

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

EFFECTIVIDAD DEL BORATO DE ZINC AMONIACAL CONTRA  
*Anobium punctatum* (COLEÓPTERA: ANOBIIDAE)

por

Guillermo KATZENSTEIN ALONSO

TESIS presentada como uno de  
los requisitos para obtener el  
título de Ingeniero Agrónomo

MONTEVIDEO

URUGUAY

2015

Tesis aprobada por:

Director:

-----  
Dr. Martín Bollazzi

-----  
Dra. Claudia M. Ibáñez

-----  
Ing. Agr. Carlos Mantero

Fecha:

8 de diciembre de 2015

Autor:

-----  
Bach. Guillermo Katzenstein Alonso

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a mis tutores, la Dra. Marcela Ibáñez y al Dr. Martín Bollazzi, por la dedicación, el interés y la orientación que me brindaron en todo momento para la elaboración de la presente tesis de grado.

También debo mencionar a Valentina Benítez y Antonio quienes me brindaron ayuda en cuanto a la parte experimental del ensayo.

Agradezco especialmente a mis padres, pilares fundamentales en mi formación como persona de bien, a mi querida abuela, que siempre está presente, a mi hermano y a mis amigos quienes son parte fundamental de mi vida.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
1.1. OBJETIVOS.....	4
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> .....	5
2.1. INSECTOS QUE ATACAN LA MADERA.....	5
2.1.1. <u>Morfología</u> .....	5
2.1.2. <u>Ciclo de vida de los insectos</u> .....	5
2.1.3. <u>Fisiología</u> .....	7
2.1.4. <u>Relación entre insectos y microorganismos</u> .....	9
2.1.5. <u>Estadísticas de plagas a nivel mundial</u> .....	10
2.1.5.1. Escarabajos en madera seca.....	10
2.1.5.2. Termitas presentes en edificios y en maderas expuestas al exterior.....	11
2.1.6. <u>Orden Coleóptera</u> .....	11
2.1.6.1. Anobiidae.....	12
2.1.6.2. Lyctidae.....	16
2.1.6.3. Bostrychidae.....	17
2.1.6.4. Cerambycidae.....	18
2.1.7. <u>Orden Isóptera</u> .....	21
2.2. LA MADERA Y SU UTILIZACIÓN POR LOS ORGANISMOS XILÓFAGOS.....	23
2.2.1. <u>Características químicas de la madera</u> .....	23
2.2.1.1. La celulosa.....	23
2.2.1.2. La hemicelulosa.....	24
2.2.1.3. La lignina.....	24
2.2.1.4. Componentes secundarios.....	24
2.2.2. <u>El ataque de la madera por los insectos</u> .....	25
2.2.2.1. El ataque de la celulosa.....	25
2.2.2.2. El ataque de la lignina.....	26
2.2.2.3. El ataque de las hemicelulosas	

y otros constituyentes de la madera.....	26
2.3. MÉTODOS DE CONTROL.....	28
2.3.1. <u>Barreras físicas</u> .....	28
2.3.2. <u>Prevención versus tratamiento paliativo</u> .....	29
2.3.3. <u>Modificación térmica y química de la madera</u> .....	30
2.3.4. <u>Preservantes químicos</u> .....	31
2.3.4.1. Preservantes oleosolubles.....	31
2.3.4.2. Preservantes oleosos.....	32
2.3.4.3. Preservantes hidrosolubles.....	34
2.4 TOXICIDAD DEL COBRE-CROMO-ARSÉNICO (CCA).....	39
2.4.1. <u>Lixiviación</u> .....	40
2.4.2. <u>Normativa de calidad de impregnación y restricciones en el uso de madera tratada</u> .....	41
2.4.3. <u>Disposición final de madera tratada con CCA</u> .....	41
2.4.4. <u>Situación en Uruguay</u> .....	42
2.4.5. <u>Alternativas para la disposición de madera tratada con CCA</u> .....	42
2.4.6. <u>Tecnologías alternativas al tratamiento de biocidas químicos</u> .....	43
2.5 HIPÓTESIS.....	44
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	45
3.1. IMPREGNACIÓN.....	45
3.2. CRÍA E INOCULACIÓN DE <i>Anobium punctatum</i> .....	46
3.3. EXAMEN DE LAS PROBETAS.....	49
3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	50
4. <u>RESULTADOS</u> .....	52
5. <u>DISCUSIÓN</u> .....	60
6. <u>CONCLUSIONES</u> .....	63
7. <u>RESUMEN</u> .....	64
8. <u>SUMMARY</u> .....	65

9. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	66
10. <u>ANEXOS</u> .....	69

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Requerimientos de humedad de larvas.....	12
2. Efecto de la temperatura en el desarrollo y la muerte de larvas.....	12
3. Complejo enzimático de algunas especies de coleópteros xilófagos xilófagos.....	27
 Figura No.	
1. Adulto de <i>Anobium punctatum</i> .....	14
2. Larva de <i>Anobium punctatum</i> .....	14
3. Adulto de <i>Lyctus brunneus</i> .....	16
4. Adulto de <i>Hylotrupes bajulus</i> .....	19
5. Obrera de <i>Reticulitermes flavipes</i> .....	22
6. Soldado de <i>Reticulitermes flavipes</i> .....	22
7. Autoclave de vacío-presión.....	46
8. Probetas perforadas.....	48
9. Probetas selladas con parafina.....	48
10. Probetas inoculadas en frascos.....	49
11. Probetas cortadas con formón y martillo.....	50
12. Porcentaje de larvas vivas y muertas de <i>Anobium punctatum</i> en probetas de álamo, en función de las diferentes formas de aplicación del borato de zinc amoniacal.....	52
13. Porcentaje de larvas vivas y muertas de <i>Anobium punctatum</i> en probetas de pino, en función de las diferentes formas de aplicación del borato de zinc amoniacal.....	53
14. Avance promedio de larvas vivas y muertas de <i>Anobium punctatum</i> en probetas de álamo, en función de los diferentes métodos de aplicación del borato de zinc amoniacal.....	54
15. Avance promedio de larvas vivas y muertas de <i>Anobium punctatum</i> en probetas de pino, en función de los diferentes métodos de aplicación del borato de zinc amoniacal.....	55
16. Avance promedio de larvas vivas de <i>Anobium punctatum</i> en probetas de álamo, en función de los diferentes métodos de aplicación del borato de zinc amoniacal.....	56
17. Avance promedio de larvas vivas de <i>Anobium punctatum</i> en	

probetas de pino, en función de los diferentes métodos de aplicación del borato de zinc amoniacal.....	57
18. Avance promedio de larvas muertas de <i>Anobium punctatum</i> en probetas de álamo, en función de los diferentes métodos de aplicación del borato de zinc amoniacal.....	58
19. Avance promedio de larvas muertas de <i>Anobium punctatum</i> en probetas de pino, en función de los diferentes métodos de aplicación del borato de zinc amoniacal.....	59

## 1. INTRODUCCIÓN

Los insectos son la plaga de mayor importancia económica en la destrucción de madera. Los xilófagos más comunes pertenecen a los órdenes Coleóptera e Isóptera (termitas).

En la mayoría de los insectos xilófagos, el estado larvario ocupa la mayor parte del ciclo de vida, donde el huevo y la etapa pupal duran solamente unas pocas semanas y el adulto generalmente muere poco tiempo después de la reproducción (Unger et al., 2001). El principal daño a la madera es causado por la alimentación de las larvas.

El desarrollo fisiológico de las larvas está esencialmente controlado por tres factores, nutrientes, contenido de humedad, y temperatura.

La digestión de los insectos, la asimilación de la madera y la nutrición es asistida muchas veces por microorganismos.

La identificación exacta de las especies individuales de insectos requiere de la examinación de los adultos o de las larvas (Florian, citado por Unger et al., 2001). La forma, el tamaño, y la condición de los orificios de emergencia en la superficie de la madera y la localización, el curso de las galerías, normalmente hacen posible limitar el número de especies que pueden ser responsables del daño. Además las marcas del masticado en las paredes de las galerías, el color, la forma, y el tamaño de las heces y el aserrín pueden ser un indicativo del tipo de insecto involucrado.

Los escarabajos más comunes que atacan la madera pertenecen a las familias Anobiidae, Lyctidae y Cerambycidae (Unger et al., 2001).

*Anobium punctatum* ataca tanto coníferas como latifoliadas, produce daños principalmente en albura pero también en duramen. La madera debe estar seca, produce un aserrín granular grueso, y la forma de los orificios de emergencia son circulares de 3mm de diámetro. Esta especie al igual que *Hylotrupes bajulus* y *Lyctus brunneus* tiene la capacidad de reinfestar la madera.

*Hylotrupes bajulus* ataca principalmente coníferas, y se alimenta de la albura. La madera debe estar en proceso de secado o seca, el tipo de aserrín que dejan es granular fino a largas fibras, y los orificios de emergencia tienen forma oval de 6 a 10mm de diámetro.

*Lyctus brunneus* ataca latifoliadas, solamente la albura. La madera debe estar recientemente estacionada, el tipo de aserrín es fino y suave al tacto, los orificios de emergencia son de forma circular u oval de 0.5 a 2mm de diámetro.

Para incrementar la vida útil de la madera frente al ataque de insectos, hongos y bacterias, existen diversos métodos de control, como las barreras físicas, la modificación térmica y química de la madera, así como los preservantes químicos.

Las diferentes formas de impregnación con preservantes químicos en solución Incluyen los métodos que no utilizan presión ni vacío como pincelado, inmersión, y los métodos a presión y/o vacío: doble vacío, y vacío-presión-vacío.

En Uruguay el CCA es el preservante químico (hidrosoluble) más utilizado a nivel industrial, es muy efectivo contra hongos, insectos y perforadores marinos. El inconveniente está dado por su alta toxicidad, y la dificultad de su sustitución por razones económicas ha conducido a las autoridades ambientales a promover el uso de las buenas prácticas para minimizar los posibles impactos negativos sobre el ambiente y las personas (Dieste, 2014).

El cromo y el arsénico son tóxicos y cancerígenos (Wagenführ y Scholz, citados por Dieste, 2014). Tanto el arsénico como el cromo pueden ser tóxicos para los seres humanos, y los tres metales (cobre, cromo, arsénico) pueden causar un daño ambiental relevante (Fields, 2001). El  $\text{Cr}^{6+}$  es un agente oxidante fuerte, cancerígeno humano y mutagénico (Ibáñez et al., 2009).

La madera tratada, en la que ya ocurrió la reacción de fijación del producto, no presenta riesgos relevantes para los usuarios.

Al tratarse de un material parcialmente biodegradable, aún con el tratamiento químico, es necesario considerarlo como un residuo peligroso, ya que gradualmente se liberará al ambiente cobre, cromo y arsénico (Dieste, 2014). El mayor problema ambiental generado por el uso de madera tratada con CCA es la disposición final de la madera tratada, dividida en dos componentes: 1) los desechos de madera tratada cuando ya terminó su vida útil, denominados residuos de demolición; 2) los residuos de la construcción (aserrín, recortes, viruta, etc.) (Dieste, 2014). El primer grupo es significativamente mayor que el segundo, y es lo que motivó en países que habitualmente utilizan la madera como material constructivo la decisión de prohibir o restringir el uso del CCA (Dieste, 2014).

Wagenführ y Scholz, Ibáñez et al., citados por Dieste (2014) explican que debido a la toxicidad de la madera tratada con CCA, existe una tendencia global creciente a restringir su uso. En algunos países la restricción vigente consiste en una prohibición del uso de CCA, como en Suiza, Dinamarca, Vietnam, Japón e Indonesia, mientras que otros países básicamente lo limitan a aquellos usos en que la madera no estará en contacto con personas o animales: EEUU, Unión Europea, Canadá y Australia (Schreiber et al., citados por Dieste, 2014).

Según la WPA, citada por Dieste (2014) desde 2007 está prohibido el ingreso de madera tratada con CCA a Europa. Asimismo, la utilización de madera tratada con CCA en los procesos de producción de alimentos tiene el riesgo potencial de transformarse en una limitante para la comercialización (Dieste, 2014).

Los productos de CCA ahora están siendo reemplazados por toda Europa y en otras partes del mundo, debido a que las autoridades insisten en su eliminación del mercado y los boratos son el sustituto obvio (Lloyd, 1998). En la búsqueda continua de preservantes de madera más amigables, los boratos también se utilizan en la próxima generación de sistemas de protección exteriores de madera, donde son preferidos antes que otros ingredientes activos menos deseables (Lloyd, 1998).

Los boratos más conocidos son, el ácido bórico y el bórax, los cuales se utilizan como productos comerciales y para la síntesis de otros compuestos de boro (Lloyd, 1998). Especialmente el ácido bórico, el borato de zinc, y el octaborato disódico tetrahidrato, se consideran excelentes opciones para la preservación de la madera contra el ataque de insectos, y la descomposición por hongos y bacterias (Gentz y Grace, 2006).

Los boratos son mucho menos tóxicos que la mayoría de otros compuestos utilizados y los niveles que se pueden utilizar en madera tratada permiten boratos altamente eficaces como preservantes de madera (Lloyd, 1998). Los estudios toxicológicos y ecotoxicológicos demuestran que son mucho menos tóxicos a los mamíferos y al ambiente que la mayoría de los preservantes comunes (Rainer, citado por Ibáñez et al., 2009).

El borato de zinc es de todas las sales de boro la menos soluble en agua; en general es usada en la formulación de los materiales de madera compuestos (tableros, etc) por sus propiedades ignífugas, funguicidas e insecticidas. Esa baja solubilidad en agua ha impedido su uso como conservador de madera sólida, sin embargo, se viene desarrollando un estudio, que consiste en solubilizar el borato de zinc en una solución amoniacal, de

modo que el amoníaco es el *carrier* que lleva la porción solubilizada y el exceso de borato de zinc al interior de la madera, para luego volatilizarse.

### 1.1. OBJETIVOS

Evaluar la efectividad insecticida del borato de zinc amoniacal como preservante de madera frente a *Anobium punctatum* (Coleóptera: Anobiidae).

Evaluar el efecto de los métodos de impregnación, en cuanto a la retención obtenida y la efectividad del borato de zinc amoniacal contra *Anobium punctatum*.

Evaluar el efecto del tipo de madera (pino y álamo), en cuanto a la retención obtenida y la efectividad del borato de zinc amoniacal contra *Anobium punctatum*.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. INSECTOS QUE ATACAN MADERA ELABORADA

Los insectos que atacan madera, conocidos como xilófagos, son la plaga de mayor importancia económica. La madera es utilizada por los insectos como alimento, refugio, y propagación. Los xilófagos más comunes pertenecen a los órdenes Coleóptera (escarabajos) e Isóptera (termitas) (Unger et al., 2001).

#### 2.1.1. Morfología

Todos los insectos tienen una estructura similar. El cuerpo está compuesto por, cabeza, tórax, y abdomen. La cabeza contiene los ojos, mandíbulas, la parte principal del cerebro, y un par de antenas que llevan varios órganos sensoriales (Unger et al., 2001). En los insectos xilófagos las mandíbulas están especialmente adaptadas para taladrar la madera (Eaton y Hale, 1993). El tórax está compuesto por tres segmentos, y cada uno posee un par de patas articuladas. El tórax puede presentar alas o no, y su función es la locomoción. El abdomen consiste en 6 a 11 segmentos articulados y contiene especialmente las partes del sistema reproductivo y digestivo. Las estructuras sensoriales y genitales se encuentran en los últimos segmentos.

Los insectos respiran a través de tráqueas que se extienden a lo largo del cuerpo, y están presentes inclusive en las antenas, patas y alas (Unger et al., 2001). El sistema nervioso de los insectos consiste en la parte principal del cerebro y en el ganglio abdominal ventral (Unger et al., 2001).

#### 2.1.2. Ciclo de vida de los insectos

Un insecto pasa a través de una serie de etapas de desarrollo en la vida, desde el huevo hasta la madurez sexual, el apareamiento y la producción de una generación futura (Eaton y Hale, 1993). A estos cambios se le llama metamorfosis. El largo del ciclo de vida transcurre desde la fecundación hasta la muerte del insecto. En muchos insectos que atacan la madera, sus ciclos de vida pueden extenderse por muchos años (Eaton y Hale, 1993).

En general hay dos tipos de ciclo de desarrollo en insectos: aquellos con metamorfosis incompleta, y aquellos con metamorfosis completa.

En la metamorfosis incompleta el insecto pasa por tres estados de desarrollo (huevo, ninfa, adulto), y es visto en un número menor evolucionado de insectos que habitan la madera, como por ejemplo las termitas (Isóptera)

(Eaton y Hale, 1993). Al principio, la ninfa es diferente del adulto, pero con los siguientes crecimientos y mudas, su forma se va pareciendo a la del adulto. Los insectos que presentan metamorfosis incompleta son denominados hemimetábolos. En la metamorfosis completa el insecto pasa por cuatro etapas de desarrollo (huevo, larva, pupa, adulto), y se ve en los grupos de insectos más evolucionados que habitan la madera como por ejemplo, Coleóptera, Hymenóptera, Lepidóptera (Eaton y Hale, 1993). En la etapa larval, las larvas propiamente dichas, se mantienen gran parte del tiempo alimentándose de madera y pasan por una serie de mudas que les permiten aumentar su tamaño durante el crecimiento. En la etapa pupal, se interrumpe la alimentación, y la larva se va transformando en un adulto. Hay cambios abruptos en la apariencia de los diferentes estados, y los insectos que presentan este tipo de metamorfosis se denominan holometábolos (Eaton y Hale, 1993). En muchos insectos que atacan la madera, el daño es infligido en la etapa larval, aunque en algunas instancias tanto la larva como el adulto destruyen madera (Eaton y Hale, 1993).

Los órganos sensoriales y la emisión de feromonas juegan un papel decisivo en la búsqueda de parejas para el apareamiento (Unger et al., 2001). Las hembras inseminadas ponen sus huevos directamente en superficies de madera o, dependiendo de la especie, en la corteza, en rajaduras, o en antiguas galerías de insectos en la madera mediante el ovipositor. La colocación de los huevos difiere entre especies y puede ser en grupo (Cerambycidae), en filas (Anobidae), o por separado (Siricidae) (Unger et al., 2001). Estos insectos son capaces de discriminar sensorialmente de manera asombrosa, la ubicación donde deben ser depositados los huevos (Unger et al., 2001). Las condiciones materiales como una superficie rugosa, así como ciertos constituyentes de la madera pueden jugar un papel importante en la puesta y colocación de los huevos. Las larvas de muchos de los insectos xilófagos difieren fuertemente de los adultos. Entre los insectos sometidos a una metamorfosis completa, la larva emerge de los huevos y rápidamente perfora la madera desde donde los huevos fueron depositados. Las larvas de los insectos más importantes, tienen forma de gusano u oruga, y la cabeza con sus mandíbulas oscuras se destaca claramente de los segmentos en forma de anillo del tórax y del abdomen. El crecimiento de la larva al estado previo a la pupación, está dado por la repetición de mudas del exoesqueleto (Unger et al., 2001). El principal daño a la madera es causado por la alimentación de las larvas. Apenas antes de la pupación, la larva crea la cámara pupal, en una sección ampliada de la galería (Unger et al., 2001).

La etapa pupal es caracterizada por una etapa de descanso y metamorfosis, la cual debe ser completada para la transformación exitosa de la larva en adulto (Unger et al., 2001). Los adultos emergen de la pupas y

alcanzan su tamaño final unos pocos minutos u horas después de la emergencia. Los insectos adultos posteriormente abandonan la madera. Esta transición deja atrás, orificios de emergencia en la madera característicos de cada especie.

Para la mayoría de los insectos que atacan madera, el estado larvario ocupa la mayor parte del ciclo de vida, donde el huevo y la etapa pupal duran solamente unas pocas semanas y el adulto generalmente muere poco tiempo después de la reproducción (Unger et al., 2001).

### 2.1.3. Fisiología

El desarrollo fisiológico de las larvas de los insectos xilófagos está esencialmente controlado por tres factores, nutrientes, contenido de humedad, y temperatura (Unger et al., 2001).

Estos insectos están equipados con piezas bucales especialmente adaptadas para horadar y masticar materiales sólidos produciendo partículas de tamaño variable según la especie. El tamaño total de los orificios creados por las larvas depende del tamaño de la misma, pero el contenido de material removido por la larva es muchas veces más largo que el área afectada por una simple hifa de un hongo (Eaton y Hale, 1993).

Una vez que los fragmentos de madera son ingeridos, el proceso de digestión y absorción comienza. Para que estos insectos puedan desarrollarse, necesitan asimilar una variedad de nutrientes, principalmente agua, nitrógeno orgánico y una fuente de carbono orgánica (Eaton y Hale, 1993). Aunque los minerales y las vitaminas son requeridos, generalmente no son considerados como limitantes para el crecimiento de los insectos. La digestión y la absorción son llevadas a cabo en el sistema digestivo del insecto.

En general, el intestino del insecto es dividido en tres regiones, el intestino anterior, intestino medio, e intestino posterior. Todos los segmentos del intestino presentan movimientos peristálticos y de batido, los cuales mezclan y mueven las partículas de madera a través del mismo (Eaton y Hale, 1993). El intestino anterior sirve principalmente como almacén de partículas, aunque una reducción en el tamaño de las partículas alimenticias para incrementar la superficie de las mismas sobre las cuales van a actuar las enzimas digestivas, puede ser alcanzado por algunos insectos perforadores de la madera que tienen una alta capacidad digestiva como por ejemplo *Anobium punctatum* (Eaton y Hale, 1993). La adaptación del intestino anterior en un proventrículo ayuda a este proceso. Poco a nada de la digestión y absorción ocurre en la

región del intestino anterior, aunque, alguna digestión puede ocurrir en el buche debido a la regurgitación de jugos del intestino medio (Eaton y Hale, 1993).

La mayor digestión de carbohidratos, proteínas y lípidos ocurre en el intestino medio, aunque algo de la digestión de la celulosa causada por celulasas microbianas ocurre en el intestino posterior en algunos grupos de insectos, particularmente en termitas inferiores (Eaton y Hale, 1993). Las celulasas de insectos se encuentran generalmente en el intestino medio (Eaton y Hale, 1993). La absorción de agua, degradación de polímeros a monómeros (monosacáridos, aminoácidos) y la absorción de triglicéridos ocurre en el intestino medio, aunque alguna absorción también se da en el intestino posterior (Eaton y Hale, 1993).

