evaluaciones del ensayo

En las sucesivas inspecciones de campo se evaluó deterioro, dureza superficial y resistencia por compresión manual, en busca de podredumbre blanda. Se tomaron finas muestras de madera con deterioro para observar al microscopio óptico.

Se utilizó una escala de calificación visual del grado de deterioro que se muestra en la Tabla 2, a la cual se agregó el índice de deterioro (Larsson-Brelid *et al.* 2011). Se determinó el tiempo medio de vida de las estacas, que es aquel cuando se rompen todas las estacas del mismo grupo de retención de Zn (todas con índice de deterioro 100).

Las sucesivas evaluaciones se realizaron anualmente de mayo de 2009 hasta 2013. Se contó además con los registros meteorológicos diarios del sitio del ensayo de temperatura, precipitaciones y humedad relativa del aire desde enero 2007 al 2013, facilitados por la Dirección de Climatología y Documentación del Instituto Uruguayo de Meteorología (InuMet).

Tabla 2. Escala de calificación del deterioro de probetas.

CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN	ÍNDICE DE DETERIORO
0	Sin ataque, madera sana	0
1	Ataque ligero	25
2	Ataque moderado	50
3	Ataque severo	75
4	Ruptura	100

Análisis estadístico

Se analizó la media de la escala, ponderada por el número de repeticiones en que cada valor fue observado utilizando un modelo lineal en el cual la única variable independiente fue el tratamiento; este análisis produce estimaciones de las medias y pruebas de Chi-cuadrado mediante el uso de mínimos cuadrados generalizados, sin hacer ningún tipo de supuesto distribucional. Se probó la hipótesis nula:

la media del tratamiento es igual a la media general y la hipótesis alterna: la media del tratamiento es diferente (mayor o menor) que la media general.

Para el análisis a lo largo del tiempo, se aplicó un modelo de regresión lineal simple, para estimar la tasa de cambio en el tiempo (pendiente de la recta estimada) de los promedios de la escala ponderados por la proporción de veces que cada valor aparece.

En el primer análisis se utilizó el procedimiento CATMOD (Categorical Modeling) y en el segundo el procedimiento GLM del Sistema de Análisis Estadístico SAS (Statistical Analysis System, Institute 2007).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 3 muestra la calificación de las estacas, luego de cinco años de permanecer enterradas en el ensayo de campo (calificaciones anteriores se encuentran en Ibañez *et al.* 2012). Se puede observar que solo las probetas control sin tratamiento quebraron en su totalidad durante este período. De la solución y los tratamientos en estudio solo D3 (6% en Zn + B vpv) y C3 (3% en Zn + B vpv) conservan dos de las cinco probetas totalmente sanas con calificación cero, mientras que aquellas a la mayor retención con CCA (12 kg.m⁻³), conservan 8 de 11 con calificación cero.

Tabla 3. Calificación obtenida por las probetas luego de cinco años de ensayo de campo.

Trat/Calif	0	1	2	3	4
A1	0	0	0	1	4
A2	0	1	1	1	2
A3	0	1	2	2	0
B1	0	1	0	2	2
B2	0	0	0	3	2
B3	0	0	0	2	3
C1	0	1	1	2	1
C2	0	0	2	2	1
C3	2	1	0	1	1
D1	0	0	1	2	2
D2	0	0	1	1	3
D3	2	0	1	0	2
E	0	0	0	0	10
F	5	2	1	0	2
G	8	3	0	0	0

En la Tabla 4 se comparan estadísticamente las distintas evaluaciones realizadas a lo largo de los cinco años de ensayo de campo y se presentan los promedios de cada evaluación y los resultados de las pruebas chi cuadrado. La escala ordinal utilizada califica con un mayor puntaje el peor desempeño, por ello en el análisis, las medias de los puntajes obtenidos son mayores cuando el tratamiento tuvo peor desempeño.

Se observa que en la primera evaluación no aparecieron evidencias de deterioro en ningún grupo de tratamientos. Los tratamientos con el protector alternativo de referencia (F y G) siempre estuvieron estadísticamente por debajo del promedio, siempre tuvieron mejor desempeño que las mezclas de prueba. Los testigos sin tratamiento (E) estuvieron significativamente por encima del promedio en las últimas cuatro evaluaciones. El tratamiento al 6% en Zn + B vpv (D3), estuvo significativamente por debajo del promedio de la segunda a la cuarta evaluación. En la última evaluación 0,8% Zn (A1); 1,5% Zn + B pinc (B2); 1,5% Zn + B vpv (B3), 6% Zn (D1) y 6% Zn + B pinc (D2) fueron los tratamientos de peor desempeño en términos estadísticos.

Tabla 4. Medias en cada evaluación para cada tratamiento y significancia por año.

	2009	2010		2011		2012		2013	
Trat	Eval 1	Eval 2	α	Eval 3	α	Eval 4	α	Eval 5	α
A1	0	1,000		1,200		2,200	*	3,800	**
A2	0	0,400		0,600		1,000		2,800	
A3	0	0,400		0,400		0,600		2,200	
B1	0	0,800		1,000		1,800		3,000	
B2	0	1,200		1,200		1,800		3,400	**
B3	0	0,400		0,400		1,000		3,600	**
C1	0	0,400		0,400		1,400		2,600	
C2	0	1,000		1,000		1,200		2,800	
C3	0	0,000		0,200	**	0,400	*	1,600	
D1	0	0,800		0,800		1,600		3,200	*
D2	0	0,600		0,800		1,400		3,400	*
D3	0	0,200		0,200	**	0,200	**	2,000	
E	0	1,400	*	1,600	**	2,100	*	4,000	
F	0	0,000		0,000		0,000		1,200	**
G	0	0,091	**	0,091	**	0,182	**	0,273	**
Media	0	0,579		0,659		1,125		2,658	

*Significancia para $\alpha = 10\%$.** Significancia para $\alpha = 5\%$

Nota: El tratamiento E no entra en el análisis en la quinta evaluación porque todas sus probetas colapsaron.

Para realizar el análisis estadístico del incremento del deterioro a lo largo del tiempo de ensayo de campo, la Tabla 5 presenta las ecuaciones de regresión lineal ($y = a + b x$, donde $y = \text{score}$ (0 a 5), $x = \text{evaluación}$ (año= 1,2,3,4,5). Ecuaciones con pendiente estadísticamente igual a cero no tienen incremento en el deterioro a lo largo del tiempo, pendientes estadísticamente mayores a cero tienen incrementos del deterioro mayores a medida que se alejan de cero, en términos estadísticos.

Se observa en la Tabla 5 que los tratamientos con el protector alternativo de referencia (F y G) tienen una pendiente estadísticamente igual a cero, al igual que los tratamientos al 3% Zn + B vpv (C3) y al 6% Zn + B vpv (D3) que no son significativos para $P \leq 0,05$. Los demás tienen un incremento estadísticamente significativo ($P \leq 0,05$) a través de las evaluaciones. El mayor incremento se observa entre la cuarta y última evaluaciones.

Tabla 5. Análisis a lo largo del tiempo, ecuaciones de regresión lineal y su significancia.

Trat	Intercepto	EE	Pendiente	EE	Pr > t		Media(1)
A1	-1,000	0,5334	0,880	0,1608	<0,0001	**	2,050
A2	-0,900	0,5334	0,620	0,1608	0,0004	**	1,200
A3	-0,660	0,5334	0,460	0,1608	0,0064	**	0,900
B1	-0,780	0,5334	0,700	0,1608	<0,0001	**	1,650
B2	-0,700	0,5334	0,740	0,1608	<0,0001	**	1,900
B3	-1,260	0,5334	0,780	0,1608	<0,0001	**	1,350
C1	-0,900	0,5334	0,620	0,1608	0,0004	**	1,200
C2	-0,540	0,5334	0,580	0,1608	0,0008	**	1,500
C3	-0,640	0,5334	0,360	0,1608	0,0302	*	0,550
D1	-0,880	0,5334	0,720	0,1608	<0,0001	**	1,600
D2	-1,040	0,5334	0,760	0,1608	<0,0001	**	1,550
D3	-0,680	0,5334	0,400	0,1608	0,0166	*	0,650
E	-0,790	0,5334	0,870	0,1608	<0,0001	**	2,275
F	-0,480	0,5334	0,240	0,1608	0,1426	ns	0,300
G	-0,064	0,5334	0,064	0,1608	0,6942	ns	0,159

**Significancia para $\alpha = 5\%$

*Significancia para $\alpha = 10\%$.