En general, el contenido de humedad de la madera que permite el desarrollo de muchos insectos que atacan madera puede ser inferior al requerido para el desarrollo de hongos, aunque se debe recordar que una variedad de insectos también infectan madera húmeda (Eaton y Hale, 1993). Un insecto común en madera estructural en varios países de clima templado, *Anobium punctatum* puede sobrevivir en la madera con un contenido de humedad del 12% (Cymorek, citado por Eaton y Hale, 1993), pero su desarrollo larval óptimo ocurre en el punto de saturación de la fibra (Hickin, citado por Eaton y Hale, 1993). *Anobium* aparentemente puede sobrevivir bajo condiciones ocasionales de humedad pero no sobrevive donde la madera está permanentemente llena de agua, por lo tanto altos contenido de humedad en la madera inhiben la actividad de algunos insectos (Eaton y Hale, 1993).

El tejido leñoso puede descomponerse en monómeros de carbohidratos, y puede darse algo de descomposición de lignina también (Eaton y Hale, 1993). Los insectos muestran un amplio rango de habilidades en la descomposición de la madera, desde aquellos que sólo utilizan el almidón dentro de la madera como *Lyctus* indica Parkin, citado por Eaton y Hale (1993), a otros capaces de digerir celulosa, hemicelulosa y también producir un cierto agotamiento de la lignina como *Anobium punctatum* según Baker, citado por Eaton y Hale (1993), aunque la degradación de la lignina nunca es extensa excepto posiblemente en algunas termitas (Butler y Buckerfield, citados por Eaton y Hale, 1993). Entre estos dos extremos hay algunos insectos capaces de degradar contenidos celulares y hemicelulosas como Scolytidae, y otros capaces de usar todos los carbohidratos de la pared celular incluyendo la celulosa como Anobiidae y la mayoría de Cerambycidae (Parkin, citado por Eaton y Hale, 1993).

La preferencia de algunos insectos por determinado tipo de madera está relacionada a su nutrición (Eaton y Hale, 1993). Géneros como *Lyctus*

tienen un rápido desarrollo, pero solo pueden atacar madera rica en almidón mientras que *Anobium* tiene un desarrollo lento, pero es capaz de digerir un amplio rango de especies de madera (Eaton y Hale, 1993).

La temperatura tiene una gran influencia en la vida de los insectos. Cuando la temperatura ambiente está por debajo de ciertos niveles o por encima de otros, las actividades larvales como la alimentación se van a ver suspendidas (Unger et al., 2001). Las temperaturas altas van acompañadas generalmente por una mayor actividad hasta un nivel óptimo, aunque los límites difieren considerablemente entre especies. El pico de adultos es determinado en cierto grado por la temperatura ambiental. Algunos insectos tienen su pico en primavera, otros en verano, e incluso las temperaturas durante un día determinado pueden influir en el comportamiento de los adultos (Unger et al., 2001).

#### 2.1.4. Relación entre insectos y microorganismos

La digestión de los insectos, la asimilación de la madera y la nutrición es asistida muchas veces por microorganismos. Esto incluye la adquisición de enzimas producidas por microbios en el sustrato ingerido, la pre digestión del sustrato por microorganismos previo a la ingestión, el enriquecimiento nutricional en forma de células microbianas y metabolitos, la eliminación y la desintoxicación de extractivos de la madera, microbios que viven en el intestino, la producción y liberación de enzimas, y microorganismos que actúan como descomponedores liberando las principales fuentes de carbono, para la asimilación de los insectos (Eaton y Hale, 1993).

En algunos casos los insectos solamente raspan o raen en los hongos que crecen en la madera en sí (Eaton y Hale, 1993). A cambio de esa ayuda los microorganismos como los hongos pueden tener sus esporas distribuidas por los insectos y ser depositadas en sustratos más favorables, mientras que los protozoos pueden mantenerse en ambientes adecuados (Eaton y Hale, 1993). Únicamente especies como *Hylotrupes*, que convierten grandes cantidades de madera rica en almidón, parecen tener poca o ninguna necesidad de simbiosis microbianas (Eaton y Hale, 1993).

En las larvas de las familias de coleópteros, Bostrychidae (incluyendo Lyctidae), Anobiidae y algún Cerambycidae, unos órganos especializados llamados micetomas están conectados al intestino (Eaton y Hale, 1993). En *Anobium* y géneros relacionados de Anobiidae y algunos de los cerambycoides, estas estructuras contienen simbiosis en forma de levaduras, mientras que Bostrychidae parece albergar bacterias simbiosis (Crowson, citado por Eaton y

Hale, 1993). El papel de estos simbioses es la producción de ciertos nutrientes esenciales (Eaton y Hale, 1993).

Aunque algunas termitas superiores (Macrotermitinae, Termitidae) tienen hongos simbioses, termitas de madera seca (Kalotermitidae), termitas de madera húmeda y todas las otras termitas tienen protozoos y bacterias en la microbiota del intestino posterior en una proporción de 1:100 células (Breznak, citado por Eaton y Hale, 1993). En algunos casos también se encuentran actinomicetes. El número microbiano estimado en el intestino de *Reticulitermes flavipes* es de  $10^9 - 10^{10} \text{ ml}^{-1}$  (Eaton y Hale, 1993). Las bacterias aisladas incluyen estreptococos, bacteroides, varios Enterobacteriaceae, estafilococos y bacilos (Eaton y Hale, 1993). Se observaron diversas formas y tamaños de espiroquetas, pero demostraron una dificultad para ser cultivadas y sus roles son inciertos (Eaton y Hale, 1993).

#### 2.1.5. Estadísticas de pestes a nivel mundial

##### 2.1.5.1. Escarabajos en madera seca

Los escarabajos que aparecen más frecuentemente en la madera seca son, *Anobium punctatum*, *Hylotrupes bajulus*, *Lyctus sp.*, especialmente *L. brunneus* y *L. africanus* y *Xestobium rufovillosum*, los cuales son miembros de las familias Anobiidae, Cerambycidae y Lyctidae (Eaton y Hale, 1993).

Las condiciones climáticas y el creciente nivel internacional e intercontinental del comercio de bienes y materias primas son probablemente responsables de la distribución de muchos escarabajos (Eaton y Hale, 1993). *Anobium punctatum* y en menor medida *X. rufovillosum* parecen estar ampliamente distribuidos en zonas templadas mientras que otros Anobiidae están restringidos en su distribución (Eaton y Hale, 1993).

Aunque originalmente la especie *Lyctus brunneus* fue considerada de origen norteamericana, parece estar distribuida por todo el mundo (Eaton y Hale, 1993). El éxito de este insecto generalmente se puede ver en el Reino Unido donde, de acuerdo a Hickin, citado por Eaton y Hale (1993), *L. brunneus* ha desplazado al líctido nativo de importancia.

*Hylotrupes bajulus* no está muy esparcido en el Reino Unido, limitándose a una pequeña región en el sureste de Inglaterra (Eaton y Hale, 1993). En Europa, es indudablemente la plaga más importante de madera seca, pero la falta de altas temperaturas en el verano, hace que su distribución sea restringida en el Reino Unido (Eaton y Hale, 1993).

#### 2.1.5.2. Termitas presentes en edificios y en maderas expuestas al exterior

La distribución de las termitas se dice que está limitada por la temperatura y como una generalización están limitadas dentro de los 45° N y S, aunque varias especies de *Reticulitermes* (*R. lucifugus*, *R. flavipes* y *R. hesperus*), *Zootermopsis* (*Z. angusticollis* y *Z. nevadensis*) y *Porotermes* toleran temperaturas más bajas (Harris, citado por Eaton y Hale, 1993) y por tanto se encuentran en latitudes más amplias. En el Reino Unido, los reportes de termitas son poco comunes, y están restringidos en puertos de embarque (Eaton y Hale, 1993). En Hamburgo, Alemania, la especie *R. flavipes* se dice que se ha establecido en los sistemas de calefacción subterránea alrededor del puerto (Eaton y Hale, 1993).

#### 2.1.6. Orden Coleóptera

La morfología de los escarabajos es caracterizada por sus alas delanteras llamadas élitros, las cuales están fuertemente quitinizadas y cubren a las alas posteriores (Unger et al., 2001). El primero de los tres segmentos del tórax denominado pronoto normalmente es más alargado y toma la forma de un escudo, y se extiende sobre la cabeza. Las piezas bucales de estos insectos están adaptadas para masticar madera (Unger et al., 2001).

Coleóptera es el orden de insectos más grande que comprende alrededor del 40% de los insectos conocidos (Eaton y Hale, 1993). Los escarabajos más comunes que atacan la madera pertenecen a las familias Anobiidae (escarabajos de los muebles), Lyctidae y Cerambycidae (Unger et al., 2001).

La identificación correcta de los insectos responsables es muy importante porque, en algunos casos el daño no persiste cuando la madera es secada o resecada en el servicio (Eaton y Hale, 1993). En otras instancias la posibilidad de reinfestación puede dictar la selección de alternativas, (a menudo más drásticas) como medidas de control, es decir tratamientos con preservantes químicos (Eaton y Hale, 1993).

La identificación exacta de las especies individuales de insectos requiere del examen de los adultos o de las larvas (Florian, citado por Unger et al., 2001). Usualmente es preferido el adulto, porque la extracción de la larva intacta puede ser una operación muy dificultosa de realizar (Unger et al., 2001). Sin embargo normalmente no están disponibles, por lo que se debe recurrir a la utilización de las características externas e internas de la madera dañada. La forma, el tamaño, y la condición de los orificios de emergencia en la superficie de la madera y la localización y el curso de las galerías, normalmente hacen

posible limitar el número de especies que pueden ser responsables del daño (Unger et al., 2001). Además las marcas del masticado en las paredes de las galerías, el color, la forma, el tamaño de las heces y el aserrín pueden ser un indicativo del tipo de escarabajo involucrado. La elección de ciertas especies de madera indica que plagas probablemente puedan estar atacando (Unger et al., 2001).

La humedad relativa y la temperatura son factores muy importantes en el desarrollo de los insectos que atacan madera elaborada.

#### **Cuadro 1.** Requerimientos de humedad de larvas

Especies	Contenido de humedad de la madera (%)			Humedad relativa (%)		
	Mín.	Óptimo	Máx.	Mín.	Óptimo	Máx.
<i>Anobium punctatum</i>	10-12	28-30	47-50	~60	~90	>95
<i>Hylotrupes bajulus</i>	9-10	30-40	65-80	~50	~90	>95
<i>Lyctus brunneus</i>	7-8	14-16	23	~30	>80	~90

Fuente: Unger et al. (2001)

#### **Cuadro 2.** Efecto de la temperatura en el desarrollo y la muerte de larvas

Especies	Temperatura (°C)			
	Mín.	Óptimo	Máx.	Letal
<i>Anobium punctatum</i>	12	21-24	29	47-50
<i>Hylotrupes bajulus</i>	16-19	28-30	35	55-57
<i>Lyctus brunneus</i>	18	26-27	30	49-65

Fuente: Unger et al. (2001)

##### 2.1.6.1. Anobiidae

En los países templados los anóbidos son una de las familias de coleópteros más importantes que habitan en la madera (Eaton y Hale, 1993).

Los adultos tienen un tamaño muy pequeño, de apenas unos milímetros y son de color marrón.

Cuando son molestados, los escarabajos se hacen los muertos tumbándose inmóviles, normalmente por un largo período, con las piernas retraídas (Unger et al., 2001).

Con respecto a la especie *Anobium punctatum*, esta se encuentra ampliamente distribuida en Europa, especialmente en Inglaterra e Irlanda, pero también ha sido introducida en Norteamérica, Sudáfrica, en el sur de Australia, y Nueva Zelanda (Unger et al., 2001). Puede convivir muy bien con los humanos en los edificios.

Los huevos son de color blanco vidrioso, tienen forma de limón, y poseen un tamaño aproximadamente de 0.3mm (Unger et al., 2001). Las larvas tienen un color blanco marfil, tienen forma de oruga, con tórax engrosado, abdomen cónico, tienen tres pares de patas articuladas de cinco existentes, y tienen un largo de hasta 6mm. Las larvas pueden digerir la celulosa de la madera con la ayuda de simbiontes de levadura en el sistema digestivo (Vité, citado por Unger et al., 2001). Por lo tanto pueden alimentarse de madera muy vieja, aunque a una tasa de crecimiento reducida. La hemicelulosa parece constituir una parte importante de la comida de las larvas (Serdjukova y Toskina, citados por Unger et al., 2001). Los adultos son de color marrón rojizo a negrozco, con un cuerpo redondo a cilíndrico. La parte dorsal del cuerpo está cubierta de pelos cortos amarillentos. Presentan un pronoto, que se extiende sobre la cabeza como una capucha. Presentan antenas conspicuas de 11 segmentos, donde los dos-tres últimos segmentos terminales son tan largos como todos los restantes juntos. La superficie de las alas delanteras (élitros) tiene filas de pequeñas cavidades o puntuaciones bien definidas (Unger et al., 2001). Las hembras son algo más largas que los machos, y pueden ser distinguidas por el último segmento abdominal del lado ventral (Unger et al., 2001). En los machos ese segmento tiene una depresión claramente visible, y el segmento anal es semicircular. El largo del cuerpo es de 3-5mm. Durante el apareamiento, los escarabajos pueden ser encontrados en los marcos de las ventanas (Unger et al., 2001). La hembra emite en su cola una hormona sexual (stegobinon), la cual puede ser usada como trampa de insectos como un atrayente, para indicar la presencia de los machos (Unger et al., 2001).

**Figura 1.** Adulto de *Anobium punctatum*



Fuente: Makarov (s.f.)

**Figura 2.** Larva de *Anobium punctatum*



Fuente: Getwoodworking (s.f.)

Los escarabajos que son grandes voladores, tienen sus vuelos nupciales desde octubre a febrero, siendo su pico en noviembre diciembre (Unger et al., 2001). Los adultos no se alimentan, y viven durante 1-3 semanas. Las hembras ponen entre 20-40 huevos en finas rajaduras de la madera, sobre superficies de madera aserrada, o en viejas galerías (Unger et al., 2001). Después de 2-4 semanas la larva emerge del huevo e inmediatamente horada dentro de la madera. Luego de 2 años (en albura de robles) o 4-8 años (en

maderas de coníferas) la larva pupa en la primavera dentro de una cámara pupal cercana a la superficie de la madera (Unger et al., 2001). Tras 4-6 semanas de descanso de la pupa, el adulto emerge, y taladra a través de la fina capa de madera remanente hasta alcanzar el exterior (Unger et al., 2001). Las condiciones óptimas para el desarrollo de las larvas en cuanto a la temperatura son 21-24°C y con respecto al contenido de humedad en la madera, este debe ser de 28-30% (Unger et al., 2001). Un ocasional humedecimiento de la madera, como puede ocurrir en subsuelos con pobre ventilación, promueve el desarrollo larval, mientras que la sequedad persistente hace que sea casi imposible.

*Anobium* ataca casi todas las maderas de coníferas y latifoliadas de Europa (Unger et al., 2001). Sin embargo algunas especies no europeas como el eucalipto (*Eucalyptus spp.*), el calabó (*Pycnanthus angolensis*), el abachi (*Triplochiton scleroxylon*) y la limba (*Terminalia superba*) no son atacadas por *Anobium punctatum* (Unger et al., 2001). Los muebles, esculturas, marcos de cuadros, altares, pianos, bancos de iglesias, suelos, escaleras y barandillas, así como también la madera estructural, son objetos frecuentemente atacados (Unger et al., 2001).

Este escarabajo prefiere la madera seca, incluso madera muy vieja ya que la utilización de la celulosa es posible, tiende a reinfestar, es decir, los huevos son puestos una y otra vez sobre la madera ya atacada, por lo que el interior de algunos objetos consiste casi en su totalidad de heces y aserrín, puede causar una mayor pérdida de fuerza en la madera estructural que los ataques por los líctidos (Unger et al., 2001). Debido a su oculto ciclo de vida, *Anobium punctatum* causa grandes dificultades en la determinación de un ataque activo y su subsecuente tratamiento (Unger et al., 2001).

Los orificios de emergencia son circulares de 3mm de diámetro. En madera de angiospermas, las galerías son irregulares y de 2-3mm de diámetro, están parcialmente llenas de heces desmenuzadas y pellets fecales en forma de cigarrillo (Unger et al., 2001). En maderas de latifoliadas con duramen de color, las galerías se extienden primariamente a través de la albura. En madera de gimnospermas, el leño temprano más débil es preferencialmente consumido, dejando laminillas del leño tardío intactas. El proceso de alimentación llega casi hasta la superficie de la madera, por lo que en casos de infestación severa, únicamente queda una delgada capa remanente en la superficie de los objetos de madera (Unger et al., 2001).

### 2.1.6.2. Lyctidae

Los líctidos son de color marrón y de unos pocos milímetros de largo. Forman una familia compuesta por alrededor de 60 especies con una gran distribución a nivel mundial (Unger et al., 2001). Están fuertemente relacionados con la familia Bostrychidae. Ambos atacan madera de angiospermas y solamente albura.

Con respecto a *Lyctus brunneus*, esta se caracteriza por ser una especie cosmopolita y se encuentra especialmente en los trópicos, pero ha sido introducida y esparcida en Europa, Norteamérica, Australia, y Japón (Unger et al., 2001).

Los huevos tienen una forma alargada. Las larvas son blancuzcas, en forma de oruga, y tienen un largo de hasta 6mm (Unger et al., 2001). Los adultos están activos en la noche. Son de color marrón rojizo a marrón oscuro, de cuerpo delgado y de un largo de 2.5-8mm (Unger et al., 2001). Poseen una pubescencia dorada irregular sobre el cuerpo y apéndices. Su pronoto está achatado y los élitros estriados. Los fémures anteriores son más gruesos que los medios y posteriores. Las antenas están terminadas en una masa formada por los 2-3 últimos segmentos de los 11 existentes.

**Figura 3.** Adulto de *Lyctus brunneus*



Fuente: Wikipedia (s.f.)

El apareamiento tiene lugar en primavera y verano. Las hembras depositan entre 70-75 huevos en orificios de emergencia viejos o en vasos abiertos (poros), de manera individual o en grupos de hasta 4 huevos (Unger et

al., 2001). Las nuevas infestaciones toman lugar únicamente en maderas de latifoliadas con vasos de diámetros suficientemente largos. Sin embargo, las hembras pueden también hacer marcas de perforación perpendiculares a la dirección de las fibras de la madera. En condiciones óptimas, el periodo de desarrollo larval es muy corto siendo de 4 meses (Unger et al., 2001). Las larvas viven en azúcar o almidón, pero también necesitan pequeñas cantidades de proteína. La albura con un contenido de almidón inferior al 1.5% es inmune al ataque del insecto (Unger et al., 2001). Las larvas contienen microorganismos simbioses en su sistema digestivo, los cuales proveen vitaminas (Unger et al., 2001). La larva en su último estado de crecimiento, pupa cerca de la superficie de la madera en cámaras pupales ovales. Los adultos salen a través de pequeños orificios de emergencia y son muy activos en vuelo. *Lyctus brunneus* requiere un bajo contenido de humedad de la madera, siendo el óptimo entre 14-16%, y su temperatura óptima es 26-27°C (Unger et al., 2001).

Estos escarabajos atacan la albura de madera de latifoliadas templadas como ser robles, fresnos, olmos; maderas tropicales como el abachi y la limba, y el bambú (Unger et al., 2001). La haya y las maderas de coníferas son inmunes al líctido. El insecto es encontrado en suelos de parquet, chapas de madera, muebles, y paneles de pared, pero también en pallets y cajas de envío (Unger et al., 2001).

Los orificios de emergencia son circulares de 0.5-2mm de diámetro. Las galerías tienen un ancho de 1-2mm, extendiéndose primariamente en la dirección de las fibras, pero exclusivamente en la albura de madera de angiospermas. Las galerías son similares a las de *Anobium punctatum*, pero difieren en las heces, siendo en este caso extremadamente finas como un polvo de color claro, sin formar los típicos pellets fecales (Unger et al., 2001). El daño es generalmente grande porque la albura es completamente pulverizada, dejando solamente una delgada capa de madera en la superficie del objeto (Unger et al., 2001). *Lyctus brunneus* es capaz de reinfestar la madera.

#### 2.1.6.3. Bostrychidae

Su distribución ocurre en las regiones tropicales de África, Sur de Asia, y América (Unger et al., 2001). Son plagas peligrosas y frecuentes en madera, y en maderas estructurales. Algunas especies muchas veces son introducidas en zonas templadas por medio de cajas de envío, maderas, y objetos etnográficos (Unger et al., 2001).

Las larvas son blancuzcas, en forma de orugas con cuatro pares de patas articuladas (Unger et al., 2001). Los adultos son de color marrón oscuro a

negro, hay escarabajos pequeños y otros de un tamaño mediano con un largo de 3-30mm dependiendo de la especie (Unger et al., 2001). El protórax cubre la cabeza como un escudo, los tres segmentos distales de la antena están engrosados. En el caso de *Bostrychopsis uncinata*, en vista lateral, la parte anterior terminal del pronoto posee espinas.<sup>1</sup> Además esta especie presenta élitros truncados en la parte posterior con un declive muy pronunciado. Ese declive está armado con cuatro espinas cortas y robustas.<sup>1</sup>

En la familia Bostrychidae, tanto las larvas como los adultos destruyen madera. Machos y hembras perforan dentro de la madera donde se va a producir el apareamiento, en una galería reproductora, la cual está libre de heces y aserrín (Unger et al., 2001). Las larvas hacen galerías circulares en la albura. Tanto las larvas como los adultos, contienen microorganismos simbióticos (Unger et al., 2001). Las larvas requieren almidón para su desarrollo principalmente (Unger et al., 2001). La pupación ocurre en material destruido cercano a la superficie de la madera. Dependiendo de la especie, esta familia ataca tanto madera húmeda como madera seca (Unger et al., 2001).

Producen sus daños especialmente en madera densa de angiospermas; el duramen de maderas de latifoliadas y coníferas permanece intacto (Unger et al., 2001). Se encuentran en toneles, suelos de parquet, chapas de madera, utensilios, y souvenirs (Unger et al., 2001).

Muchas veces esta familia actúa en comunidad con la familia de los líctidos. En los trópicos, estos escarabajos junto con las termitas, son las plagas de madera más temidas (Unger et al., 2001).