(1) media calculada en las evaluaciones 2 a 5 (años 2010 a 2013)

EE: error estándar

El índice de deterioro promedio obtenido de la evaluación anual como función del tiempo (Larsson-Brelid *et al.* 2011), muestra gráficamente los resultados anteriormente analizados. La Figura 1, presenta el comportamiento de las estacas tratadas con el preservante de referencia (CCA) a dos retenciones distintas junto a los controles sin tratamiento (E); se observa que el desempeño de los tratamientos con el protector de referencia fue muy bueno en todo el periodo. El tiempo de vida promedio de los controles sin tratamiento fue de 5 años lo que evidencia la poco eficiente actividad microbiológica del sitio del ensayo. No se cuenta con datos de durabilidad natural de *Pinus taeda* en Uruguay, mientras que en bibliografía Scheffer y Morrell (1998) informan una durabilidad promedio de 3 a 4 años para *P. taeda* y Jankowsky y Takeshita (2012) reportan cuatro especies de pino (ninguna *P. taeda*) con un promedio de vida de un año.

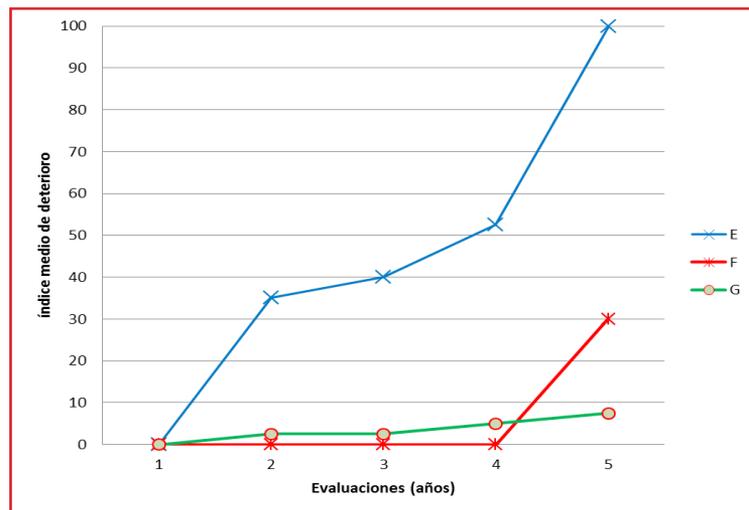


Figura 1. Índice medio de deterioro para las probetas tratadas con el preservante de referencia (CCA) a dos retenciones y probetas sin tratamiento (controles).

Si bien el tiempo de servicio de la madera enterrada a la intemperie está influenciado por numerosos factores, el clima específico del sitio juega un rol importante (Brischke y Rapp 2008). Esto permite emplear el índice climático de Scheffer como método de evaluación del riesgo microbiológico que presenta el sitio del ensayo. Dicho índice correlaciona los datos climáticos con el peligro de deterioro a través de la fórmula:

$$\text{Índice climático} = \Sigma[(T-2)(D-3)] / 16,7$$

Donde T es la temperatura media diaria del mes (°C) y D es el número medio de días con más de 0,25 mm de lluvia por mes.

El peligro de deterioro aumenta con el índice; un índice menor a 35 indica las condiciones menos favorables al deterioro; entre 30 y 65 condiciones intermedias y mayor a 65 son las más favorables al deterioro (Scheffer 1971).

A partir de los datos meteorológicos, la Tabla 6 muestra los índices climáticos anuales para la zona del ensayo en estudio. Se puede observar que nunca alcanza el valor de 65, a pesar de que debería considerarse un incremento a los valores de la Tabla debido a que el índice está diseñado para madera encima del suelo y que madera enterrada conserva agua entre períodos de lluvia lo que aumenta el riesgo de deterioro (Scheffer 1971). Por lo tanto el ensayo ha estado expuesto a condiciones intermedias para el deterioro, lo que coincide con la lenta degradación de los controles.

Tabla 6. Índices climáticos anuales de Scheffer para el sitio donde se encuentra el ensayo de campo en estudio.

Año	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Índice climático	63,4	35,3	47,1	38,0	32,3	54,5	26,4

En la Figura 2 se comparan los índices de deterioro de los tratamientos ensayados; puede observarse que los tratamientos al 3% en Zn + B vpv (C3) y al 6% en Zn + B vpv (D3) son los de mejor desempeño de los evaluados, mientras que A1, B2, B3, D1 y D2 presentan los peores desempeños.

Se puede observar (Figura 2) la fase lag de aproximadamente un año en casi todos los tratamientos, a excepción de C3 donde dura dos años. Luego las velocidades de deterioro se incrementan, salvo en D3 que permanece sin avance del deterioro hasta la cuarta evaluación. La presencia de la fase lag puede responder a características del suelo y condiciones climáticas del sitio del ensayo, pero el comportamiento diferente de C3 y D3 responde a la mayor eficacia del tratamiento, única variable involucrada.

También se observa que las mayores concentraciones de zinc responden mejor al tratamiento antilixiviante con boro aplicado por v-p-v (vacío - presión - vacío). Sin embargo como los tratamientos C3 y D3 no presentan diferencias estadísticamente significativas, se deduce que un incremento en un 3% el contenido de zinc, aumentaría los costos del tratamiento sin que se traduzca en una mejora del desempeño.

Para las probetas tratadas no se pudo determinar el tiempo de vida ya que no quebraron todas las sometidas a un mismo tratamiento durante los cinco años de ensayo, condición necesaria para poder determinar el tiempo de vida.

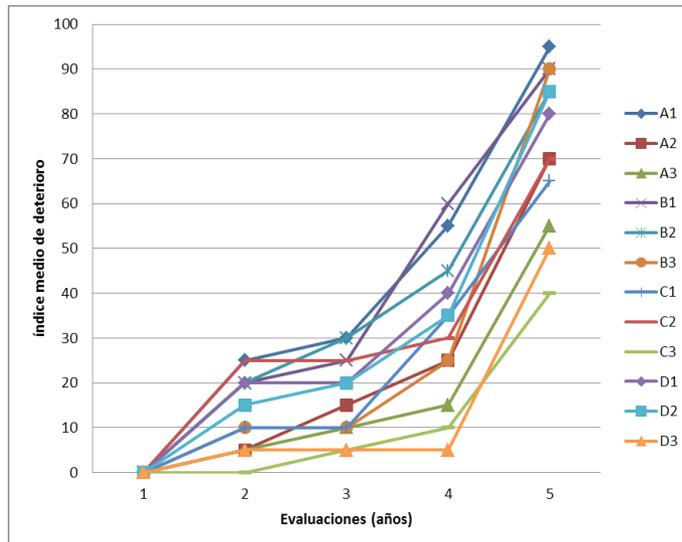


Figura 2. Índice medio de deterioro para las probetas tratadas con los diferentes sistemas de preservación ensayados.

Por último se realizó un análisis microscópico de la madera, para verificar el tipo de deterioro presente. Si bien se ha dado una sucesión de especies fúngicas a lo largo del proceso de deterioro (Räberg *et al.* 2013) en el presente trabajo solo observamos los daños producidos por las especies que prevalecen en esa secuencia al cabo de cinco años de ensayo. Se observó la presencia de los tres tipos de pudrición, blanca, marrón y blanda, que se evidenciaron tanto en controles sin tratamiento como en maderas tratadas. En estas últimas, el deterioro casi no se percibió macroscópicamente en la mayoría de los casos.

También se observó ataque por insectos, que fueron identificados como termites en un control sin tratamiento, una probeta tratada con CCA a 12 kg m^{-3} y una probeta tratada con 6% de Zn y bórax por pincelado; esta última tuvo que ser retirada del ensayo porque se partió.

En este trabajo se evidencia la necesidad de un segundo tratamiento para evitar la lixiviación de las sales de zinc aplicadas por vacío-presión-vacío independientemente de la retención alcanzada, ya que los tratamientos A1, B1, C1 y D1, se deterioraron a una velocidad análoga a los controles sin tratar. Al mismo tiempo el segundo tratamiento por pincelado (A2, B2, C2 y D2) no otorga protección porque la reacción entre los compuestos aplicados se da solo en una fina capa superficial en la madera. El resultado de los segundos tratamientos vacío-presión-vacío a las mayores concentraciones de Zn luego de cinco años de ensayo, es prometedor y muestra que es efectivo el tratamiento en etapas. Sin embargo no se puede predecir un comportamiento a largo plazo porque los sistemas (madera-preservante) dan dinámicas y patrones de degradación distintos frente a tratamientos diferentes, que son a la vez influenciados por los hongos del suelo a los que están expuestos (Larsson-Brelid *et al.* 2011). La degradación biológica es solo un factor cuando se analiza el desempeño de la madera tratada, es información que debe integrarse al envejecimiento, degradación UV, formación de grietas a la hora de aplicar uno de los varios modelos que existen que permita predecir el comportamiento de la madera tratada (Brischke y Thelandersson 2014). En las probetas del ensayo no se observaron daños por radiación ni grietas, en ninguno de los tratamientos en estudio.