El orificio de emergencia es circular. Las galerías de las larvas son circulares también, y se extienden en forma de anillo bajo la corteza y la albura de maderas de angiospermas (Unger et al., 2001). Con respecto a *Bostrychopsis uncinata* el tipo de aserrín producido es grueso y compactado. Sus orificios de emergencia tienen un diámetro de 3-9mm y raramente producen reinfestación.<sup>1</sup>

#### 2.1.6.4. Cerambycidae

A nivel mundial debe haber alrededor de 20000 especies de cerambícidos. Son caracterizados por tener largas antenas, las cuales pueden ser más largas que su propio cuerpo (Eaton y Hale, 1993).

---

<sup>1</sup> Bollazzi, M. 2015. Com. personal.

En cuanto a la especie *Hylotrupes bajulus*, su distribución se da en zonas templadas de Europa (pero no en Irlanda, y en una limitada extensión de Noruega, Finlandia, e Inglaterra), Asia menor, África y América (Unger et al., 2001).

Los huevos son de un blanco brillante y tienen un tamaño de 2mm de largo (Unger et al., 2001). Las larvas son de color marfil, con una cabeza fuerte y mandíbulas oscuras. El cuerpo tiene un largo de 15-30mm, y está compuesto por segmentos en forma de anillos claramente visibles (Unger et al., 2001). Los adultos son de color oscuro a marrón, poseen una pubescencia clara en el cuerpo, siendo más notoria en el pronoto que en los élitros. Presenta un protórax de lados redondeados con dos tubérculos glabros algo reniformes (Unger et al., 2001). Los élitros tienen dos bandas claras transversales. Sus antenas son largas y filiformes. Las hembras poseen un ovipositor que puede extenderse hasta 25mm (Unger et al., 2001). Los machos tienen un largo de 8-16mm mientras que las hembras tienen un largo de 10-25mm (Unger et al., 2001).

**Figura 4.** Adulto de *Hylotrupes bajulus*



Fuente: Carcoma (s.f.)

El apareamiento ocurre entre diciembre y febrero durante las altas temperaturas del mediodía (Unger et al., 2001). Las hembras usan su ovipositor para poner 200-400 huevos, separados en varios grupos, en grietas de la madera (Unger et al., 2001). Luego de 10-20 días la larva sale del huevo, e inmediatamente taladra hacia dentro de la madera. Bajo condiciones óptimas, es decir con un contenido de humedad cercano al punto de saturación de la

fibra, y con una temperatura de 24-30°C, el desarrollo demora 3 años, sino requiere más de 10 años (Unger et al., 2001). Durante ese tiempo, la destrucción de la madera puede ser muy extensa. Según Becker, citado por Unger et al. (2001) la tasa de desarrollo de las larvas depende en gran medida del contenido de proteína de la madera, pero la holocelulosa también es utilizada. Algo de vitamina B también es necesaria para la viabilidad de las larvas. Estas son capaces de sobrevivir en condiciones pobres, a través de períodos de ayuno de varios meses (Unger et al., 2001). Estas características (requerimientos moderados de alimentos y la habilidad de vivir y propagarse en madera seca) son responsables del éxito de esta especie y de su nocividad (Unger et al., 2001). *Hylotrupes bajulus* es el típico representante de los insectos de madera seca. Después de un período prolongado de descenso significativo de la temperatura, se da la pupación en cámaras pupales, que están cerradas con virutas ásperas (Unger et al., 2001). Antes de esto las larvas hacen unos orificios de emergencia los cuales son cerrados superficialmente. Los escarabajos luego abandonan la madera y se dispersan por esos agujeros de emergencia, cuando las temperaturas comienzan a superar los 25°C (Unger et al., 2001). Los machos salen un poco antes que las hembras y atraen a estas últimas con ciertas feromonas (Noldt et al., citados por Unger et al., 2001). Los machos son más propensos a seleccionar los nuevos lugares de cría (Plarre y Hertel, citados por Unger et al., 2001).

Es una plaga importante en madera estructural en edificios de gran altura, molduras interiores, revestimientos de madera de coníferas pintados, edificios con entramado de madera, postes de cercas, postes de electricidad, pero raramente ataca muebles (Unger et al., 2001). Ataca únicamente la albura y prefiere principalmente coníferas. Las maderas estructurales nuevas con bajas proporciones de duramen tienen más riesgo de ser atacadas que las maderas estructurales viejas con altas proporciones de duramen (Unger et al., 2001).

Los orificios de emergencia son irregulares y ovales, y tienen un diámetro de 6-10mm. Las galerías se extienden cercanas a la superficie de la madera dejando una delgada capa de madera remanente (Unger et al., 2001). Las larvas se alimentan primariamente de la albura de madera de coníferas, especialmente del leño temprano (Unger et al., 2001). El tipo de aserrín es granular fino a largas fibras. Durante los meses de verano, pueden llegar a oírse los ruidos de las larvas alimentándose de la madera (Unger et al., 2001). En este insecto ocurre reinfestación.

### 2.1.7. Orden Isóptera

Las termitas son insectos con metamorfosis incompleta (hemimetábolos). Son insectos eusociales, los cuales forman colonias, y frecuentemente, exhiben un marcado polimorfismo (Unger et al., 2001).

Viven principalmente en regiones tropicales y subtropicales. Requieren calor y humedad, por tanto prefieren temperaturas de 26-32°C y una humedad relativa de 70-90% (Unger et al., 2001).

Se conocen más de 2000 especies de termitas, y 30 de esas son de alta importancia económica con respecto a los daños en la madera (Unger et al., 2001). El tamaño promedio de estos insectos es de 10mm. Dado que su cuerpo esta débilmente quitinizado, las termitas evitan la luz y, a excepción de los reproductores alados, permanecen ocultas (Unger et al., 2001).

La naturaleza y composición de la colonia es compleja. Están controladas principalmente por las reproductoras, por un sistema de intercambio de nutrientes vía oral y anal llamado trofalaxia, además de influenciar a la colonia por medio de hormonas. La colonia consiste en tres grandes castas y estados de desarrollo, como los reproductores fértiles y los infértiles, soldados y obreras (Unger et al., 2001).

La tarea de los reproductores es crear una nueva colonia. Los machos y hembras reproductoras tienen dos pares de alas de igual tamaño, ojos complejos, y están fuertemente pigmentados (Unger et al., 2001). Se producen vuelos nupciales, y posteriormente al apareamiento, los reproductores pierden sus alas. El rey y la reina se mantienen juntos después de establecer su nido. La reina puede producir miles de huevos por día, y la forma de alimentación después de que eclosionan los huevos, influye en la última diferenciación en las formas de castas (Unger et al., 2001). Si es necesario, puede llegar a haber reproductores secundarios, pero tendrán alas cortas o ninguna en absoluto. En cada colonia pueden ocurrir ambos reproductores (primarios y secundarios).

Con respecto a la especie *Reticulitermes flavipes*, las obreras tienen un cuerpo blando, tegumento transparente, son ápteras, tienen ausencia de ojos y ocelos y su capsula cefálica es ovoide. Las obreras se encargan de la alimentación de todos los individuos de la colonia, del cuidado de las crías y de la construcción del nido (Unger et al., 2001). Los soldados tienen una cabeza muy esclerotizada, pudiendo ser más grande que el cuerpo y más oscura que el mismo. Presentan unas mandíbulas muy desarrolladas para defenderse de los enemigos. Además de estas castas, existen numerosos estados de desarrollo como los huevos, larvas sin alas, ninfas, y pre soldados (Unger et al., 2001).

**Figura 5.** Obrera de *Reticulitermes flavipes*



Fuente: Nanz (2007)

**Figura 6.** Soldado de *Reticulitermes flavipes*



Fuente: Insectasylum (s.f.)

Las termitas destruyen tanto madera de coníferas como de latifoliadas, pero prefieren la madera de baja densidad del leño temprano, dejando láminas de madera del leño tardío sin atacar (Unger et al., 2001). No todas las especies de madera son atacadas de igual forma, algunas tienen una resistencia natural a las termitas. La digestión de madera en el caso de *Reticulitermes flavipes*, es asistida por microorganismos que se encuentran en el intestino del insecto (Unger et al., 2001). Esta especie es nativa de Norteamérica y ha sido introducida en Europa repetidamente (Unger et al., 2001). En Hamburgo, Alemania, por ejemplo, las infestaciones han existido por años (Unger et al., 2001).

## 2.2. LA MADERA Y SU UTILIZACIÓN POR LOS ORGANISMOS XILÓFAGOS

La madera representa una reserva importante de materia orgánica y de elementos minerales (Dajoz, 2001). La descomposición de la misma es lenta y algunos insectos xilófagos aceleran el proceso de descomposición y mineralización. Además de los insectos, numerosos hongos trabajan en simultáneo en la descomposición de la madera.

### 2.2.1. Características químicas de la madera

En un corte transversal de un tronco, los tejidos que se ven desde el exterior hacia el interior son, la corteza externa o ritidoma, la corteza interna, el tejido meristemático o cambium, el xilema o leño (la madera) conformado por la albura y el duramen, y por último la médula.

La madera es un material muy particular dada su dureza y su composición química (Dajoz, 2001). Esto repercute sobre la morfología y la fisiología de los insectos que se alimentan de madera o que se desarrollan en ella (Dajoz, 2001). Los principales componentes son, la celulosa, la hemicelulosa, y la lignina.

#### 2.2.1.1. La celulosa

La celulosa constituye el 40 % del peso seco de la madera (Dajoz, 2001). Es una molécula lineal y está formada por residuos de glucosa ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub>, unidos mediante enlaces glicosídicos  $\beta$  (1,4) (Ibáñez et al., 2009). Puede haber hasta 3000 moléculas de glucosa reunidas en una molécula de celulosa (Dajoz, 2001). La celulosa puede ser hidrolizada por hongos e insectos y otros invertebrados marinos.

La pared de las células de la madera incluye una pared celular primaria en la cual las moléculas de celulosa no tienen orientación preferencial, y una pared celular secundaria (Dajoz, 2001). En esta última, la celulosa se presenta en forma de microfibrillas de sección transversal oval que miden alrededor 10 x 4 nm que están situadas en el centro de una envoltura formada de polisacáridos y de agua que tiene alrededor de 100  $\mu$ m de largo (Dajoz, 2001). Las moléculas de celulosa que pueden alcanzar una longitud de 7  $\mu$ m están dispuestas paralelamente las unas a las otras en las regiones que constituyen los cristalitos y que son birrefringentes (Dajoz, 2001). Entre los cristalitos se encuentra la celulosa amorfa formada de cadenas no paralelas entre las que se insertan las hemicelulosas (Dajoz, 2001). La celulosa de los cristalitos es más resistente a la hidrólisis que la celulosa amorfa (Dajoz, 2001).

#### 2.2.1.2. La hemicelulosa

La hemicelulosa es un heteropolisacárido (polisacárido formado por distintos azúcares) cuyo grado de polimerización del orden de 200 es inferior al de la celulosa. Está formada por pentosanas (como las arabanos y las xilanas) y hexosanas (como las fructanas y galactanas) (Dajoz, 2001). La hemicelulosa es degradada por unas enzimas denominadas hemicelulasas. El contenido en hemicelulosas varía de 14.6% en la madera de *Pinus ponderosa* a 31.68% en la de abedul (Dajoz, 2001).

#### 2.2.1.3. La lignina

La lignina es un polímero tridimensional, amorfo, altamente ramificado, hidrofóbico, con una estructura química compleja (Ibáñez et al., 2009). La misma se encuentra en un 18 a 38% en la madera. Está formada esencialmente por la polimerización de monómeros que son alcoholes aromáticos como el alcohol coniferílico, el alcohol sinapílico y el alcohol coumarílico (Dajoz, 2001). La lignina y la celulosa están unidas por verdaderos enlaces químicos para formar lignocelulosas (Dajoz, 2001). Esta estructura está demostrada por el hecho de que la lignina protege la celulosa contra los ataques de los microorganismos que sólo poseen enzimas celulolíticas (Dajoz, 2001). En efecto, se conocen muchas bacterias y hongos capaces de hidrolizar la celulosa, pero no se conocen bacterias que puedan atacar la celulosa en presencia de lignina (Dajoz, 2001).

#### 2.2.1.4. Componentes secundarios

Los componentes secundarios, cuya importancia raramente sobrepasa 2 a 3% en peso, desempeñan un papel importante en la vida de los insectos xilófagos porque suministran diversos glúcidos como el almidón y los azúcares solubles, de ellos los principales son la sacarosa, la levulosa, la glucosa y la melezitosa (Dajoz, 2001). El contenido en nitrógeno proteínico y no proteínico es muy bajo; de 0.045 a 0.227% en las gimnospermas y de 0.057 a 0.104% en las frondosas (Cowling y Merrill, citados por Dajoz, 2001).

En general los extractivos fenólicos tienen actividad biocida, pueden ser insecticidas o funguicidas. Son los que confieren mayor durabilidad natural a algunas especies de madera.

La durabilidad natural de una madera es la resistencia natural que presenta frente al ataque los distintos agentes degradadores. Los agentes degradadores pueden ser abióticos (atmosféricos, mecánicos o químicos) y/o bióticos (hongos, e insectos).

La mayor o menor durabilidad natural de una madera depende del mayor o menor contenido de resinas, taninos, aceites, etc que impregnan sus tejidos. El duramen contiene más sustancias protectoras que la albura, por lo que es más resistente.

Los elementos minerales en la madera son relativamente pobres. El calcio, el potasio y el fósforo son los más abundantes así como los compuestos de nitrógeno (Dajoz, 2001). A pesar de esta pobreza relativa, la biomasa elevada de la madera representa una inmovilización importante de elementos que deben ser mineralizados por la vía de los descomponedores para ser reincorporados después a los ciclos biogeoquímicos (Dajoz, 2001).

### 2.2.2. El ataque de la madera por los insectos

#### 2.2.2.1. El ataque de la celulosa

La celulosa es un componente de la madera de gran importancia biológica y económica.

El ataque de la celulosa se hace entre los insectos como entre los hongos, gracias a un complejo de tres hidrolasas (Dajoz, 2001). La enzima llamada  $C_x$  es una  $\beta$ -endoglucanasa que ataca las cadenas lineales de la celulosa únicamente al nivel de las regiones amorfas, cuando la celulosa se presenta en parte al estado <<cristalino>> (Dajoz, 2001). La enzima  $C_1$  o celobiohidrolasa es una exoglucanasa que a partir de las cadenas no reducidas liberadas por la enzima  $C_x$  produce oligosacáridos o celobiosa y al mismo tiempo crea nuevos sitios de ataque para la enzima  $C_x$  (Dajoz, 2001).

La acción sinérgica de  $C_1$  y  $C_x$  acaba en una desorganización completa de la celulosa y en su transformación en celobiosa (Dajoz, 2001). La celobiosa, que es un inhibidor potencial de las enzimas  $C_1$  y  $C_x$  es transformada, poco a poco de su aparición, en glucosa por la celobiasa que es una  $\beta$  1-4 glucosidasa (Dajoz, 2001).

Debido a que las tres enzimas trabajan de forma sinérgica, la celulosa únicamente puede ser degradada cuando las tres están presentes.

Son pocos los insectos capaces de degradar completamente la celulosa (Dajoz, 2001). *Anobium punctatum*, *Hylotrupes bajulus*, y algunas termitas, son algunos de los pocos insectos capaces de degradar la misma (Dajoz, 2001).

Muchos insectos consumidores de restos vegetales ingieren en sus alimentos un conjunto complejo de bacterias, protozoos, y hongos. Estos microorganismos son la fuente de enzimas que, una vez liberadas, quedan en el tubo digestivo de los animales que encuentran así un medio de aumentar sus capacidades digestivas respecto a sustratos tales como la celulosa, las hemicelulosas, la pectina, la lignina y otras moléculas difícilmente degradables (Martin y Kukor, citados por Dajoz, 2001). Este papel de las enzimas adquiridas ha sido puesto en evidencia por primera vez en la termita *Macrotermes natalensis* (Martin y Martin, citados por Dajoz, 2001). Esta termita que no tiene protozoos simbióticos vive asociada con diversos hongos entre ellos los *Termitomyces* (Dajoz, 2001). Estos son consumidos y suministran las enzimas  $C_1$  mientras que las enzimas  $C_x$  son aportadas por otros hongos (Dajoz, 2001).

El mantenimiento de la actividad de las enzimas ingeridas es posible gracias al pH del tubo digestivo de los insectos que es próximo a la neutralidad (entre 6.8 y 7.2 en general) (Dajoz, 2001). En este rango de pH estas enzimas son estables y activas (Dajoz, 2001).

#### 2.2.2.2. El ataque de la lignina

Las enzimas segregadas por los insectos no parecen atacar la lignina. Pero es degradada por hongos y por bacterias, quizá incluso por protozoos, de los que algunos viven como simbioses en el tubo digestivo de los insectos (Dajoz, 2001). Está establecido que algunos insectos, gracias a esta simbiosis, pueden utilizar la lignina (Dajoz, 2001).

Las termitas son capaces de digerir la celulosa y la hemicelulosa, y al menos alguna de ellas como *Kaloterms flavicollis* son capaces de digerir la lignina. Flagelados del grupo de los Hipertermastiginos y bacterias se encuentran en la ampolla rectal de esta termita y aseguran la digestión de la celulosa (Dajoz, 2001). Lavette, citado por Dajoz (2001) confirmó el ataque de la lignina por estos protozoos.

#### 2.2.2.3. El ataque de las hemicelulosas y otros constituyentes de la madera

Muchas enzimas de los insectos xilófagos son capaces de degradar las hemicelulosas. Hay diversas oxidasas como la amilasa, la sacarasa, la maltasa, y la trehalasa (cuadro 3). La repartición de estas enzimas en los diversos segmentos del tubo digestivo varía según las especies (Dajoz, 2001).

**Cuadro 3.** Complejo enzimático de algunas especies de coleópteros xilófagos

Especies	Enzimas						
	Amilasa	Sacarasa	Maltasa	Lactasa	Celulasa	Hemicelulasa	Proteasa
<i>Chalcophora mariana</i> (Buprestido)	+				+	+	+
<i>Pissodes notatus</i> (Curculiónido)	+	+	+	+	+	+	+
<i>Bostrychoplites cornutus</i> (Bostríquido)	4	4	3	1	0	0	3
<i>Lyctus brunneus</i> (Líctido)	3	3	3	3	0	2	3
<i>Anobium punctatum</i> (Anóbido)	2	1	1	2	1	4	3
<i>Xestobium rufovillosum</i> (Anóbido)	3	3	3	3	1	4	3
<i>Cerambyx cerdo</i> (Cerambícido)	+				+		+
<i>Ergates faber</i> (Cerambícido)	+				+		+

Referencias: El signo + indica que la enzima está presente pero sin precisar la intensidad del ataque del sustrato. Las cifras 1, 2, 3 y 4 indican que la enzima está presente y corresponden a la intensidad del ataque del sustrato.

Fuente: Dajoz (2001)

El crecimiento de la larva del cerambícido *Hylotrupes bajulus* es más rápido y su mortalidad más baja en la albura que en el duramen (Dajoz, 2001). Su desarrollo se da principalmente en coníferas. La larva utiliza solamente 12.3% de la celulosa presente y 2% de las hemicelulosas; ataca en este grupo a las hexosanas y no digiere las pentosanas (Dajoz, 2001). El desarrollo de las larvas se inhibe si se lava la madera con agua caliente con el fin de eliminar los azúcares, el almidón y las proteínas. Lo mismo ocurre si la madera es tratada con ácido sulfúrico donde se destruyen las proteínas. El factor limitante para el crecimiento de *Hylotrupes bajulus* es el contenido de proteínas en la madera. La adición de azúcares mejora poco o nada el crecimiento; pero si se añaden aminoácidos, peptonas o cadáveres de otros *Hylotrupes* el crecimiento es 10 a 15 veces más rápido (Dajoz, 2001). Se puede así reducir de 3 a 1 año la duración del desarrollo larvario (Dajoz, 2001). Al mismo tiempo la larva consume menos madera porque no tiene más necesidad de buscar las sustancias nitrogenadas indispensables (Becker, citado por Dajoz, 2001).

## 2.3. MÉTODOS DE CONTROL

### 2.3.1. Barreras físicas

La protección eficiente de la madera contra el ataque por hongos e insectos, utilizando solamente una película de pintura, haciendo un revestimiento de la superficie, o utilizando una envoltura de plástico inerte u otros materiales de revestimiento no biodegradables, es muy dependiente del grado de exposición de la madera. La madera de servicio expuesta al contacto con el suelo crea muchos problemas. La disponibilidad de humedad en la mayoría de los ambientes del suelo y el acceso directo de los microorganismos degradadores de la madera e insectos en la superficie de la madera, proveen condiciones favorables para el deterioro de la misma (Eaton y Hale, 1993). Las barreras físicas son mucho menos eficaces contra el ataque biológico en esta situación y las medidas para la protección de la madera se han concentrado en pre-tratamientos con preservantes químicos (Eaton y Hale, 1993). Únicamente la madera que permanece en el interior, fuera del contacto con el suelo, donde el contenido de humedad garantiza mantenerse por debajo del 18%, puede ser considerado seguro contra la podredumbre causada por hongos (Eaton y Hale, 1993). Sin embargo, aun así, la madera es capaz de ser atacada por insectos, particularmente en superficies inaccesibles donde una capa de barniz o pintura no puede aplicarse.

Bajo condiciones normales de envejecimiento natural, las maderas estructurales y decorativas expuestas, están sujetas a fluctuaciones de temperatura, a efectos fotoquímicos y estrés, causados por la absorción de agua y el secado (Eaton y Hale, 1993). Con el fin de aliviar la madera de estas tensiones mecánicas, se pueden aplicar formulaciones repelentes del agua como revestimientos superficiales que reducen la variación del contenido de humedad de la madera.

Los revestimientos poliméricos tradicionales como los alquidos y poliácridatos no son verdaderamente hidrofóbicos y permiten la penetración capilar o la difusión molecular de líquido o vapor de agua (Eaton y Hale, 1993). Las ceras de parafina y aceites de silicona incorporados en los revestimientos están destinados a impartir hidrofobicidad en las formulaciones pero en muchos casos la pobre afinidad entre los componentes puede conducir a un rendimiento insatisfactorio (Eaton y Hale, 1993). Un enfoque alternativo a este problema ha sido introducir dos barreras hidrofóbicas en acabados de repelentes de agua, una de ellas una poliolefina migratoria, la otra un ácido graso no migratorio de alto peso molecular (Borgin, citado por Eaton y Hale, 1993). Los resultados de las pruebas en laboratorio y a campo con este nuevo tipo de formulación muestran un avance en la repelencia del agua, la cual es casi el doble que los

productos convencionales. Además los resultados a campo indicaron que usando el sistema de doble barrera, el contenido de humedad en la madera se mantiene por debajo del 10%, comparado con 20% en el caso de maderas revestidas con productos convencionales (Eaton y Hale, 1993).