Si bien el proceso de reciclado de pilas es viable y sustentable, tanto técnica como económicamente, al mismo tiempo que la solución obtenida del mismo tiene potencial como conservador de madera (Ibañez *et al.* 2011), este estudio permite retomar el uso de Zn en madera. En consecuencia es necesario avanzar hacia la formación de borato de zinc *in situ*, en profundidad en la madera, sin aplicar presión o incrementar la temperatura del tratamiento, lo que se traduce en un proceso que no incrementa su costo

frente al tradicional proceso Bethell.

CONCLUSIONES

Un incremento en la concentración de Zn durante el primer tratamiento (de 3% a 6%) no mejoraría la durabilidad de la madera.

Los tratamientos solo con la solución de sales de zinc, así como aquellos que aplican boro como segundo tratamiento por pincelado, no protegen la madera en contacto con suelo.

Los segundos tratamientos que aplican boro por vacío-presión-vacío son adecuados para madera a la intemperie en contacto con suelo, a pesar de que no son tan efectivos como el CCA.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a ISUSA, Industrias Sulfúricas del Uruguay, y a la Comisión Sectorial de Investigación Científica UdelaR, por el apoyo económico que ha permitido llevar a delante esta investigación.

Al Centro Regional Sur de Facultad de Agronomía, UDELAR (Universidad de la República) por el lugar de instalación del ensayo.

Al Instituto Nacional de Meteorología de Uruguay, por la información brindada.

REFERENCIAS

AWPA Book of Standards 2014. American Wood Preservers' Association, Granbury, Texas.

Baditrala, A.; Hashemi, S.; Kord, B.; Zabihsadeh, S.; Safdari, V. 2013. Morphology and mechanical properties of zinc borate-pretreated poplar wood flour/plastic composite. *BioResources* 8(1): 913-922.

Brischke, C.; Rapp, A. 2008. Dose- response relationship between wood moisture content, wood temperature and fungal decay determined for 23 European field test sites. *Wood Sci Technol* 42: 507-518.

Brischke, C.; Thelandersson, S. 2014. Modelling the outdoor performance of wood products – A review on existing approaches. *Construction and Building Materials* 66: 384 – 397.

Dev, I.; Bagga, JK, Kumar, S. 1997. Termite resistance and permanency test on zinc borate an environmental friendly preservative. *J Timb Dev Assoc India* 42(2): 10-15.

Environmental Protection Agency (EPA). 1999. Background report on fertilizer use, contaminants and regulations. US Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA. EPA 747- R-98-003.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION. 1989. Field test method for determining the relative protective effectiveness of a wood preservative in ground contact. EN 252 AC1:1989, Brussels, Belgium.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION. 2006. Durability of wood and wood-based products. definition of hazard classes of biological attack. part 2: Application to solid wood. UNE EN 335-2: 1994. Brussels, Belgium.

Eaton, R.A.; Hale, M.D.C. 1993. *Wood. Decay, pests and protection.* Chapman & Hall 1st ed. London; New York.

Freeman, M.H.; McIntyre C.R.; Jackson, R.E. 2009. “A Critical and Comprehensive Review of Boron in Wood Preservation,” Proceedings American Wood Protection Association, 105:279-294.

Furuno, T.; Lin, L.; Katoh, S. 2003. Leachability, decay, and termite resistance of wood treated with metaborates. *J Wood Sci* 49: 344-348.

Ibañez C.; Rabinovich M.; Kartal N.; Mantero C.; Cerdeira M. 2008. Preservantes alternativos para madera obtenidos en un proceso de reciclado. *Revista Forestal Latinoamericana* 23(1):91-102.

Ibañez, C.; Mantero, C.; Silva, L.; Rabinovich, M.; Cecchetto, G.; Cerdeiras, M. 2011. Wood preservative properties of Zn and Mn containing solution obtained by battery recycling process. *International Wood Products Journal* 2 (2): 81-88.

Ibañez, C.; Mantero, C.; Silva, L.; Rabinovich, M.; Escudero, R.; Franco, J. 2012. Preservación de madera tratada con Zn y Mn y efectividad del tratamiento antilixiviante con bórax. *Maderas-Cienc Tecnol* 14(2): 165-174.

Jankowsky, I.; Takeshita, S. 2012. Effectiveness of CCA-C and CCB preservatives after 30 years stake test. International Research Group on Wood Protection. Estoril; Portugal. 8- 13 July 2006.

Kirkpatrick, J.; Barnes, H. 2006. Biocide treatments for wood composites- A review. International Research Group on Wood Protection. Tromso; Norway. 18- 22 June 2006.

Köse, C.; Terzi, E.; Kartal, S. N.; Erilkun, B.; Imamura, Y. 2011. Preliminary evaluation of boron release and biological resistance of wood treated with disodium octoborate tetrahydrate (DOT) and a water-repellent compound. *African Journal of Biotechnology* 10(10):1833-1839.

Laks, P.; Manning, M. 1995. Preservation of wood composites with zinc borate. IRG/WP 95-30074. International Research Group on Wood Protection. Helsingør; Denmark. 11- 16 May. 1997.

Laks, P.; Manning, M. 1997. Mobility of zinc borate wood composite preservative. IRG/WP97 – 30153. International Research Group on Wood Protection. Whistler, British Columbia, Canada. 25-30, May. 1997.

Larsson-Brelid, P.; Brischke, C.; Rapp, A.; Hansson, M.; Westin, M.; Jermer, J.; Pilgard, A. 2011. Methods of field data evaluation- time versus reliability. International Research Group on Wood Protection. Queenstown, New Zealand. 8-12, May. 2011.

Lloyd, J.D.; Dickinson, D.J.; Murphy, R.J. 1990. The probable mechanism of action of boric acid and borates as wood preservatives. IRG/WP 1450. International Research Group on Wood Protection. Rotorua, New Zealand. 13-18, May. 1990.

Lloyd, J.D. 1998. Borates and their biological applications. IRG/WP 98-30178. International Research Group on Wood Protection. Maastricht, The Low Countries. 14-19, June. 1998.

Noubactep, C. 2010. Elemental metals for environmental remediation: Learning from cementation process. *Journal of Hazardous Materials* 181: 1170–1174.

Räberg, U.; Terziev, N.; Daniel, D. 2013. Characterization of Test Fields. IRG/WP/13-20508. International Research Group on Wood Protection, Stockholm.

Rainer, J.B. 1993. Borates as wood preservatives - an environmental, health and safety perspective. IRG/WP 93-50001-03. International Research Group on Wood Protection. Cannes, Francia.

Rayner, A.; Boddy, L. 1988. *Fungal decomposition of Wood- Its biology and Ecology*. John Wiley & Sons, Chichester.

Rawat, M.; Tripathi, S.; Pant, H. 2015. Laboratory evaluation of ZIBOC and CCA as an antisapstain on *Populus deltoides*. *Journal of Eco-friendly Agriculture* 10(1):82-86.

SAS INSTITUTE INC. 2007. SAS Online Doc® 9.2. Cary, North Carolina, USA.

Scheffer, T.C. 1971. A Climate Index for Estimating Potential for Decay in Wooden Structures Above Ground. *Forest Products Journal* 21(10): 25-31.

Scheffer, T.C.; Morrell, J.J. 1998. Natural durability of wood: a worldwide checklist of species. Forest Research Laboratory, Oregon State University. Research Contribution 22. 58 p.

Tripathi, S.; Poonia, P.K. 2015. Treatability of *Melia composite* using vacuum pressure impregnation. *Maderas-Cienc Tecnol* 17(2): 373- 384.

Yildiz, U.; Dizman, E.2010. Combined effect of boric acid and waste oil treatment on boron leaching. IRG/WP 10-50268. International Research Group on Wood Protection. Biarritz, Francia.