Estudios sobre el rendimiento de la madera colocada en concreto, los cuales son relevantes para este tema, dado que un collar o manga de hormigón son una forma de barrera física, han indicado que no hay diferencia en el grado de ataque cuando se compara con la madera tratada de manera similar y expuesta directamente en el suelo (Leightley y Willoughby, citados por Eaton y Hale, 1993). La alcalinidad asociada al empotramiento en el hormigón también afecta la resistencia de la madera.

Otros tratamientos protectores de la madera tienen que ver con vendajes de plástico, u otros revestimientos como sales difusibles o compuestos a base de aceite.

### 2.3.2. Prevención versus tratamiento paliativo

Dentro de la industria preservante de madera generalmente se acepta que la prevención es mejor que la cura, y que un pre tratamiento de la madera antes de la exposición es preferible a la erradicación de organismos degradadores de madera que ya están establecidos en la misma (Eaton y Hale, 1993).

Aunque inicialmente hay un aumento de los costos en el uso de madera que ha sido tratada adecuadamente con un preservante, los beneficios financieros globales pueden ser enormes (Eaton y Hale, 1993). Excepto en el caso de algunas especies que son muy duraderas, la mayoría de las especies sin tratar tienen una vida útil previsible y su rendimiento a largo plazo está limitado en aquellas situaciones donde un riesgo biológico está presente (Eaton y Hale, 1993).

Cuando la madera es tratada inadecuadamente o ni siquiera es tratada, el usuario de la misma se enfrenta en última instancia, con el costo del reemplazo completo y la re instalación con madera tratada adecuadamente, o a los costos de mantenimiento regular y al tratamiento reparador con el fin de extender la vida útil de la madera (Eaton y Hale, 1993). Para el propietario de una vivienda doméstica, el costo de la sustitución de maderas estructurales atacadas por la podredumbre seca, carcoma o infestaciones de termitas puede ser considerable, pero para los servicios públicos y las empresas públicas regionales y nacionales, los costos de sustitución masiva de las columnas de energía y telecomunicaciones, los durmientes del ferrocarril, el pilotaje marítimo,

etc. también deben tener en cuenta los costos involucrados en la pérdida de servicio al consumidor (Eaton y Hale, 1993). Comprensiblemente, cuando el tratamiento previo de la madera ha sido inadecuado, los costos de mantenimiento y el tratamiento paliativo eficaz para extenderle la vida útil, suelen ser preferibles a la sustitución y reinstalación (Eaton y Hale, 1993).

### 2.3.3. Modificación térmica y química de la madera

La madera modificada es el resultado de una interacción entre la madera y un agente químico, biológico o físico, que permite, sin adicionar un biocida, mejorar alguna de sus propiedades durante la vida de servicio del material (Hill, citado por Touza, 2013).

En el ámbito científico, los efectos del tratamiento térmico de la madera comienzan a estudiarse en los años 20 del siglo pasado y ya en la década de los años 30 se comprueban importantes reducciones de la higroscopicidad de la madera tras su calentamiento en atmósferas de diferentes gases (Touza, 2013).

El termotratamiento modifica de forma permanente la composición química de la madera (en particular de la hemicelulosa) y, en consecuencia, la estructura de la pared celular (Touza, 2013). Estos cambios producen alteraciones significativas de las propiedades del material (Touza, 2013). Entre los principales cambios experimentados por la madera destaca la disminución de su humedad de equilibrio higroscópico y, en consecuencia, la mejora de su comportamiento frente a las variaciones de humedad (Touza, 2013). Asimismo, la durabilidad natural frente a los hongos e insectos xilófagos mejora considerablemente, lo que no ocurre en el caso de las termitas (Touza, 2013). Disminuye sus características o propiedades como aislante, el color de la madera se oscurece y sustancias como las resinas son eliminadas. La densidad disminuye, así como varias propiedades mecánicas como la resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad o la resistencia al impacto (Touza, 2013).

Dentro de la modificación química existen por ejemplo la acetilación y la furfurilación.

La madera modificada es necesariamente más cara que madera similar sin tratar (Dieste, 2014). La ganancia en peso de la madera luego de la modificación química (que puede alcanzar niveles de 30% y también superiores) se obtiene con productos químicos, que son insumos de la operación; además es necesario agregar el costo del proceso de modificación (autoclave de impregnación, reactor para fijación, etc.) (Dieste, 2014). Por lo tanto, es posible asumir que el valor de mercado de la madera modificada es

superior al de la madera protegida mediante impregnación en profundidad, para especies comparables (Dieste, 2014).

Cabe aclarar que sólo en Europa se cuenta con plantas que realicen estos procesos y comercialicen los productos, en América Latina no hay, y sería difícil introducir estos sistemas en Uruguay por las inversiones requeridas en un mercado interno muy chico.

#### 2.3.4. Preservantes químicos

Comúnmente los preservantes químicos se clasifican por el solvente en el que son disueltos para impregnar la madera.

##### 2.3.4.1. Preservantes oleosolubles

El pentaclorofenol es desarrollado en EUA en 1930 y ha sido uno de los preservantes oleosolubles más ampliamente utilizados. Para penetrar en la madera necesita de un solvente oleoso. Es un compuesto cristalino, obtenido por reacción de cloro con fenol. El producto comercial presenta 83-84% de pentaclorofenol, 6% de los tres tetrafenoles isoméricos, 6% de otros fenoles clorinados, y el resto son otros compuestos clorinados y materiales inertes (Hartford, citado por Ibáñez et al., 2009). Es muy efectivo como fungicida y cuando se combina con un insecticida adecuado en un aceite ligero, se convierte en un tratamiento integral útil para la carpintería (Eaton y Hale, 1993). Mantiene su efectividad por años cuando es depositado en la madera en estado cristalino o es guardado en solución en un solvente no volátil (Ibáñez et al., 2009). Sin embargo, si se hace en un solvente relativamente volátil como por ejemplo un aceite mineral ligero con un punto de ebullición bajo, el producto químico migra a la superficie de la madera y se pierde por evaporación del solvente. La formación de cristales en la superficie es una condición conocida como "floración" (Eaton y Hale, 1993). Además de una pérdida del químico, la floración puede tener un efecto irritante sobre los operativos que no lleven ropa de protección, pero se puede superar mediante el uso de agentes anti-floración por ejemplo, ftalato de dibutilo (Arsenault, citado por Eaton y Hale, 1993). Es químicamente estable, pero es irritante a piel y mucosas (Ibáñez et al., 2009).

Se han desarrollado varios derivados del pentaclorofenol para disminuir sus propiedades irritantes: pentaclorofenato de cobre y pentacloro fenol laurato (Levi, citado por Ibáñez et al., 2009). También, pentaclorofenato de sodio y tetraclorofenato de sodio. Otros fenoles clorinados usados como preservantes para madera son: tetra y tricloro fenol y cloro-2-fenil fenol (Ibáñez et al., 2009).

A pesar de su eficacia y gama de usos, el pentaclorofenol ya no se considera universalmente aceptable para el tratamiento de madera (Eaton y Hale, 1993). La presencia de pequeñas cantidades de dioxinas altamente tóxicas durante la fabricación y manipulación, y la preocupación por su impacto en el medio ambiente, han dado lugar a la prohibición del pentaclorofenol en varios países (Eaton y Hale, 1993). Actualmente la prohibición está aún más extendida.

#### 2.3.4.2. Preservantes oleosos

Algunos de los preservantes oleosos más conocidos son, la creosota, el alquitrán, el naftenato de cobre, el naftenato de zinc, el oxinato de cobre, etc.

La creosota y el alquitrán de hulla son uno de los preservantes más utilizados en todo el mundo, con una producción mundial de 16 millones de toneladas métricas, de las cuales 3 millones de toneladas se realizan en Europa occidental (Alscher y Lohnert, citados por Eaton y Hale, 1993). La creosota fue patentada en los EE.UU. en 1716 por el Dr. William Cook para preservar las maderas de los barcos contra los insectos xilófagos y la podredumbre por hongos (Eaton y Hale, 1993).

Son productos utilizados directamente en forma oleosa, no necesitan de un disolvente (Ibáñez et al., 2009).

La creosota es una mezcla compleja de unas 200-400 diferentes sustancias químicas, las cuales en su mayoría son hidrocarburos aromáticos, originados por los procesos de combustión de la madera o el carbón. Se obtiene también por destilación de alquitrán de hulla (a temperaturas entre 200 y 400°C), el cual es producido por carbonización de hulla bituminosa a elevada temperatura (entre 900 y 1200°C) (Ibáñez et al., 2009). Es más eficiente como preservante, la creosota de origen mineral que aquella de origen vegetal.

Los principales constituyentes de su compleja composición química incluyen alquitranes ácidos, alquitranes básicos y alquitranes neutros (Ibáñez et al., 2009). Los componentes potencialmente más peligrosos para la salud son los benzopirenos y los fenoles extraíbles en agua. Este producto se adhiere a las paredes celulares o se deposita en los lúmenes de las células, el mismo no se fija a la madera por reacciones químicas. Es insoluble en agua, de alta toxicidad contra hongos e insectos, tiene buena permanencia y no corroe los metales (Ibáñez et al., 2009).

Aunque la creosota es reconocida como el preservante de madera más eficaz y la madera tratada a presión debe tener una vida útil de 30 a 50 años,

hay ciertas desventajas en cuanto a su uso (Eaton y Hale, 1993). Tiene un olor desagradable, produce irritación en la piel, la superficie de la madera queda grasienta al tacto, por lo que no es adecuada para uso en interiores; es oscura, por lo que altera la coloración natural de la madera y no permite la aplicación de barnices o pintura. También puede ocurrir un sangrado de la creosota después del tratamiento, que consiste en exudados del líquido aceitoso en la superficie de la madera como gotas o en zonas extensas.

En muchos países hay severas restricciones en cuanto a su uso (Ibáñez et al., 2009). En 1986, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) lo declaró un plaguicida de uso restringido (Fields, 2001). Existe una amplia gama de especificaciones nacionales para creosotas tanto en Europa como en otros lugares (Eaton y Hale, 1993). Este preservante sigue siendo uno de los protectores de madera más importantes para su uso en situaciones de alto riesgo, aunque, en algunos países ha habido una tendencia en los últimos años hacia una mayor aplicación de otros productos químicos.

Los naftenatos provienen de la combinación de ácidos nafténicos obtenidos como sub productos en la refinación de petróleo con sales de elementos metálicos como cobre y zinc (Ibáñez et al., 2009). Estos compuestos son solubles en aceites, y generalmente el más utilizado es el naftenato de cobre, que posee un color verde oscuro. Es tóxico a un amplio rango de hongos descomponedores de madera, tiene baja solubilidad en agua, baja presión de vapor y buena permanencia en la madera (Levi, citado por Ibáñez et al., 2009). La madera tratada con naftenato de cobre no se puede pintar por exudar el compuesto a través de la pintura (Ibáñez et al., 2009).

El quinolato de cobre fue desarrollado en la década de 1960, es un muy buen fungicida y tiene buena fijación a la madera. Está compuesto por quelatos de cobre, y como solvente utiliza derivados volátiles de petróleo. Permite el acabado posterior de la madera con barnices o pinturas. Está permitido para madera en contacto con productos alimenticios; aprobado por la FDA (Food and Drug Administration de USA) para su empleo en cajas de frutas y verduras, tablas de picar, etc (Ibáñez et al., 2009). La principal desventaja es su elevado precio en comparación con otros productos.

Otros compuestos empleados como preservantes para madera son el oleato de fenil mercurio, que se aplica por pincelado en madera de embarcaciones y madera enterrada; pero no se recomienda por el mercurio que podría liberarse al ambiente (Hartford, citado por Ibáñez et al., 2009).

### 2.3.4.3. Preservantes hidrosolubles

Los preservantes hidrosolubles son soluciones acuosas de sales tóxicas. Muchas de las ventajas asociadas con estos preservantes reflejan las desventajas de la creosota (Eaton y Hale, 1993).

Según Ibáñez et al. (2009) los preservantes hidrosolubles:

- Son inodoros;
- Dejan la madera limpia para la manipulación;
- Pueden ser transportados como pastas o polvos para ser diluidos in situ;
- Tienen bajo costo y permiten pintar la madera después del tratamiento;
- Pueden combinarse con químicos retardantes del fuego.

Las desventajas de estos preservantes son:

- La madera tratada se hincha;
- Necesita secarse la madera después del tratamiento;
- Algunos tratamientos con sales no se fijan químicamente en la madera y se lixivian;
- Algunos tratamientos imparten ligeras pérdidas en la fuerza y fragilidad

A principios del siglo XX, el cloruro de zinc ( $ZnCl_2$ ) fue ampliamente utilizado como preservante porque era más barato que la creosota a pesar de ser menos efectivo (Eaton y Hale, 1993). Es efectivo a pesar de lixiviarse y era muy económico a principio del siglo anterior; el zinc provenía del óxido generado en la calcinación del mineral de sulfuro de zinc (usado como fuente de azufre en la fabricación de ácido sulfúrico), así como de la chatarra de los baños calientes de galvanizado (Hartford, citado por Ibáñez et al., 2009). El uso del preservante decayó cuando cambió la tecnología de los procesos de obtención del mismo, y también por abarataarse la creosota.

En 1838 Boucherie patentó el tratamiento de la madera verde sin secar con sulfato de cobre ( $CuSO_4$ ) (Eaton y Hale, 1993). La solubilidad del  $CuSO_4$  permite una rápida penetración en la madera húmeda, pero en contacto con el suelo o en situaciones acuosas hay una pérdida significativa de su eficacia debido a su lixiviado, y además corroe los metales en contacto con la madera. El descubrimiento de Bruning a comienzos del siglo XX, de que las adiciones de cromo a las sales metálicas producían complejos insolubles dentro de la madera fue un gran avance en el desarrollo de los preservantes (Wilkinson, citado por Eaton y Hale, 1993).

Los preservantes cromo-cobre-arsénico (CCA) son actualmente aceptados como uno de los tratamientos más efectivos para la protección de la madera contra hongos, insectos y perforadores marinos, y se clasifican junto a

la creosota por su rendimiento en situaciones de alto riesgo; le confieren a la madera una vida útil de 30 años o más (Eaton y Hale, 1993).

Es utilizado en maderas en contacto con el suelo y en condiciones desfavorables como el agua salada. Ha sido ampliamente usado en India para tratar los durmientes de las vías de tren y en EE.UU. para postes, y al aplicarse, la madera queda de color verde.

Una de las características más importantes de los preservantes CCA, es la habilidad de fijación a la madera y su resistencia al lixiviado (Anderson et al., citados por Eaton y Hale, 1993). El proceso de la fijación química es complejo y no está completamente resuelto, pero en una serie de artículos publicados entre 1972 y 1975 de Dahlgren y Hartford, sugirieron que el proceso está relacionado a cambios de pH en la madera después del tratamiento (Eaton y Hale, 1993). La fijación del CCA depende de la reducción de  $\text{Cr}^{6+}$  a  $\text{Cr}^{3+}$  por los componentes de la madera con la subsecuente precipitación o adsorción de los complejos de cromo y cobre o cobre y arsénico sobre el sustrato madera (Ibáñez et al., 2009). Estas reacciones aumentan el pH de la madera y se forman complejos de  $\text{Cr}^{3+}$  de baja solubilidad con arsénico y posiblemente con cobre (Cooper et al., citados por Ibáñez et al., 2009). Las reacciones de adsorción de cobre y cromo en los componentes de la madera ocurre en minutos u horas, completándose en semanas (Lebow, citado por Ibáñez et al., 2009). En particular el  $\text{Cr}^{6+}$  reacciona en etapas rápidas que comienzan por una débil complejación por los carbohidratos de la madera (adsorción química), luego una reducción in situ que da paso a las complejaciones y precipitaciones con la lignina y la celulosa (Pizzi, citado por Ibáñez et al., 2009). De quedar un remanente de  $\text{Cr}^{6+}$  no reducido en la madera, este se lixivia.

Smith y Williams, citados por Eaton y Hale (1993), demostraron en un trabajo anterior que el cromo era crucial para el proceso de fijación y era el responsable de la fijación de la mayor parte del arsénico y el cobre.

Las maderas de coníferas tratadas apropiadamente con CCA han tenido buenos rendimientos en el servicio, mientras que, ciertas maderas de latifoliadas han fallado prematuramente por pudrición blanda.

La mala macrodistribución del CCA resultó en la distribución desigual del preservante dentro de muchas especies de madera de angiospermas, por lo que las fibras quedan desprotegidas contra la pudrición blanda (Eaton y Hale, 1993). Aquellas maderas de latifoliadas tratadas con CCA que funcionaron bien a campo, generalmente, tienen una distribución pareja a lo largo de la madera, particularmente en el área de las fibras (Eaton y Hale, 1993).

Además de los CCA, hay varios otros preservantes cúpricos que se comercializan hoy en día basados en la composición cobre-cromo (Tillot y Coggins, citados por Eaton y Hale, 1993). Algunos de ellos están más ampliamente utilizados en Europa e incluyen cobre-cromo-boro (CCB), cobre-cromo-fluoruro (CCF) y cobre-cromo-fósforo (CCP) (Eaton y Hale, 1993). Sin embargo, los compuestos de boro y fluoruro están sujetos a la lixiviación y no se fijan permanentemente en la madera (Eaton y Hale, 1993).

En América del Norte, los preservantes a base de cobre han sido formulados diluidos en hidróxido de amonio, el cual hace de transportador del preservante. El arsenato de cobre amoniacal (ACA) contiene cobre divalente y arsénico pentavalente disuelto en una solución de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) en agua, con ácido acético para ayudar en la solución (Eaton y Hale, 1993). Es aplicado por presión-vacío a la madera seca. Luego del tratamiento, el amoníaco se evapora dejando el cobre y el arsénico depositados en la madera con alta resistencia a ser lixiviados (Eaton y Hale, 1993). El uso de amoníaco aumenta la permeabilidad y flexibilidad de la madera por la hinchazón de las paredes celulares, y las soluciones amoniacaes de cobre, zinc y arsénico (ACZA) penetran profundamente en maderas difíciles de tratar. En ambos casos el amonio forma complejos con el cobre, con lo que reduce los efectos corrosivos del metal, a la vez que retarda la formación de precipitados de arseniato (Ibáñez et al., 2009). Son tóxicos para un amplio espectro de hongos de la podredumbre blanca (Ibáñez et al., 2009).

Otros sistemas con cobre usados pueden ser, borato de cobre amoniacal, carbonato de cobre amoniacal y compuestos de cobre de amonio cuaternario (ACQs), carboxilatos de cobre amoniacal (AmCCs), citrato de cobre amoniacal, ditiocarbamato de cobre amoniacal (Eaton y Hale, 1993).

A principios del siglo XX, Wolman en Alemania desarrolló el tratamiento de la madera con fluoruro de sodio, dinitrofenol, y mezclas de dicromato. El fluoruro es altamente móvil en madera húmeda y es un tóxico efectivo, pero su movilidad lo hace particularmente propenso a la lixiviación (Eaton y Hale, 1993).

El boro es un elemento universal que se encuentra ampliamente distribuido en el medio ambiente y es un componente normal de una dieta saludable (Lloyd, 1998). Se encuentra naturalmente en rocas, suelo y agua, está presente en el suelo en una concentración promedio de 10-20 ppm (Gentz y Grace, 2006), y siempre combinado con el oxígeno en compuestos llamados boratos, dado que el boro elemental no existe en la naturaleza.

Los boratos más conocidos son, el ácido bórico y el bórax, los cuales se utilizan como productos comerciales y para la síntesis de otros compuestos de

boro (Lloyd, 1998), son de bajo costo y no corroen metales. Especialmente el ácido bórico, el borato de zinc, y el octaborato disódico tetrahidrato, se consideran excelentes opciones para la preservación de la madera contra el ataque de insectos, y la descomposición por hongos y bacterias (Gentz y Grace, 2006).

El ácido bórico se presenta como incoloro, inodoro, en cristales transparentes o un polvo granular blanco (Lloyd, 1998). Es fácilmente soluble en agua, etanol y glicerol (Lloyd, 1998). El bórax es una sustancia cristalina blanca, soluble en agua y glicerol, pero insoluble en alcohol. Otros tres boratos de sodio comúnmente conocidos son: metaborato de sodio ( $\text{NaBO}_2$ ); perborato de sodio ( $\text{NaBO}_3 [4\text{H}_2\text{O}]$ ); y pentaborato de sodio ( $\text{Na}_2\text{B}_{10}\text{O}_{16}10\text{H}_2\text{O}$ ) (Lloyd, 1998).

El primer uso registrado de boro en la preservación es, probablemente, en el preservante de boro y cromo desarrollado por Wolman en 1913 (Lloyd, 1998). Dos décadas después de su introducción por Wolman, el boro se propuso como reemplazo del dicromato en el tratamiento ignífugo de la madera, ya que poseía propiedades fungicidas, insecticidas y retardantes de llama (Falck y Ketkar, citados por Lloyd, 1998).

El interés en los boratos como preservantes de madera también surgió en Australia, donde se recomendaron para la preservación de maderas de latifoliadas susceptibles a *Lyctus spp.*, destinadas a ser utilizadas como madera contrachapada (Cummins, citado por Lloyd, 1998). El Laboratorio de Investigación de Productos Forestales de Australia encontró que el tratamiento con ácido bórico hizo a la albura inmune al ataque (Hunt y Garrat, Cockroft y Levy, citados por Lloyd, 1998). Las primeras investigaciones llevadas a cabo en Europa se concentraron principalmente en los problemas causados por *Hylotrupes spp.* y *Anobium spp.* (Kaltwasser, citado por Lloyd, 1998).

También se ha demostrado eficacia contra las termitas (Lloyd, 1998). Se han obtenido buenos resultados por varios investigadores, tanto a campo como en laboratorio (Cockroft y Levy, citados por Lloyd, 1998). Los boratos no tienen cualidades repelentes, por lo que permite que las termitas vayan y "prueben" la madera tratada (Lloyd, 1998). Dicha degustación o "pastoreo" puede permitir un cierto daño cosmético muy ligero, pero no puede resultar en una falla estructural de las maderas de construcción (Lloyd, 1998).

La eficacia de los boratos contra la descomposición de madera por basidiomicetes se ha demostrado en servicio y en laboratorio por muchos investigadores, y está aceptada (Carr, citado por Lloyd, 1998). Hasta el momento, no se ha reportado que los hongos descomponedores de madera

sean tolerantes a los boratos en una retención normal del preservante (Dickinson y Murphy, citados por Lloyd, 1998).

El boro en altas concentraciones es efectivo contra bacterias, hongos e insectos (Lloyd, 1998), además de actuar como retardante del fuego a concentraciones superiores al 8 % en peso (LeVan y Tran, Barrett, citados por Lloyd, 1998). La toxicidad por boro en los hongos provoca efectos, como la detención del crecimiento de las hifas, peritecios y ascosporas explican Bowen y Gauch, citados por Lloyd (1998) y el fracaso de los gametos para dividirse (Zittle, citado por Lloyd, 1998).

Rainer, citado por Ibáñez et al. (2009) indicó que estudios toxicológicos y ecotoxicológicos demuestran que los boratos son mucho menos tóxicos a los mamíferos y al ambiente que la mayoría de los preservantes comunes, y los niveles que se pueden utilizar en madera tratada permiten boratos altamente eficaces como preservantes de madera (Lloyd, 1998). Actualmente, los compuestos de boro son unos de los más seguros, no se han producido muertes ni otros efectos nocivos (Lloyd, 1998); y cuando se usan de forma apropiada, son biocidas rentables (Gentz y Grace, 2006). La toxicidad en general es baja para los mamíferos e invertebrados, debido a la rápida excreción del exceso de boro por los riñones (Lloyd, citado por Gentz y Grace, 2006).

El principal método de aplicación de los preservantes de boro es por difusión en la madera verde (Eaton y Hale, 1993). Esto se debe a que el boro se mueve en la madera por difusión, de regiones de alta concentración a las de baja a través del agua libre e higroscópica de la madera (Ibáñez et al., 2009). La profundidad de penetración del borato en la madera, aumenta con el tiempo de almacenamiento (Ra et al., citados por Ibáñez et al., 2009). La velocidad de lixiviación del boro disminuye con una disminución del gradiente de concentración, pero continúa hasta una pérdida total del boro, por lo que no es adecuado en aplicaciones donde la madera esté en contacto con el suelo o haya acumulaciones de agua. Para que los compuestos de boro logren un uso generalizado como preservantes, el tratamiento químico debe reducir notablemente la cantidad de lixiviación de la madera tratada (Furuno et al., 2002).

Este inconveniente se ha superado mediante el uso de formulaciones más complejas, donde el boro es sólo un ingrediente activo en una formulación que contiene dos o más (Lloyd, 1998). Este es particularmente el caso del cobre-cromo-boro (CCB), el cual es utilizado para aplicaciones al exterior. La madera tratada con borato de zinc muestra una buena resistencia a la lixiviación (Furuno et al., 2002). Sin embargo, debido a su baja solubilidad en agua, no

puede impregnar la madera; pero se puede rociar el polvo de borato de zinc sobre la superficie de la misma (Furuno et al., 2002).

#### 2.4. TOXICIDAD DEL COBRE-CROMO-ARSÉNICO (CCA)

En Uruguay el CCA es el preservante más utilizado a nivel industrial y la dificultad de su sustitución por razones económicas ha conducido a las autoridades ambientales a promover el uso de las buenas prácticas para minimizar los posibles impactos negativos sobre el ambiente y las personas (Dieste, 2014).

En EEUU el uso del CCA dominó el mercado de impregnación de madera desde 1970 a 2004, año en el que su uso se reguló fuertemente para prevenir daños ambientales (Dieste, 2014).

El arsénico y el cromo pueden ser tóxicos para los seres humanos, y los tres metales pueden causar un daño ambiental relevante (Fields, 2001). De las 275 principales sustancias peligrosas enumeradas por la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades presentes en la Agencia de Protección Ambiental (EPA) basadas en la frecuencia, toxicidad y la exposición humana, el arsénico se clasificó primero y decimosexto el hexavalente de cromo en el año 1997 (Fields, 2001). El  $\text{Cr}^{6+}$  es un agente oxidante fuerte, cancerígeno humano y mutagénico (Ibáñez et al., 2009).

El cobre, excepto en dosis extremadamente altas, no se considera tóxico para los seres humanos (Fields, 2001). Los otros dos metales son más problemáticos, donde el arsénico consigue la mayor atención por parte de los ambientalistas y los profesionales de la salud (Fields, 2001). La ingesta de una pequeña dosis de arsénico inorgánico (70-170 miligramos) es mortal para los humanos (Fields, 2001). Aunque una pequeña cantidad de arsénico ingerida puede ser fatal, las cantidades de arsénico encontradas en la superficie de la madera tratada con CCA son mil veces menores que una dosis potencialmente fatal (Fields, 2001). Aun así, el arsénico inorgánico es clasificado como un carcinógeno humano reconocido por el Programa Nacional de Toxicología y otras agencias federales (Fields, 2001). El arsénico ha sido considerado un posible carcinógeno desde finales de 1800, cuando se desarrollaron un número inusual de tumores en la piel de pacientes que fueron tratados con compuestos de arsénico (Fields, 2001). Estudios más recientes lo vinculan con cánceres de vejiga, riñón, nasal, hígado, pulmón y de piel (Fields, 2001).

### 2.4.1. Lixiviación

Este fenómeno ocurre en dos situaciones: 1) la madera en servicio expuesta al ambiente; 2) la madera enterrada en rellenos, en los que el agua de lluvia entra en contacto con la madera tratada (Jambeck et al., citados por Dieste, 2014). Si bien la primera situación es relevante, especialmente en casos en los que la reacción de fijación es sub-óptima o en madera tratada con varios años en servicio, la segunda presentación del fenómeno provocó, en países avanzados tecnológicamente, la restricción (EEUU, Australia) o directamente la prohibición del uso de madera tratada con CCA (Dinamarca, Japón) (Townsend et al., citados por Dieste, 2014). El mayor riesgo es la lixiviación de arsénico de la madera tratada (Dieste, 2014).

La madera tratada con CCA en servicio libera arsénico al ambiente en niveles que representan un riesgo de contaminación de las fuentes de agua y del suelo. Esto ocurre debido a la pérdida de la fijación con cromo, y a la degradación abiótica de la madera (erosión y lavado por escurrimiento) (Dieste, 2014). En el sur de Florida, con un clima subtropical comparable al de Uruguay, se pierde 5% del arsénico en el primer año de servicio de la madera (Hasan et al., citados por Dieste, 2014). La concentración de arsénico en el agua de escurrimiento disminuye con el tiempo, pero el químico se acumula en el suelo (Dieste, 2014). En muestras de suelo obtenidas junto a madera tratada con CCA, se midieron concentraciones de arsénico en el suelo a los seis meses de 4.5 mgkg<sup>-1</sup>, aumentado hasta 25 mgkg<sup>-1</sup> a los tres años (Dieste, 2014). Como referencia, en el suelo libre de madera tratada con CCA la concentración de arsénico es 0.3 mgkg<sup>-1</sup> (Dieste, 2014). La mayor contaminación ocurre en los primeros 25 cm de suelo, donde se concentra el 42% del arsénico (Dieste, 2014). Se reporta que 13% del arsénico y 1.4% del cromo originalmente presente en la madera se lixivian al ambiente a los tres años de puesta en servicio (Shibata et al., citados por Dieste, 2014).

El arsénico presente en madera tratada con CCA y con años de exposición al medio se transforma a una forma más móvil en el ambiente, y, por lo tanto, con mayor potencial contaminante (Dieste, 2014). Los resultados de experimentos de laboratorio de lixiviado de madera tratada con CCA y expuesta al ambiente superaron el límite regulatorio de EEUU para que una solución de arsénico sea considerada un residuo peligroso: 5 mgL<sup>-1</sup> (Townsend et al., citados por Dieste, 2014).

Cuando el CCA se lixivia, algo del arsénico queda en la superficie de la madera, lo que puede causar una variedad de problemas de salud si es tocado (Fields, 2001). Tocar el arsénico puede causar lesiones en la piel, úlceras de la piel, y conjuntivitis, según EPA (Fields, 2001). Aunque el contacto dérmico con

el arsénico o el cromo no se cree que causa cáncer u otra enfermedad fatal, los expertos en salud advierten que la transferencia de la mano a la boca, lo cual es especialmente común entre los niños pequeños, puede resultar en la ingestión de los productos químicos cancerígenos (Fields, 2001).

#### 2.4.2. Normativa de calidad de impregnación y restricciones en el uso de madera tratada

Debido a la toxicidad de la madera tratada con CCA, existe una tendencia global creciente a restringir su uso (Wagenführ y Scholz, Ibáñez et al., citados por Dieste, 2014). Hill, citado por Dieste (2014) estima que una prohibición total ocurrirá en los próximos años; y que los protectores de madera se basarán en metales de baja toxicidad, tales como el cobre y el zinc, y en biocidas orgánicos.

Según la WPA, citada por Dieste (2014) desde 2007 está prohibido el ingreso de madera tratada con CCA a Europa. Asimismo, la utilización de madera tratada con CCA en los procesos de producción de alimentos tiene el riesgo potencial de transformarse en una limitante para la comercialización (Dieste, 2014).

En Uruguay no existen restricciones para el uso de madera tratada con CCA, está permitido su empleo a cualquier retención y en cualquier uso (Dieste, 2014).

#### 2.4.3. Disposición final de madera tratada con CCA

Es necesario considerar que la madera tratada con CCA tiene una vida útil de 8 a 10 años para uso residencial y 25 a 50 años en usos industriales (Jambeck et al., Coudert et al., citados por Dieste, 2014). Una vez cumplida la vida útil, el producto de madera se transforma en un residuo que debe ser desechado con el mínimo impacto ambiental (Dieste, 2014).

La producción de CCA y su transporte están regulados estrictamente por normas internacionales, la impregnación está sujeta al control de los fabricantes y de las instituciones públicas competentes (Dieste, 2014). La puesta en servicio se hace de acuerdo a las especificaciones del producto, sin embargo, en la última fase, la disposición final del producto, todos los anteriores controles dejan de operar: actualmente en Uruguay la disposición final de madera tratada con CCA, obtenida como residuo de demolición o construcción, se desecha sin consideraciones especiales, con el consecuente aumento de la concentración de cobre, cromo y arsénico en el ambiente (Dieste, 2014).

Asimismo, internacionalmente la regulación del contenido de cobre, cromo y arsénico admisible en suelos y aguas se vuelve progresivamente más exigente (Cooper, Hill, citados por Dieste, 2014).

#### 2.4.4. Situación en Uruguay

La disposición final de madera tratada con CCA representa un problema ambiental complejo debido al contenido de arsénico y cromo en la madera que, inexorablemente, se liberará al ambiente (Dieste, 2014).

En Uruguay la disposición final de residuos está regulada con la Ley General de Protección del Ambiente No. 17.283 del Poder Legislativo de 2012 según Dieste (2014). De acuerdo al “Reglamento de gestión de residuos sólidos industriales y asimilados” (decreto No. 182/013) en Uruguay son considerados residuos Categoría 1 aquellos con un contenido de sustancias muy tóxicas o carcinogénicas superiores a 0.1% (Dieste, 2014). La normativa europea clasifica al arsénico como una sustancia muy tóxica y carcinogénica (1A) y al cromo como carcinogénico (1B) (Dieste, 2014).

Si se considera madera de *Pinus taeda* cultivado localmente, con una densidad de  $390 \text{ kgm}^{-3}$  (O'Neill et al., citados por Dieste, 2014), y tratado con CCA a una retención de  $4 \text{ kgm}^{-3}$  y  $9.6 \text{ kgm}^{-3}$ , determinada gravimétricamente y niveles de absorción similares a los presentados por Solo-Gabriele et al., citados por Dieste (2014), la concentración de arsénico sería 0.19% y 0.44%, respectivamente. A su vez, la de cromo sería 0.21% y 0.49%, respectivamente (Dieste, 2014). Por lo tanto, la madera tratada con CCA debería ser considerada un residuo peligroso (Dieste, 2014).

#### 2.4.5. Alternativas para la disposición de madera tratada con CCA

La disposición final de madera tratada con CCA es un problema en muchos de los países en los que este protector se utiliza masivamente (Dieste, 2014). De acuerdo al sistema de clasificación de residuos de la Comunidad Europea, la madera tratada con CCA es un material peligroso (Helsen y Van den Bulck, citados por Dieste, 2014).

Estudios sobre la disposición final de madera tratada con CCA identifican los siguientes destinos como los de mejor prognosis (Cooper, Helsen y Van den Bulck, Walker, citados por Dieste, 2014):

- 1) compuestos cemento-madera
- 2) combustión con emisión de gases controlada y tratamiento de cenizas

- 3) relleno de seguridad (con protección física para evitar la lixiviación de metales tóxicos a suelos y cursos de agua)
- 4) reciclado en nuevos usos

Según Dieste (2014), las dos alternativas de disposición final de madera tratada con CCA, que tienen más posibilidades de ser implementadas en Uruguay son, el relleno de seguridad y la combustión con emisión de gases controlada y tratamiento de cenizas.

#### 2.4.6. Tecnologías alternativas al tratamiento de biocidas químicos

La percepción que el consumidor final tiene de productos químicos biocidas, tal como el arsénico, es extremadamente negativa y se percibe que en el futuro, esta percepción, lejos de disminuir, se intensificará (Dieste, 2014). Dado que el uso de madera tratada con CCA está restringido o prohibido en muchos países explica Walker, citado por Dieste (2014), es plausible considerar que el uso de madera tratada con CCA en contacto con personas, animales o alimentos se transforme en una barrera comercial para productos que exporta Uruguay (Dieste, 2014). La tendencia mundial de restringir o prohibir el uso del CCA es clara (Dieste, 2014).

La sustitución del tratamiento con CCA en los usos en los que la madera estará en contacto con personas, animales o alimentos es técnicamente posible (Dieste, 2014). La protección de madera con alternativas al tratamiento con CCA se puede resumir en cuatro puntos (Dieste, 2014):

1. Secado por debajo de 15% de contenido de humedad (base seca)
2. Protección por diseño
3. Impregnación en profundidad
4. Modificación de madera (térmica y química)

Los productos de CCA ahora están siendo reemplazados por toda Europa y en otras partes del mundo, debido a que las autoridades insisten en su eliminación del mercado y los boratos son el sustituto obvio (Lloyd, 1998). En la búsqueda continua de preservantes de madera más amigables, los boratos también se utilizan en la próxima generación de sistemas de protección exteriores de madera, donde son preferidos antes que otros ingredientes activos menos deseables (Lloyd, 1998). Estudios a nivel de laboratorio han demostrado que los boratos tienen potencial fungicida frente a hongos de pudrición blanda y marrón, además de potencial insecticida frente a termitas (Ibáñez et al., 2012), restando evaluar el éxito insecticida frente a otros insectos xilófagos, como por ejemplo *Anobium punctatum*.

## 2.5. HIPÓTESIS

La solución amoniacal de borato de zinc muestra efectividad insecticida como preservante de madera frente a *Anobium punctatum* (Coleóptera: Anobiidae).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para poder evaluar el efecto insecticida de una solución amoniacal de borato de zinc frente a *Anobium punctatum*, se utilizaron 4 métodos de impregnación en madera de pino y álamo, para posteriormente determinar el porcentaje de mortalidad bajo los diferentes métodos de impregnación.

El ensayo se realizó de acuerdo a la norma BS EN 48:2005 (BSI, 2005). Se utilizaron probetas de madera de *Pinus taeda* y *Populus sp.* Las probetas fueron de albura, secas y sus dimensiones, de 10,0 x 5,0 x 3,0 cm. Se les midió el tamaño (largo, ancho, espesor), el peso (0.01g), y se las nombraron y numeraron de acuerdo a la especie (1P= probeta 1 de pino, 1A= probeta 1 de álamo).

#### 3.1. IMPREGNACIÓN

Se contó con una única concentración de solución amoniacal de borato de zinc; un metaborato de zinc constituido por 33% de ZnO y 17% de B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, en una solución amoniacal al 28% de amonio.

Los diferentes métodos de impregnación con la solución amoniacal de borato de zinc del ensayo fueron: pincelado, inmersión, doble vacío, y vacío-presión-vacío.

Para cada método de impregnación con el preservante de estudio, se utilizaron cinco probetas de cada especie.

La inmersión consistió en sumergir las probetas de madera en un tanque con la solución aproximadamente unos 2 minutos de un lado y 2 minutos del otro.

Tanto el método de doble vacío como el de vacío-presión-vacío se realizaron en un autoclave (figura 7). El vacío-vacío consistió en realizar un vacío inicial de aproximadamente 30 minutos, con el objetivo de sacar todo el aire dentro de la madera. Posteriormente se introdujo el conservante de madera y se mantuvo el autoclave lleno durante una hora. Se entiende que el preservante entra en la madera por diferencias de presión. Finalmente se sacó toda la solución y se realizó un vacío final de aproximadamente 20 minutos. En el caso del método vacío-presión-vacío, se realizó un vacío inicial de 30 minutos, luego una presión durante una hora, y finalmente un vacío de 30 minutos.

**Figura 7.** Autoclave de vacío-presión



Inmediatamente después de la impregnación, las probetas fueron pesadas para calcular la retención del conservante. A partir de los distintos tratamientos de impregnación se consiguieron diferentes retenciones del preservante en la madera (ver anexo tabla 1 y 2). La retención se calcula como la diferencia de peso de la probeta después de la impregnación menos el peso antes de ser impregnada, dividiéndola por el volumen de la misma.

Las probetas de madera impregnadas fueron envueltas en nylon y se mantuvieron así por una semana para facilitar la difusión del preservante en la madera, luego se almacenaron al aire libre por un mismo período de tiempo. Posteriormente se llevaron a estufa a 60°C durante dos o tres días aproximadamente, y por última instancia, las probetas fueron a una cámara con circulación de aire controlada a  $(21 \pm 2)$  °C, y a una humedad relativa  $(80 \pm 5)$  %.

Debido a las propiedades irritantes y fuerte olor del amoníaco, para el procedimiento de impregnación fue necesario un equipo de protección personal, como guantes de plástico grueso, antiparras, y una máscara con cartucho para retención.

### 3.2. CRÍA E INOCULACIÓN DE *ANOBIUM PUNCTATUM*

El material tratado y adecuadamente acondicionado fue inoculado con larvas de *Anobium punctatum*, de acuerdo a la norma BS EN 48:2005 (BSI, 2005). Se ensayaron sólo larvas, porque las larvas de *Anobium* son las que

producen los mayores daños en la madera, alimentándose de ellas y haciéndola perder estructura y rigidez.

Las larvas a inocular con *Anobium* se extrajeron a partir de muebles atacados. Para la identificación de muebles infestados por *Anobium punctatum*, se observaron los daños en los mismos, principalmente el diámetro de los orificios de emergencia causados por el insecto adulto y el tipo de aserrín.

Para la inoculación de las larvas, las probetas de madera fueron perforadas (figura 8) de acuerdo a la norma BS EN 48:2005 (BSI, 2005). Se realizaron 6 orificios de aproximadamente 6mm de profundidad en las caras transversales en dos filas separadas a 10mm. Los orificios se separaron entre sí a 15mm en la fila.

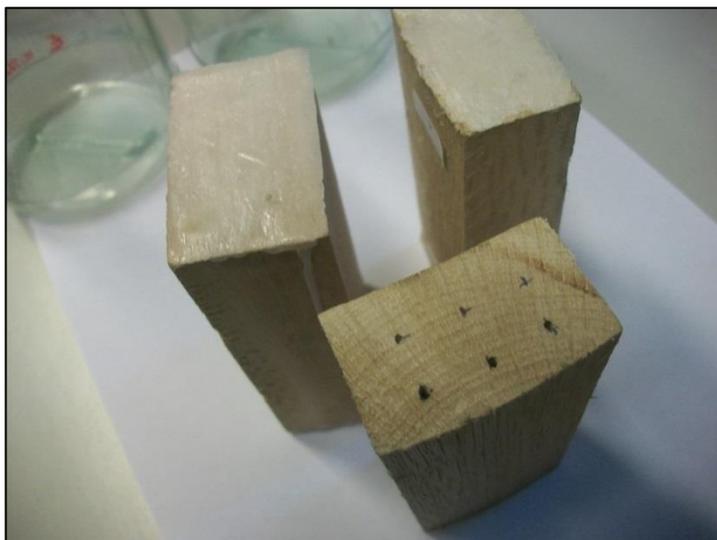
Las larvas para ser inoculadas debían estar vivas y sin presencia de ácaros mediante observación en lupa binocular.

Los muebles atacados se destruyeron con martillos y formones. La larva colectada fue inoculada con la cabeza orientada al fondo del agujero de la probeta de madera. Dichas probetas inoculadas, se sellaron con parafina para evitar que las larvas escapen (figura 9). Finalmente cada probeta se reservó en un frasco cerrado (figura 10) y se almacenaron en una habitación con circulación de aire controlada a  $(21 \pm 2)$  °C, y a una humedad relativa  $(80 \pm 5)$  %. El cultivo de las probetas inoculadas con las larvas fue de 12 semanas.

**Figura 8.** Probetas perforadas



**Figura 9.** Probetas selladas con parafina



**Figura 10.** Probetas inoculadas en frascos



### 3.3. EXAMEN DE LAS PROBETAS

Finalizado el período de incubación, las probetas se cortaron cuidadosamente a fin de determinar en qué medida la madera fue atacada por las larvas de *Anobium punctatum*. Se contabilizó y registró el No. de larvas vivas y muertas, así como el avance de las mismas en las probetas de madera de álamo y pino.

**Figura 11.** Probetas cortadas con formón y martillo



#### 3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para poder comparar los resultados obtenidos, se recurrió al análisis estadístico de los mismos. Existen dos tipos de estadísticas, la paramétrica y la no paramétrica. La estadística paramétrica hace muchas suposiciones y una de ellas es que asume que los valores de los diferentes grupos tienen una distribución normal, es decir que los mismos se distribuyen de forma simétrica respecto a la media. En cambio, la estadística no paramétrica no hace supuestos distribucionales.

Los datos no presentaron una distribución normal, por lo tanto fueron estudiados mediante la estadística no paramétrica.

Las pruebas chi-cuadrado son un grupo de contrastes de hipótesis que sirven para comprobar afirmaciones acerca de las funciones de probabilidad de una o dos variables aleatorias. Estas pruebas no pertenecen a la estadística paramétrica dado que no establecen suposiciones restrictivas en cuanto al tipo de variables que admiten, ni en lo que refiere a su distribución de probabilidad ni en los valores y/o el conocimiento de sus parámetros. En este caso se realizó la prueba de chi-cuadrado para averiguar si dos variables eran independientes

estadísticamente, por lo que se hizo un chi-cuadrado de independencia o contingencia.

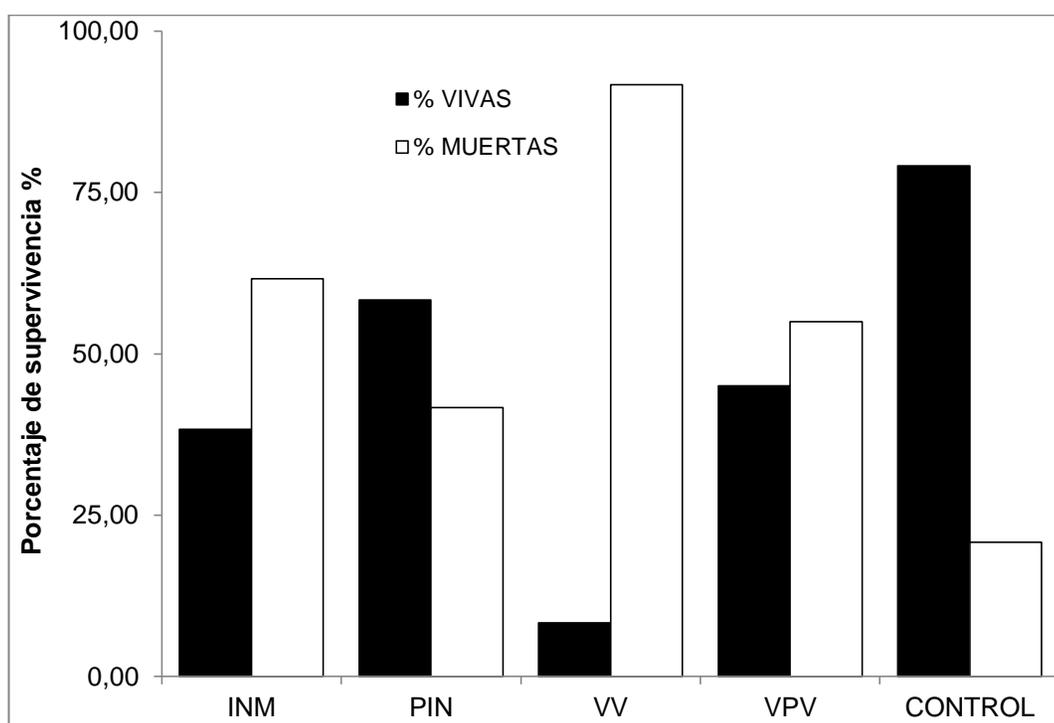
El test de Kruskal-Wallis es un método no paramétrico para probar si un grupo de datos proviene de la misma población. Intuitivamente es idéntico al ANOVA con los datos reemplazados por categorías. Ya que es una prueba no paramétrica, la prueba de Kruskal-Wallis no asume normalidad en los datos, en oposición al tradicional ANOVA. Sí asume, bajo la hipótesis nula, que los datos vienen de la misma distribución.

El Dunn's Multiple Comparison Test se realiza para comparar entre las variables, en este caso los diferentes métodos de aplicación del preservante, y determinar diferencias.

#### 4. RESULTADOS

En la figura 12 se observa la variabilidad en la supervivencia de las larvas de *Anobium punctatum* según el método de aplicación del preservante en la madera.

**Figura 12.** Porcentaje de larvas vivas y muertas de *Anobium punctatum* en probetas de álamo, en función de las diferentes formas de aplicación del borato de zinc amoniacal. INM (inmersión), PIN (pincelado), VV (vacío-vacío), VPV (vacío-presión-vacío).



En la gráfica (figura 12) se observa que en el control es donde se registra el mayor porcentaje de larvas vivas, así como también el menor porcentaje de larvas muertas.

Mediante una prueba de chi-cuadrado se evidencia que los cuatro tratamientos con el preservante difieren significativamente del control ( $X^2_4=47.347$ ,  $p<0.001$ ).

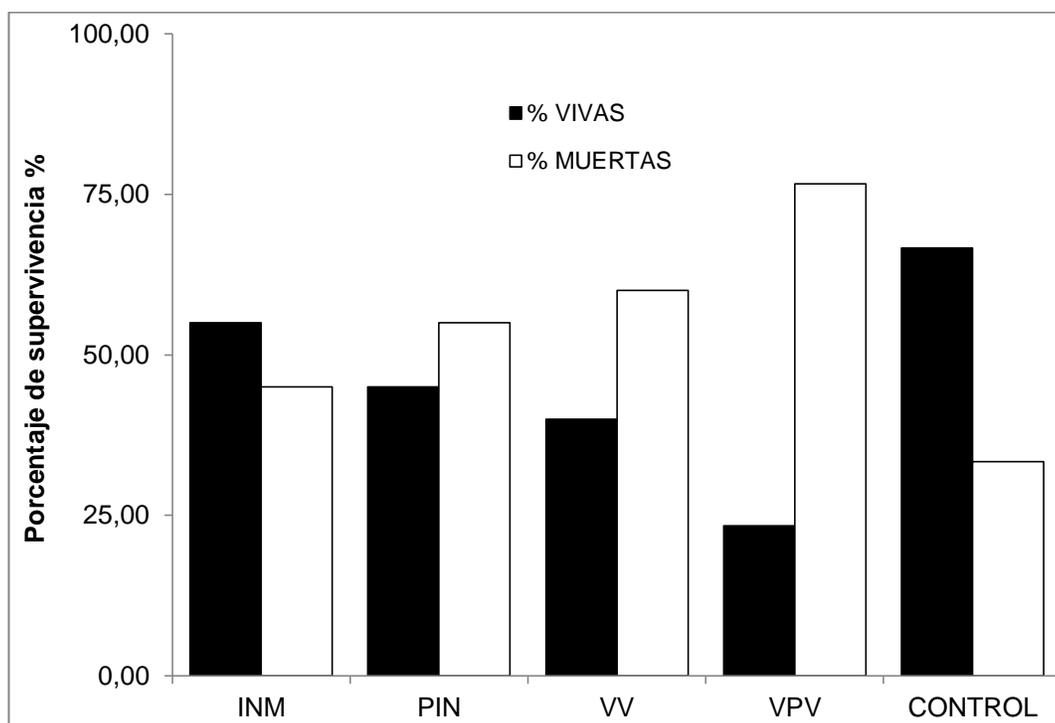
##### 4.1.

Asimismo, dentro de los cuatro tratamientos, se puede observar que el de vacío-vacío es el que presenta el mayor porcentaje de mortalidad de larvas de *Anobium punctatum* (91.67 %) y el menor porcentaje de larvas vivas (8.33

%). Esto es comprobado por medio de pruebas de chi-cuadrado realizadas entre tratamientos, las cuales permiten demostrar estadísticamente que el método de vacío-vacío se separa respecto al resto de manera muy significativa (ver anexo tabla 12).

De los resultados del test de chi-cuadrado se desprende también que la protección a la madera en el tratamiento de pincelado es significativamente inferior respecto al resto, mientras que no hay diferencias significativas entre la inmersión y el método de vacío-presión-vacío.

**Figura 13.** Porcentaje de larvas vivas y muertas de *Anobium punctatum* en probetas de pino, en función de las diferentes formas de aplicación del borato de zinc amoniacal. INM (inmersión), PIN (pincelado), VV (vacío-vacío), VPV (vacío-presión-vacío).



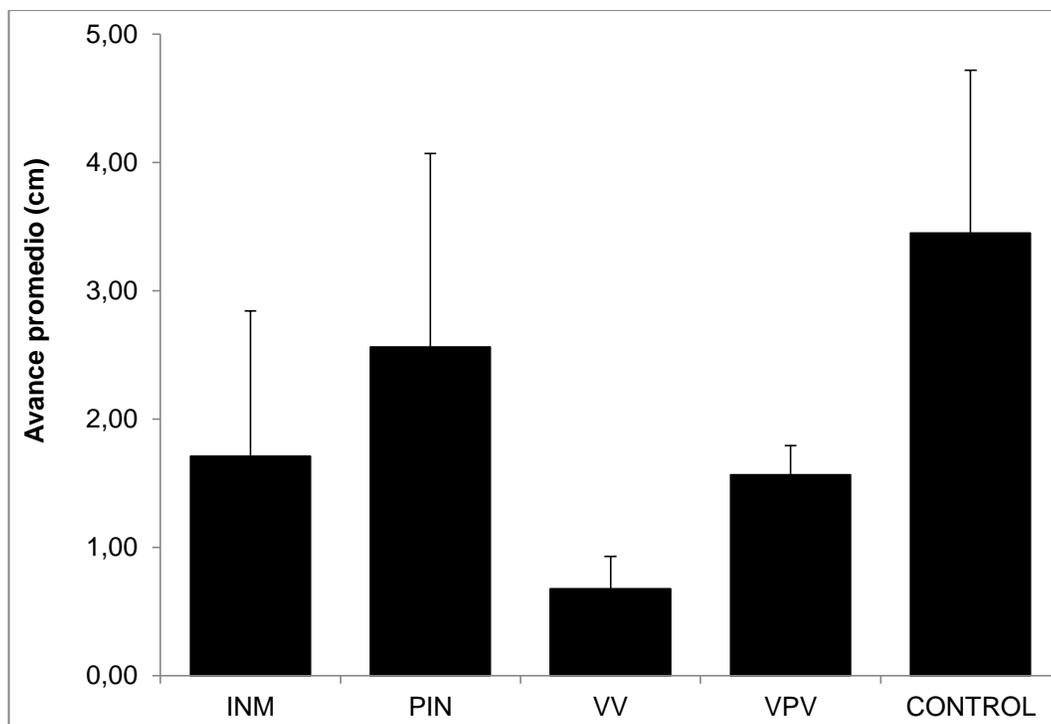
En el gráfico correspondiente a las probetas de pino (figura 13) se observa el mayor porcentaje de larvas vivas y por consiguiente el menor porcentaje de larvas muertas en el control.

Para comprobar esta observación se realiza un test de chi-cuadrado el cual pone en evidencia que efectivamente los demás tratamientos se diferencian significativamente del control ( $X^2_4=16.055$ ,  $p=0.003$ ).

Del mismo modo se hacen pruebas de chi-cuadrado entre los tratamientos para ver diferencias entre los mismos. Los resultados de estas pruebas demuestran que el método de vacío-presión-vacío se diferencia significativamente de los demás tratamientos. En la gráfica se observa que presenta el menor porcentaje de larvas vivas (23.33 %) y el mayor porcentaje de larvas muertas de *Anobium punctatum* (76.67 %).

Asimismo, de los resultados del test se evidencia que no hay diferencias significativas entre la inmersión y el pincelado, mientras que tampoco hay diferencias significativas entre el pincelado y el método de vacío-vacío, si bien éste es significativamente mejor que la inmersión ( $p > 0.01$ ) (ver anexo tabla 13).

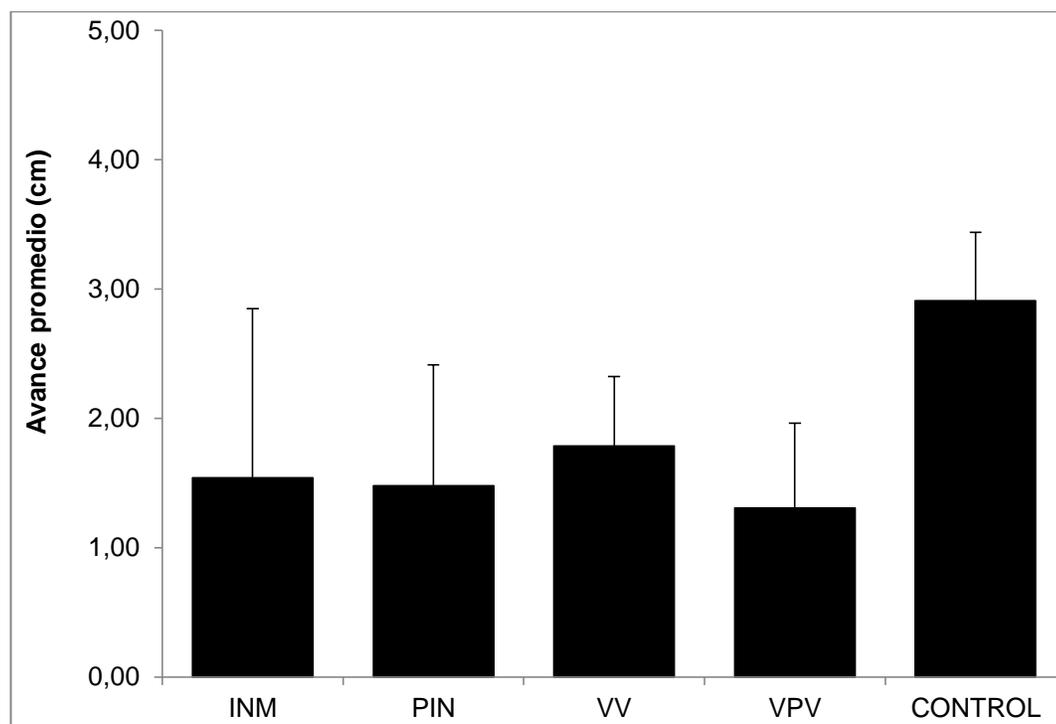
**Figura 14.** Avance promedio de larvas vivas y muertas de *Anobium punctatum* en probetas de álamo en función de los diferentes métodos de aplicación del borato de zinc amoniacal. INM (inmersión), PIN (pincelado), VV (vacío-vacío), VPV (vacío-presión-vacío).



A primera vista, el avance promedio de las larvas de *Anobium punctatum* más importante se da en el control (figura 14). Para comprobar que realmente es mayor el avance, se realizan pruebas estadísticas no paramétricas.

En primera instancia se realiza el Kruskal-Wallis Test, el cual evidencia una variabilidad significativa de las medianas en los 5 tratamientos ( $K_4=130.2$ ,  $p<0.0001$ ). Posteriormente se realiza el Dunn's Multiple Comparison Test para evidenciar diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. De los resultados de éste análisis se determina que, efectivamente el control se diferencia significativamente de los métodos de inmersión, vacío-vacío, y del método de aplicación por vacío-presión-vacío; mientras que no muestra diferencias significativas con respecto al tratamiento de pincelado. Por otra parte, de los resultados estadísticos también se evidencia que el método de aplicación por vacío-vacío se separa significativamente de los demás tratamientos, lo cual es visible en la figura 14.

**Figura 15.** Avance promedio de larvas vivas y muertas de *Anobium punctatum* en probetas de pino en función de los diferentes métodos de aplicación del borato de zinc amoniacal. INM (inmersión), PIN (pincelado), VV (vacío-vacío), VPV (vacío-presión-vacío).

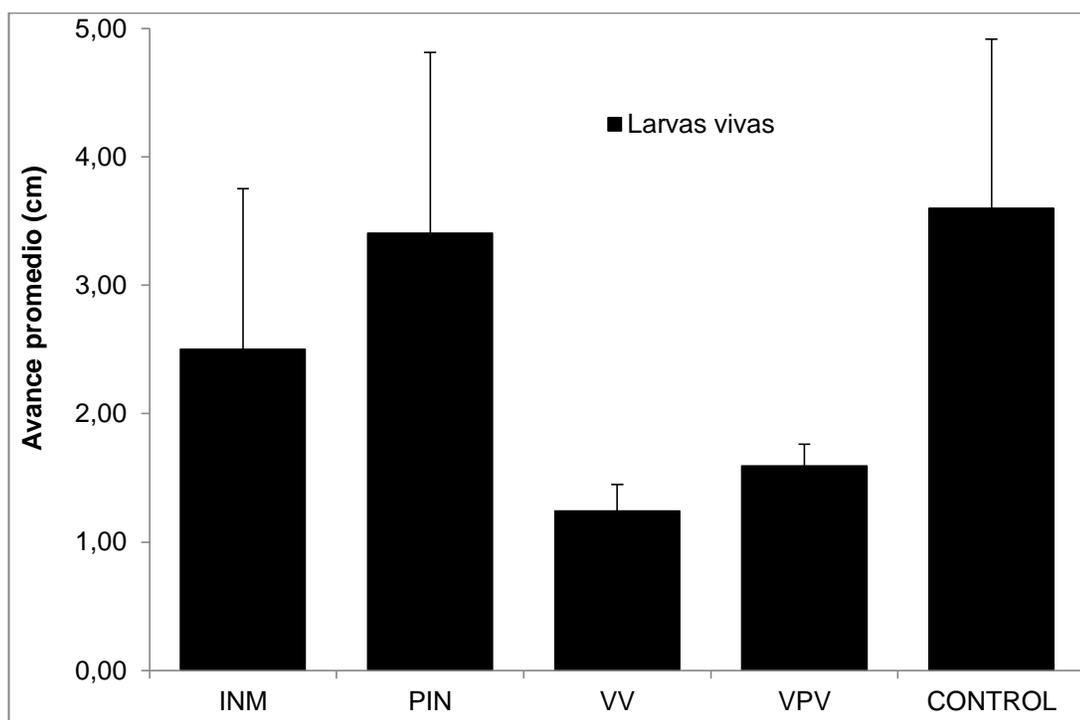


Al igual que en la figura 14, para evaluar los datos de los diferentes tratamientos y poder explicarlos, se realiza el Kruskal-Wallis Test, se verifica variabilidad entre las medianas de los tratamientos ( $K_4=38.09$ ,  $p<0.0001$ ) y posteriormente se realiza el Dunn's Multiple Comparison Test.

Los resultados del último análisis estadístico demuestran que el control difiere significativamente de los 4 tratamientos, dándose en el mismo el mayor avance promedio de larvas de *Anobium punctatum* como se observa en la figura 15.

Por otro lado no hay diferencias significativas entre los demás tratamientos a excepción del caso del método de vacío-vacío versus el método de vacío-presión-vacío, donde hay una diferencia significativa por más leve que sea, registrándose un menor avance en la aplicación del preservante por el método de vacío-presión-vacío.

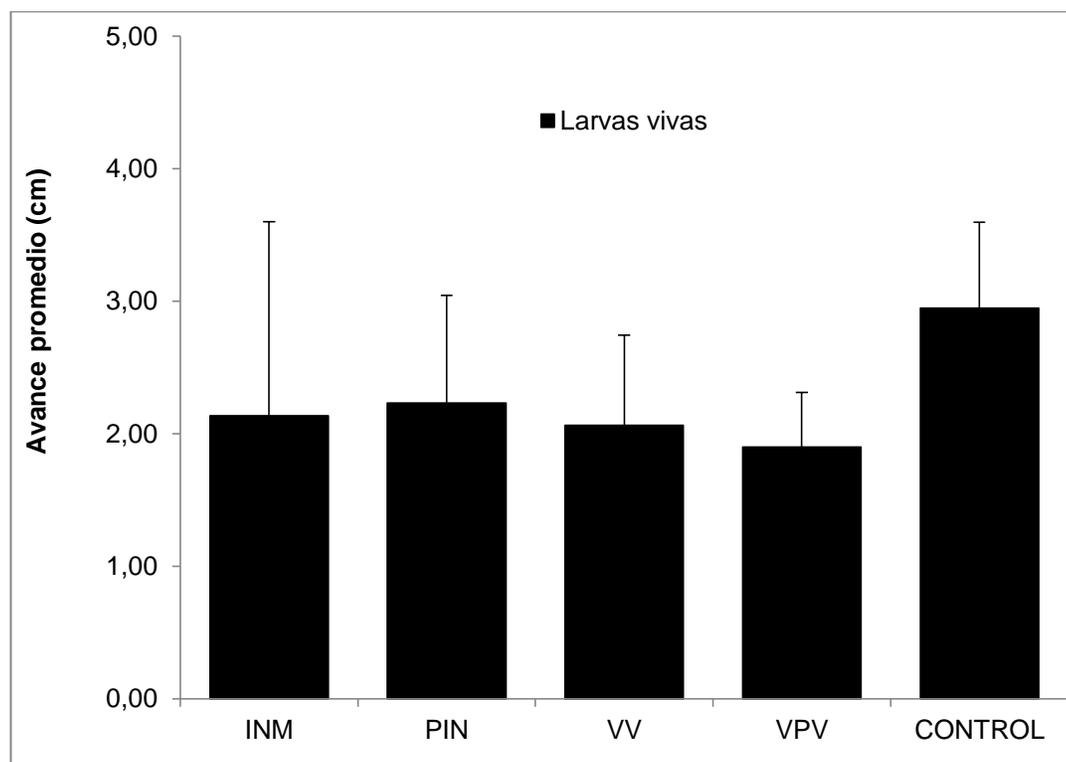
**Figura 16.** Avance promedio de larvas vivas de *Anobium punctatum* en probetas de álamo en función de los diferentes métodos de aplicación del borato de zinc amoniacal. INM (inmersión), PIN (pincelado), VV (vacío-vacío), VPV (vacío-presión-vacío).



Es de importancia precisar que para la inoculación de las larvas de *Anobium punctatum* se realizaron perforaciones en las probetas de madera de 6 mm de profundidad aproximadamente, por lo que habría un avance de larvas y por tanto daño en la madera a partir de galerías mayores a los 6 mm.

Para evaluar los datos, se realizan dos análisis estadísticos no paramétricos, en primera instancia, el Kruskal-Wallis test, el cual evidencia una variabilidad significativa entre todas las medianas ( $K_4=49.54$ ,  $p<0.0001$ ). Y en segunda instancia se realiza el Dunn's Multiple Comparison Test, el cual demuestra que los tratamientos de inmersión y pincelado no tienen diferencias significativas con respecto al control, mientras que los tratamientos de vacío-vacío y vacío-presión-vacío se diferencian significativamente del control y de los métodos de inmersión y pincelado. También se evidencia del análisis, que no hay diferencias significativas entre el método de vacío-vacío y el método de vacío-presión-vacío, así como tampoco hay diferencias significativas entre la inmersión y el pincelado.

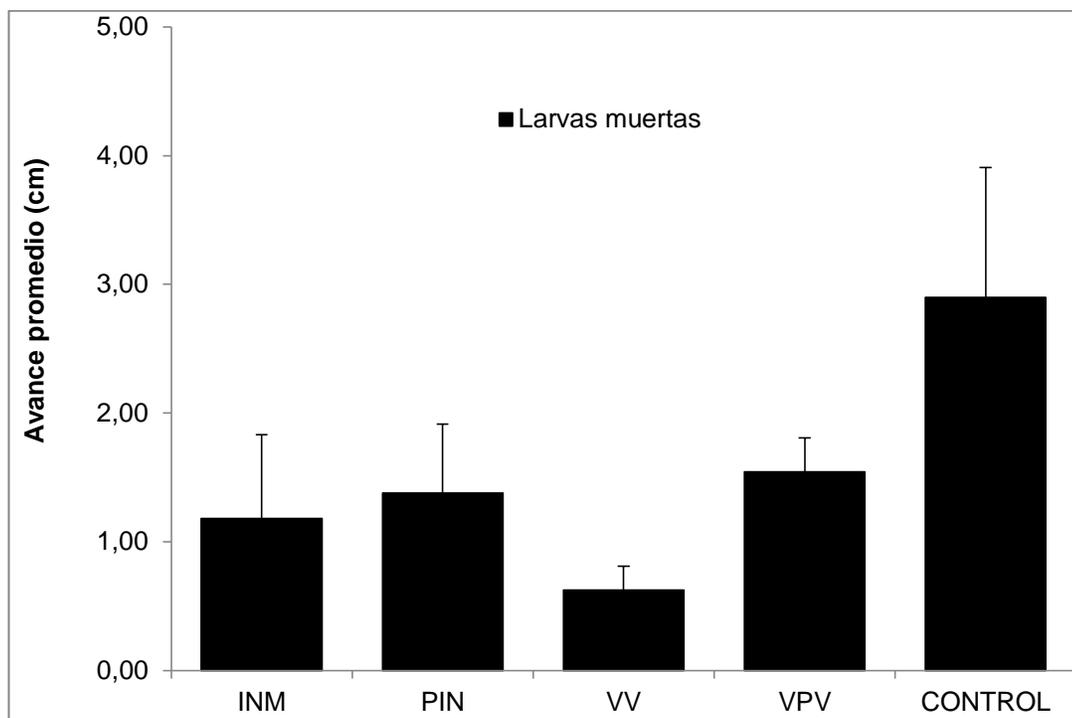
**Figura 17.** Avance promedio de larvas vivas de *Anobium punctatum* en probetas de pino en función de las diferentes formas de aplicación del borato de zinc amoniacal. INM (inmersión), PIN (pincelado), VV (vacío-vacío), VPV (vacío-presión-vacío).



Del mismo modo que en la figura 16, para evaluar los datos de los diferentes tratamientos y poder explicarlos, se realiza el Kruskal-Wallis Test, se verifica variabilidad entre las medianas de los tratamientos ( $K_4=19.29$ ,  $p=0.0007$ ) y posteriormente se realiza el Dunn's Multiple Comparison Test.

De los resultados del Dunn's Multiple Comparison Test se demuestra que, los cuatro tratamientos se diferencian significativamente del control, pero no hay diferencias significativas entre los métodos de impregnación (figura 17).

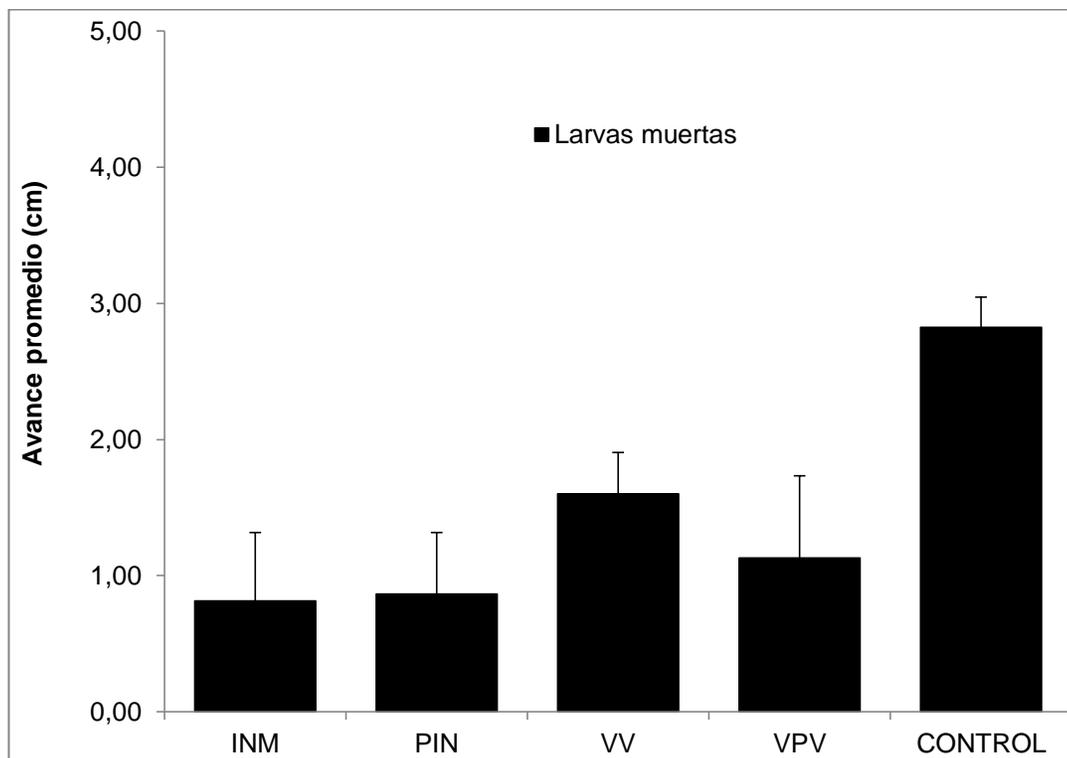
**Figura 18.** Avance promedio de larvas muertas de *Anobium punctatum* en probetas de álamo en función de los diferentes métodos de aplicación del borato de zinc amoniacal. INM (inmersión), PIN (pincelado), VV (vacío-vacío), VPV (vacío-presión-vacío).



Para evaluar los datos de los resultados del ensayo se realiza en primer lugar el análisis estadístico no paramétrico Kruskal-Wallis test, el cual demuestra una variabilidad significativa entre todas las medianas ( $K_4=105.3$ ,  $p<0.0001$ ), y posteriormente el Dunn's Multiple Comparison Test.

Este último análisis permite evidenciar que los cuatro tratamientos de impregnación se diferencian significativamente del control. Por otra parte los tratamientos de inmersión, pincelado y vacío-presión-vacío se diferencian significativamente del método de aplicación por vacío-vacío (figura 18). No hay diferencias significativas entre la inmersión, el pincelado y el tratamiento de vacío-presión-vacío.

**Figura 19.** Avance promedio de larvas muertas de *Anobium punctatum* en probetas de pino en función de las diferentes formas de aplicación del borato de zinc amoniacal. INM (inmersión), PIN (pincelado), VV (vacío-vacío), VPV (vacío-presión-vacío).



En primera instancia, los datos de los resultados se analizan mediante el Kruskal-Wallis test, donde se demuestra una variabilidad significativa entre las medianas de los tratamientos ( $K_4=69.29$ ,  $p<0.0001$ ) y a continuación se procede a analizar los datos por medio del Dunn's Multiple Comparison Test.

Los resultados del mismo permiten evidenciar que los cuatro tratamientos se separan del control de manera muy significativa, como se puede observar en la figura 19. Además los tratamientos de inmersión, pincelado y vacío-presión-vacío se diferencian significativamente del método de vacío-vacío. Entre la inmersión, el pincelado y el tratamiento de vacío-presión-vacío no hay diferencias significativas.

## 5. DISCUSIÓN

Es de esperarse resultados diferentes en la efectividad del borato de zinc amoniacal frente a *Anobium punctatum* en ambos tipos de madera, dado que las mismas difieren anatómicamente en su contenido celular; siendo el pino una gimnosperma o conífera, y el álamo una angiosperma o latifoliada.

Las gimnospermas presentan un leño homoxilado; es un leño simple y homogéneo formado esencialmente por traqueidas y radios parenquimáticos. Las traqueidas constituyen entre el 90 y 95 % de la madera y se encargan de la conducción de líquidos y del soporte mecánico, mientras que los radios ocupan 7% del volumen de madera y se encargan del almacenamiento de nutrientes.

Por otro lado las angiospermas poseen un leño complejo heteroxilado con varios tipos de células donde los vasos son los elementos conductores. Poseen traqueidas y fibras libriformes las cuales constituyen el 50 % de la madera, encargadas del soporte mecánico, elementos vasculares (30 % de la madera) encargados del transporte de líquidos, y células de reserva como las células parenquimáticas radiales y longitudinales.

Las células de gimnospermas y angiospermas difieren en forma y tamaño. Las traqueidas de las gimnospermas son considerablemente más largas que los elementos vasculares de las angiospermas. En latifoliadas se evapora más agua que en coníferas, por lo que el transporte de líquido debe ser más efectivo.

En general en la madera de coníferas la distribución de un preservante de madera es más homogénea por tener menor variación de células en la madera que en latifoliadas, dado que prácticamente las traqueidas constituyen el 90 o 95 % de la madera, mientras que en las latifoliadas, al haber una mayor variedad de células en la composición química de la madera, la distribución del preservante es más lenta y menos uniforme, concentrándose en algunos componentes de la madera más que en otros, por lo que sería esperable que en las probetas de pino el rendimiento del borato de zinc amoniacal frente a *Anobium punctatum* sea superior en comparación a las probetas de álamo.

Sin embargo, en las probetas de pino, el borato de zinc amoniacal es efectivo frente a larvas de *Anobium punctatum* únicamente cuando es aplicado mediante el método de vacío-presión-vacío realizado en autoclave, donde se alcanza una mortalidad mayor al 75 %.

Mientras que, en álamo el borato de zinc amoniacal es efectivo como insecticida frente a larvas de *Anobium punctatum*, cuando es aplicado tanto por

inmersión, vacío-presión-vacío o doble vacío. El método de vacío-vacío, realizado en autoclave se destaca de los demás, logrando una mortalidad superior al 90 %.

La mejor performance del borato de zinc amoniacal tanto en álamo como en pino, se da en las probetas impregnadas en autoclave. Los métodos más profesionales de impregnación, como son el método de doble vacío y el de vacío-presión-vacío realizados en autoclaves, conllevan un mayor costo operativo que los tratamientos de inmersión o pincelado, pero, por otra parte permiten una mayor retención del preservante en la madera y una mejor distribución del mismo, dando por consiguiente mejores resultados en cuanto al rendimiento del borato de zinc amoniacal en la madera.

Por otro lado, la impregnación por medio de la inmersión o el pincelado, logra una retención baja del preservante en la madera en comparación con métodos como doble vacío y vacío-presión-vacío. Además no permite una distribución uniforme del preservante en la madera, localizándose en la superficie de la misma sin penetrar en el interior; por lo que es de esperarse una baja mortalidad de larvas de *Anobium punctatum* y un ataque considerable cuando la madera es impregnada mediante inmersión o pincelado.

Al mismo tiempo, se comprueba que en ambos tipos de madera las probetas de control son las más atacadas en comparación con los tratamientos de inmersión, pincelado, doble vacío, y vacío-presión-vacío. En el control se da el mayor avance de larvas de *Anobium punctatum* y el menor porcentaje de mortalidad, permitiendo a las larvas alimentarse a voluntad y por tanto provocar daños severos en la madera. Esto es debido a que las probetas control son probetas de madera en su estado natural sin tratamiento alguno con el borato de zinc amoniacal, por lo que necesariamente tienen que ser más vulnerables al ataque por *Anobium punctatum* que los tratamientos de inmersión, pincelado, doble vacío y vacío-presión-vacío.

Por otro lado, surge la interrogante de la utilidad del borato de zinc amoniacal. No tenemos estudios que demuestren que el borato de zinc amoniacal repela al insecto adulto evitando la oviposición en maderas en servicio, como tampoco sabemos si en una eventual oviposición de la hembra, el borato de zinc amoniacal tenga efecto ovicida. Lo que si podemos saber es que sucede cuando hay larvas presentes en la madera.

En base a los resultados del ensayo, el borato de zinc amoniacal logra matar las larvas de *Anobium punctatum* y evitar el ataque y la penetración de las mismas en la madera, únicamente cuando el producto se aplica mediante el método de doble vacío realizado en autoclave en madera de álamo.

Sin embargo cuando el borato de zinc amoniacal es aplicado en la madera mediante inmersión o vacío-presión-vacío en álamo, y únicamente vacío-presión-vacío en pino, el preservante tiene efecto larvicida, pero no evita que las larvas de *Anobium punctatum* ataquen la madera y realicen galerías en la misma antes de morir.

Se entiende que hubo avance y por tanto daño en la madera a partir de los 6 mm de profundidad aproximadamente, por lo que el método de vacío-vacío en madera de álamo es el único que además de matar al insecto, impide que el mismo realice galerías en la madera antes de morir.

Así como en álamo, en la madera de pino los cuatro tratamientos se diferenciaron del control. Pero en el caso del pino, las larvas de *Anobium punctatum* provocaron daños antes de morir en todos los tratamientos.

Lo que se observa es que, si bien el borato de zinc amoniacal logra matar a las larvas, éstas provocan daños en la madera antes de morir a excepción del método de doble vacío en álamo.

Una manera de seguir el estudio, es probar la efectividad del borato de zinc amoniacal aplicado sobre la oviposición y la eclosión de los huevos.

## 6. CONCLUSIONES

En base a los resultados del ensayo realizado, se demuestra que el borato de zinc amoniacal es efectivo como insecticida frente a larvas de *Anobium punctatum* en ambos tipos de madera, cuando se aplica mediante los métodos de doble vacío y vacío-presión-vacío en autoclave

En madera de álamo el borato de zinc amoniacal alcanza una mortalidad de larvas de *Anobium punctatum* mayor al 90 % cuando el mismo es aplicado mediante el método de vacío-vacío en autoclave.

Mientras que en madera de pino el preservante logra una mortalidad de larvas mayor al 75 % cuando el borato de zinc amoniacal es aplicado mediante el método de vacío-presión-vacío en autoclave.

A pesar de que el borato de zinc amoniacal tiene efecto larvicida sobre *Anobium punctatum*, las larvas penetran en la madera y provocan daños antes de morir a excepción del método de doble vacío en álamo.

Se comprueba que los tratamientos realizados en autoclave como vacío-vacío y vacío-presión-vacío logran una retención mayor del preservante y una distribución uniforme del mismo en la madera dando mejores resultados en cuanto al control de larvas de *Anobium punctatum*.

Se confirma que en el control donde la madera está sin tratar, y por tanto más vulnerable al ataque de insectos xilófagos, es donde se da el mayor ataque de larvas de la especie *Anobium punctatum*.

## 7. RESUMEN

En este ensayo se pretendió analizar si el borato de zinc amoniacal es efectivo como insecticida. Para esto se utilizaron larvas de la especie *Anobium punctatum* (Coleoptera: Anobiidae). Se realizaron cuatro tratamientos con diferentes formas de aplicación del borato de zinc amoniacal: inmersión, pincelado, vacío-vacío, y vacío-presión-vacío además del control. Los tratamientos se realizaron en madera de álamo y en madera de pino. Las probetas de madera posteriormente se inocularon con larvas de *Anobium punctatum*. Para evaluar la efectividad insecticida del preservante de madera, se procedió a analizar la mortalidad y el avance de las larvas inoculadas, en función de las diferentes formas de impregnación con el borato de zinc amoniacal. Mediante análisis estadísticos no paramétricos se analizaron los resultados. El borato de zinc amoniacal demostró ser efectivo como insecticida en ambos tipos de madera cuando fue aplicado en autoclave. En madera de álamo el preservante de estudio alcanzó una mortalidad de larvas de más del 90 %, cuando se impregnó la madera mediante el método de vacío-vacío en autoclave. Por otra parte, en madera de pino el borato de zinc amoniacal tuvo su mejor rendimiento alcanzando una mortalidad de larvas mayor al 75 %, cuando fue aplicado por el método de vacío-presión-vacío en autoclave. Los tratamientos realizados en autoclave como vacío-vacío y vacío-presión-vacío logran una retención mayor del preservante y una distribución uniforme del mismo en la madera dando mejores resultados en cuanto al control de larvas de *Anobium punctatum*. En cambio, los tratamientos de inmersión y pincelado tienen una baja retención del borato de zinc amoniacal y una pobre distribución del mismo en la madera localizándose en la superficie sin penetrar en el interior de la madera y por tanto dando peores resultados en cuanto al control de larvas de *Anobium punctatum*. Se comprobó que en el control donde la madera no fue tratada, fue donde se produjo el mayor daño por la alimentación de las larvas. De los resultados se evidenció que a excepción del tratamiento de vacío-vacío en madera de álamo donde no hubo ataque, en todos los demás tratamientos las larvas de *Anobium punctatum* provocaron daños en la madera antes de morir por causa del borato de zinc amoniacal.

Palabras clave: Inmersión; Pincelado; Vacío-vacío; Vacío-presión-vacío; Álamo; Pino; Mortalidad; Avance; Larvas.

## 8. SUMMARY

This essay pretended to analyze whether the zinc borate of ammonia is effective as an insecticide. For this larvae on the species *Anobium punctatum* (Coleoptera: Anobiidae) they were used. Four treatments with different forms of application of ammonia zinc borate were made: immersion, brushing, vacuum-vacuum and vacuum-pressure-vacuum as well as control. Treatments are performed in poplar and pine. The wood specimens were subsequently inoculated with *Anobium punctatum* larvae. To assess the insecticidal effectiveness of the wood preservative, it proceeded to analyze mortality and the advance of inoculated larvae, depending on the different forms of impregnation with ammoniacal zinc borate. By nonparametric statistical analysis the results were analyzed. Ammoniacal zinc borate was effective as an insecticide in both types of wood when applied in autoclave. In poplar wood the preservative achieved larvae mortality over 90%, when wood was impregnated by vacuum-vacuum method. Moreover, in pine ammonia zinc borate had their best performance with a mortality of larvae more than 75%, when it was applied by the method of vacuum-pressure-vacuum. Treatments such as vacuum-vacuum and vacuum-pressure-vacuum achieve greater retention of preservative and a uniform distribution thereof in the wood giving better results in controlling *Anobium punctatum* larvae. Instead, immersion and brushing treatments have low retention ammoniacal zinc borate and a poor distribution thereof in the timber being located on the surface without penetrating inside the timber and therefore giving worse results in terms of control *Anobium punctatum* larvae. It was found that in the control where the wood was not treated, was where the most damage occurred by feeding larvae. The results showed that except for the treatment of vacuum-vacuum in poplar wood where there was no attack, in all other treatments *Anobium punctatum* larvae caused damage to the wood before dying from zinc ammonium borate.

Keywords: Immersion; Brushing; Vacuum-vacuum; Vacuum-pressure-vacuum; Poplar; Pine; Mortality; Advance; Larvae.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

1. Arsenault, R. D. 1973. Factors influencing the effectiveness of preservative systems. In: Nicholas, D. D. ed. Wood deterioration and its prevention by preservative treatments. Syracuse, University Press. v. 2, pp. 121-278.
2. Baker, J. M. 1969. Digestion of wood by *Anobium Punctatum* DeGeer and comparison with some other wood-boring beetles. Procedure of the Royal Entomological Society of London. 33 (8): 31.
3. Carcoma. s.f. Carcoma *Hylotrupes bajulus*. (en línea). s.l. s.p. Consultado 6 abr. 2015. Disponible en <http://www.carcoma.com/tipos-de-carcomas/hylotrupes-bajulus.htm>
4. Coudert, L.; Blais, J. F.; Mercier, G.; Cooper, P.; Janin, A.; Gastonguay, L. 2014. Demonstration of the efficiency and robustness of an acid leaching process to remove metales from various CCA-treated wood samples. Journal of Environmental Management. 132: 197-206.
5. Dajoz, R. 2001. Entomología forestal; los insectos y el bosque. Madrid, Mundi-Prensa. 548 p.
6. Dieste, A. 2014. Mitigación del impacto ambiental de madera tratada químicamente. Montevideo, Ministerio de Industrias, Energía y Minería. Consejo Sectorial Forestal-Madera. Dirección Nacional de Industrias. 24 p.
7. Eaton, R. A.; Hale, M. D. C. 1993. Wood; decay, pests and protection. London, Chapman and Hall. 546 p
8. Fields, S. 2001. How dangerous is CCA?. Environmental Health Perspectives. 109 (6): 262-269.
9. Furuno, T.; Lin, L.; Katoh, S. 2003. Leachability, decay, and termite resistance of wood treated with metaborates. Journal of Wood Science. 49: 344-348.
10. Gentz, M. C.; Grace, J. K. 2006. A review of boron toxicity in insects with an emphasis on termites. Journal of Agriculture and Urban Entomology. 23 (4): 201-207.

11. Getwoodworking. s.f. Common furniture beetle larvae. (en línea). s.l. s.p. Consultado 6 abr. 2015. Disponible en <http://www.getwoodworking.com/forums/postings.asp?th=32253>
12. Hasan, A. R.; Hu, L.; Solo-Gabriele, H. M.; Fieber, L.; Cai, Y.; Townsend, T. 2010. Field-scale leaching of arsenic, chromium and copper from weathered treated wood. *Environmental Pollution*. 158:1479–1486.
13. Helsen, L.; Van den Bulck, E. 2005. Review of disposal technologies for chromated copper arsenate (CCA) treated wood waste, with detailed analyses of thermochemical conversion processes. *Environmental Pollution*. 134:301–314.
14. Ibáñez, C. M.; Mantero, C.; Bianchi, M.; Kartal, N. 2009. Madera, biodeterioro y preservantes. Montevideo, Hemisferio Sur. 134 p.
15. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; Silva, L.; Rabinovich, M.; Escudero, R.; Franco, J. 2012. Preservación de madera tratada con Zn y Mn y efectividad de tratamiento antilixiviante con bórax. *Maderas, Ciencia y Tecnología*. 14(2): 165-174.
16. Insectasylum. s.f. *Reticulitermes flavipes*, subterranean termite soldier. (en línea). s.l. s.p. Consultado 6 abr. 2015. Disponible en <http://www.insectasylum.net/Isoptera/>
17. Lloyd, J. D. 1998. Borates and their biological applications. In: Annual Meeting of IRGWP (29<sup>th</sup>., 1998, Maastricht, The Low Countries). Papers. Stockholm, SW. pp. 1-12 (Document IRG/WP 98- 30178).
18. Makarov, K. V. s.f. Beetles (Coleoptera) and coleopterists. *Anobium punctatum* (Anobiidae), atlas of beetles of Russia. (en línea). St. Petersburg, Zoological Institute of Russian Academy of Sciences. s.p. Consultado 6 abr. 2015. Disponible en <http://www.zin.ru/animalia/coleoptera/eng/anopunkm.htm>
19. Nanz, S. 2007. Eastern Subterranean Termite. (en línea). New York, Stevenanz. s.p. Consultado 6 abr. 2015. Disponible en [http://www.stevenanz.com/Main\\_Directory/Recent%20Photos/2008/08\\_1231\\_NYC/source/ mg\\_7008.htm](http://www.stevenanz.com/Main_Directory/Recent%20Photos/2008/08_1231_NYC/source/ mg_7008.htm)
20. Touza Vázquez, M. C. 2013. Construir con madera. Madrid, CONFEMADERA HÁBITAT. 96 p.

21. Townsend, T.; Dubey, B.; Tolaymat, T.; Solo-Gabriele, H. M. 2005. Preservative leaching from weathered CCA-treated wood. *Journal of Environmental Management*. 75: 105–113.
22. Unger, A.; Schniewind, A. P.; Unger, W. 2001. *Conservation of wood artifacts; a handbook*. Heidelberg, Springer. 578 p.
23. Wikipedia. s.f. *Lyctus brunneus*. (en línea). s.l. s.p. Consultado 6 abr. 2015. Disponible en [http://en.wikipedia.org/wiki/Lyctus\\_brunneus](http://en.wikipedia.org/wiki/Lyctus_brunneus)

10. ANEXOS**Tabla 1.** Mediciones de probetas de álamo

ÁLAMO									
	No.	Mi. (g)	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Mf. (g)	Retención (kg/m <sup>3</sup> )
INM.	1A	81,20	9,90	4,93	2,97	144,89	0,56	83,73	17,46
	2A	80,48	9,93	4,93	3,00	147,01	0,55	82,40	13,06
	3A	85,49	9,93	4,90	2,93	142,78	0,60	86,96	10,30
	4A	80,57	10,00	4,97	3,00	149,00	0,54	82,44	12,55
	5A	77,75	10,00	4,90	3,00	147,00	0,53	79,78	13,81
VV.	6A	82,02	9,97	4,97	3,00	148,50	0,55	93,94	80,27
	7A	74,16	9,97	4,90	2,97	144,88	0,51	86,26	83,52
	8A	77,86	9,90	4,87	2,93	141,33	0,55	140,48	443,08
	9A	77,67	9,97	4,83	2,93	141,31	0,55	143,64	466,86
	10A	76,28	9,97	4,90	2,97	144,88	0,53	137,37	421,65
PIN.	11A	78,14	9,93	4,93	3,00	147,01	0,53	78,14	0,00
	12A	85,99	10,00	4,93	3,00	148,00	0,58	85,99	0,00
	13A	81,90	9,97	4,90	2,97	144,88	0,57	81,90	0,00
	14A	88,21	9,97	4,97	2,97	146,85	0,60	88,21	0,00
	15A	82,57	9,90	4,93	3,00	146,52	0,56	82,57	0,00
VPV.	16A	74,68	9,97	4,93	3,00	147,51	0,51	157,26	559,84
	17A	77,39	9,90	4,90	2,97	143,91	0,54	151,28	513,44
	18A	81,48	9,93	5,03	2,93	146,66	0,56	153,18	488,89
	19A	79,52	10,00	4,97	3,00	149,00	0,53	152,38	488,99
	20A	75,53	10,00	4,90	3,00	147,00	0,51	163,41	597,82
CON-TROL	22A	77,20	10,00	4,93	2,97	146,36	0,53	-	-
CON-TROL	23A	79,18	10,00	4,97	3,00	149,00	0,53	-	-

**Tabla 2.** Mediciones de probetas de pino

	PINO								
	No.	Mi. (g)	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Mf. (g)	Retención (kg/m <sup>3</sup> )
INM.	1P	99,10	9,97	5,00	3,00	149,50	0,66	103,35	28,43
	2P	91,84	10,00	5,00	2,97	148,33	0,62	95,76	26,43
	3P	80,21	10,00	5,07	3,00	152,00	0,53	83,92	24,41
	4P	86,29	9,90	5,00	3,00	148,50	0,58	89,95	24,65
	5P	98,33	10,00	4,97	3,00	149,00	0,66	102,06	25,03
VV.	6P	98,93	10,00	5,00	3,00	150,00	0,66	160,26	408,87
	7P	87,17	9,97	5,00	3,00	149,50	0,58	102,59	103,14
	8P	99,01	10,00	4,97	3,00	149,00	0,66	125,72	179,26
	9P	92,16	9,97	5,00	3,00	149,50	0,62	153,63	411,17
	10P	83,41	9,97	5,00	3,00	149,50	0,56	146,88	424,55
PIN.	11P	87,48	10,00	5,00	3,00	150,00	0,58	88,95	9,80
	12P	88,52	10,00	5,00	3,00	150,00	0,59	91,03	16,73
	13P	94,33	9,97	5,00	3,00	149,50	0,63	96,38	13,71
	14P	97,54	10,00	5,00	3,00	150,00	0,65	99,61	13,80
	15P	80,41	10,00	5,00	3,00	150,00	0,54	82,48	13,80
VPV.	16P	85,11	10,00	5,00	3,00	150,00	0,57	173,62	590,07
	17P	91,78	10,00	5,00	3,00	150,00	0,61	165,13	489,00
	18P	92,13	10,00	4,97	3,00	149,00	0,62	178,82	581,81
	19P	94,75	9,97	4,97	3,00	148,50	0,64	180,89	580,05
	20P	80,96	9,97	5,00	3,00	149,50	0,54	179,08	656,32
CON-TROL	21P	90,00	9,97	5,00	3,00	149,50	0,60	-	-

**Tabla 3.** Avance y condición de larvas de *Anobium punctatum* en álamo

PROBETA	ÁLAMO		
1A	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	0,6	M
	2	6,2	V
	3	0,6	M
	4	0,6	M
	5	0,6	M
	6	1,8	V

	7	1,6	M
	8	1,7	M
	9	2,8	V
	10	6,0	V
	11	1,6	M
	12	2,1	V
2A	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	2,3	V
	2	2,0	M
	3	2,6	M
	4	1,8	M
	5	2,6	V
	6	1,9	V
	7	1,9	M
	8	1,8	V
	9	2,7	V
	10	2,2	V
	11	2,1	M
	12	2,3	V
3A	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	2,0	V
	2	2,0	V
	3	1,7	M
	4	2,4	V
	5	2,1	V
	6	2,0	M
	7	1,6	M
	8	1,8	M
	9	1,8	V
	10	1,7	M
	11	0,7	M
	12	1,9	M
4A	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	0,6	M
	2	2,8	V
	3	0,6	M

	4	0,6	M
	5	1,4	M
	6	1,7	M
	7	4,0	V
	8	0,6	M
	9	0,6	M
	10	0,6	M
	11	2,0	M
	12	0,6	M
5A	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	0,6	M
	2	2,4	V
	3	1,5	V
	4	0,6	M
	5	1,5	V
	6	0,6	M
	7	0,4	M
	8	0,6	M
	9	0,7	M
	10	0,6	M
	11	1,0	V
	12	1,8	V
6A	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	0,5	M
	2	0,5	M
	3	0,6	M
	4	0,6	M
	5	0,5	M
	6	0,6	M
	7	0,5	M
	8	0,7	M
	9	0,9	M
	10	0,7	M
	11	0,6	M
	12	0,5	M
7A	orificio	avance (cm)	condición (V o M)

	1	0,6	M
	2	0,8	M
	3	0,6	M
	4	0,6	M
	5	0,6	M
	6	0,6	M
	7	0,6	M
	8	0,6	M
	9	0,5	M
	10	0,8	M
	11	0,6	M
	12	0,6	M
8A	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	0,4	M
	2	0,4	M
	3	0,6	M
	4	0,6	M
	5	0,5	M
	6	0,6	M
	7	0,6	M
	8	0,5	M
	9	0,4	M
	10	0,6	M
	11	0,5	M
	12	0,5	M
9A	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	1	V
	2	0,6	M
	3	0,7	M
	4	1,4	V
	5	1,1	V
	6	1,1	M
	7	1,2	V
	8	1	M
	9	1,5	V
	10	1,1	M
	11	1,2	M

	12	1,2	M
10A	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	0,6	M
	2	0,6	M
	3	0,5	M
	4	0,5	M
	5	0,5	M
	6	0,6	M
	7	0,5	M
	8	0,5	M
	9	0,6	M
	10	0,4	M
	11	0,6	M
12	0,6	M	
11A	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	4,0	V
	2	2,2	V
	3	5,3	V
	4	1,6	M
	5	4,6	V
	6	4,0	V
	7	1,6	M
	8	1,7	M
	9	2,1	M
	10	3,8	V
	11	2,1	V
12	2,3	V	
12A	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	0,7	M
	2	1,3	M
	3	1,5	V
	4	1,0	M
	5	0,5	M
	6	1,6	M
	7	1,4	V
	8	1,0	M
9	0,7	M	

	10	1,0	V
	11	0,7	M
	12	0,8	M
14A	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	1,8	V
	2	1,6	M
	3	4,1	V
	4	3,0	V
	5	3,4	V
	6	1,5	V
	7	4,0	V
	8	1,6	M
	9	1,4	M
	10	2,6	V
	11	2,1	V
	12	2,2	M
15A	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	2,5	V
	2	2,4	M
	3	1,6	M
	4	3,3	V
	5	5,8	V
	6	4,5	V
	7	4,4	V
	8	5,0	V
	9	4,8	V
	10	5,7	V
	11	4,7	V
	12	1,5	M
16A	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	1,6	V
	2	1,4	M
	3	1,7	V
	4	1,7	M
	5	1,6	M
	6	1,6	M
	7	1,5	M

	8	1,4	M
	9	1,6	M
	10	1,6	V
	11	1,6	V
	12	1,6	M
17A	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	2,0	V
	2	1,8	M
	3	1,6	M
	4	1,5	M
	5	1,6	M
	6	1,0	M
	7	2,0	M
	8	1,9	V
	9	1,9	M
	10	2,0	M
	11	1,8	M
	12	1,7	M
18A	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	1,6	V
	2	1,7	V
	3	0,8	M
	4	1,5	V
	5	1,5	V
	6	1,5	V
	7	1,6	M
	8	1,6	V
	9	1,4	M
	10	1,8	V
	11	1,8	V
	12	1,7	M
19A	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	1,7	V
	2	1,7	V
	3	1,7	M
	4	1,6	V
	5	1,6	V

	6	1,6	M
	7	1,6	V
	8	1,7	M
	9	1,7	M
	10	1,5	M
	11	1,6	M
	12	1,7	V
20A	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	1,4	V
	2	1,3	V
	3	1,4	V
	4	1,4	V
	5	1,3	M
	6	1,3	M
	7	1,4	V
	8	1,4	V
	9	1,3	M
	10	1,0	M
	11	1,4	M
12	1,4	V	

**Tabla 4.** Avance y condición de larvas de *Anobium punctatum* en pino

PROBETA	PINO		
1P	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	1,6	V
	2	0,6	M
	3	1,6	V
	4	1,9	V
	5	1,9	V
	6	1,7	V
	7	1,8	V
	8	2,3	V
	9	2,0	V
	10	1,8	V
	11	1,8	V
12	1,6	V	

2P	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	9,4	V
	2	3,8	V
	3	1,5	V
	4	2,4	V
	5	1,9	V
	6	4,0	V
	7	1,7	V
	8	1,7	V
	9	1,5	M
	10	2,0	V
	11	1,2	V
12	1,4	M	
3P	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	0,3	M
	2	1,4	V
	3	1,1	V
	4	0,4	M
	5	0,3	M
	6	2,2	M
	7	2,3	V
	8	1,5	M
	9	0,6	M
	10	0,6	M
	11	0,5	M
12	0,6	M	
4P	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	0,6	M
	2	0,5	M
	3	0,7	M
	4	0,8	M
	5	0,6	M
	6	0,6	M
	7	0,6	M
	8	0,6	M
	9	0,8	V
10	0,4	M	

	11	1,5	V
	12	0,6	M
5P	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	3,2	V
	2	1,6	M
	3	1,6	M
	4	2,0	V
	5	1,7	V
	6	2,0	V
	7	0,5	M
	8	0,4	M
	9	1,5	V
	10	1,9	V
	11	1,4	M
	12	1,5	V
6P	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	1,0	M
	2	1,3	V
	3	1,6	M
	4	1,6	M
	5	1,3	M
	6	1,4	V
	7	1,1	M
	8	1,2	M
	9	1,3	M
	10	1,5	V
	11	2,0	M
	12	1,2	M
7P	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	1,7	M
	2	1,8	M
	3	0,8	M
	4	1,7	V
	5	2,7	V
	6	1,8	M
	7	4,4	V

	8	1,6	M
	9	1,9	M
	10	2,8	V
	11	1,6	M
	12	2,4	V
8P	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	2,1	V
	2	1,8	V
	3	1,8	M
	4	1,7	V
	5	2,0	V
	6	1,7	V
	7	1,4	V
	8	1,6	V
	9	1,6	V
	10	1,4	M
	11	2,3	V
	12	1,5	M
9P	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	1,6	M
	2	1,4	V
	3	1,6	M
	4	1,6	M
	5	1,8	M
	6	1,7	M
	7	1,5	M
	8	1,7	V
	9	1,6	M
	10	1,4	M
	11	2,3	V
	12	1,5	M
10P	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	2,8	V
	2	2,6	V
	3	2,0	M
	4	1,8	M

	5	2,0	M
	6	2,0	M
	7	2,0	M
	8	2,2	V
	9	2,1	V
	10	2,0	M
	11	1,8	M
	12	1,6	M
11P	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	1,6	V
	2	1,8	M
	3	0,6	M
	4	0,6	M
	5	3,4	V
	6	1,6	M
	7	1,8	V
	8	2,2	V
	9	0,6	M
	10	1,5	V
	11	2,8	V
	12	0,6	M
12P	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	2,3	V
	2	2,0	M
	3	2,0	V
	4	0,4	M
	5	1,6	M
	6	4,0	V
	7	0,6	M
	8	2,0	V
	9	1,2	M
	10	0,6	M
	11	0,5	M
	12	3,5	V
13P	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	2,3	V

	2	2,6	V
	3	1,5	M
	4	0,5	M
	5	2,1	V
	6	1,5	M
	7	0,7	M
	8	0,7	M
	9	0,5	M
	10	4,2	V
	11	0,5	M
	12	0,7	V
14P	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	1,1	M
	2	1,2	M
	3	1,8	V
	4	1,0	M
	5	1,8	V
	6	0,5	M
	7	1,6	V
	8	2,5	V
	9	0,6	M
	10	1,7	V
	11	0,5	M
	12	1,7	V
15P	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	2,6	V
	2	0,6	M
	3	1,4	V
	4	0,6	M
	5	2,0	V
	6	0,6	M
	7	0,6	M
	8	0,6	M
	9	1,5	V
	10	2,7	V
	11	0,6	M

	12	1,4	M
16P	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	0,6	M
	2	0,6	M
	3	0,6	M
	4	2,2	V
	5	1,8	V
	6	0,6	M
	7	1,6	V
	8	0,6	M
	9	0,6	M
	10	1,4	V
	11	0,6	M
12	0,6	M	
17P	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	0,6	M
	2	2,0	M
	3	2,1	V
	4	2,6	V
	5	0,8	M
	6	1,4	M
	7	0,6	M
	8	0,6	M
	9	0,8	M
	10	2,0	V
	11	0,6	M
12	0,8	M	
18P	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	2,0	M
	2	1,9	M
	3	2,0	M
	4	1,8	M
	5	2,0	M
	6	2,4	V
	7	2,0	M
8	2,2	M	

	9	2,1	M
	10	2,2	V
	11	1,9	V
	12	2,0	V
19P	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	1,5	M
	2	1,5	M
	3	1,7	V
	4	1,7	V
	5	1,7	M
	6	1,5	M
	7	1,8	M
	8	1,8	M
	9	1,5	M
	10	1,9	M
	11	1,6	M
	12	1,5	M
20P	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	0,6	M
	2	0,6	M
	3	1,0	V
	4	0,6	M
	5	0,6	M
	6	0,6	M
	7	0,6	M
	8	0,6	M
	9	0,6	M
	10	0,6	M
	11	0,6	M
	12	0,6	M

**Tabla 5.** Avance y condición de larvas de *Anobium punctatum* en probetas control de álamo y pino

PROBETA	CONTROLES		
22A	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	2,9	V

	2	3,2	V
	3	1,1	V
	4	5,4	V
	5	3,6	M
	6	1,9	V
	7	2,5	V
	8	2,3	M
	9	3,9	V
	10	3,1	V
	11	4,8	V
	12	3,6	M
23A	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	3,2	V
	2	5,4	V
	3	3,1	V
	4	2,6	V
	5	1,4	M
	6	1,9	V
	7	3,6	M
	8	4,2	V
	9	4,6	V
	10	5,8	V
	11	4,6	V
	12	4,2	V
21P	orificio	avance (cm)	condición (V o M)
	1	2,5	V
	2	2,9	M
	3	3,4	V
	4	3,9	V
	5	3,1	V
	6	2,6	M
	7	2,7	M
	8	2,9	V
	9	3,5	V
	10	3,1	M
	11	2,1	V

	12	2,2	V
--	----	-----	---

**Tabla 6.** Supervivencia de larvas en valores absolutos y porcentaje en álamo

ÁLAMO						
TRATAMIENTO	VIVAS	% VIVAS	MUERTAS	% MUERTAS	TOTAL	% TOTAL
INM.	23	38,33	37	61,67	60	100
VV.	5	8,33	55	91,67	60	100
PIN.	28	58,33	20	41,67	48	100
VPV.	27	45,00	33	55,00	60	100
CONTROL	19	79,17	5	20,83	24	100

**Tabla 7.** Supervivencia de larvas en valores absolutos y porcentaje en pino

PINO						
TRATAMIENTO	VIVAS	% VIVAS	MUERTAS	% MUERTAS	TOTAL	% TOTAL
INM.	33	55,00	27	45,00	60	100
VV.	24	40,00	36	60,00	60	100
PIN.	27	45,00	33	55,00	60	100
VPV.	14	23,33	46	76,67	60	100
CONTROL	8	66,67	4	33,33	12	100

**Tabla 8.** Avance promedio de larvas de *Anobium punctatum* en álamo

ÁLAMO		
TRATAMIENTO	AVANCE PROMEDIO (cm)	SD
INM.	1,71	1,13
VV.	0,68	0,25
PIN.	2,56	1,51
VPV.	1,57	0,23
CONTROL	3,45	1,27

**Tabla 9.** Avance promedio de larvas de *Anobium punctatum* en pino

PINO		
TRATAMIENTO	AVANCE PROMEDIO (cm)	SD
INM.	1,54	1,31
VV.	1,79	0,54
PIN.	1,48	0,93
VPV.	1,31	0,65
CONTROL	2,91	0,53

**Tabla 10.** Avance promedio de larvas vivas y larvas muertas de *Anobium punctatum* en álamo

ÁLAMO				
TRATAMIENTO	AVANCE PROMEDIO VIVAS (cm)	SD	AVANCE PROMEDIO MUERTAS (cm)	SD
INMERSIÓN	2,50	1,25	1,18	0,65
VACÍO-VACÍO	1,24	0,21	0,62	0,19
PINCELADO	3,41	1,41	1,38	0,53
VACÍO-PRESIÓN-VACÍO	1,59	0,17	1,54	0,27
CONTROL	3,60	1,31	2,90	1,01

**Tabla 11.** Avance promedio de larvas vivas y larvas muertas de *Anobium punctatum* en pino

PINO				
TRATAMIENTO	AVANCE PROMEDIO VIVAS (cm)	SD	AVANCE PROMEDIO MUERTAS (cm)	SD
INMERSIÓN	2,14	1,46	0,81	0,50
VACÍO-VACÍO	2,06	0,68	1,60	0,30
PINCELADO	2,23	0,81	0,86	0,45
VACÍO-PRESIÓN-VACÍO	1,90	0,41	1,13	0,61
CONTROL	2,95	0,65	2,83	0,22

**Tabla 12.** Análisis estadístico de mortalidad de larvas de *Anobium punctatum* en álamo

ÁLAMO		
	CHI CUADRADO	SIGNIFICANCIA
INMERSIÓN vs. CONTROL	2,0154E-217	P<0,001
PINCELADO vs. CONTROL	2,23827E-12	P<0,001
VACÍO-VACÍO vs. CONTROL	5,4139E-113	P<0,001
VACÍO-PRESIÓN-VACÍO vs. CONTROL	1,03956E-36	P<0,001

ÁLAMO		
	CHI CUADRADO	SIGNIFICANCIA
PIN. vs. INM.	0,002855196	p<0,01
VV. vs. INM.	1,75723E-06	p<0,001
VPV. vs. INM.	0,288184265	ns
VV. vs. PIN.	3,48295E-19	p<0,001
VPV. vs. PIN.	0,00357946	p<0,01
VPV. vs. VV.	9,02277E-25	p<0,001

**Tabla 13.** Análisis estadístico de mortalidad de larvas de *Anobium punctatum* en pino

PINO		
	CHI CUADRADO	SIGNIFICANCIA
INMERSIÓN vs. CONTROL	1,13776E-47	P<0,001
PINCELADO vs. CONTROL	1,7486E-57	P<0,001
VACÍO-VACÍO vs. CONTROL	1,35626E-64	P<0,001
VACÍO-PRESIÓN-VACÍO vs. CONTROL	6,8778E-99	P<0,001

PINO		
	CHI CUADRADO	SIGNIFICANCIA
PIN. vs. INM.	0,119470987	ns
VV. vs. INM.	0,019517481	p<0,05
VPV. vs. INM.	8,20222E-07	P<0,001
VV. vs. PIN.	0,436274929	ns
VPV. vs. PIN.	0,000742203	P<0,001
VPV. vs. VV.	0,008407995	p<0,01