



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y
CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA EN MADERAS Y
SUS BIOMATERIALES

INFLUENCIA DEL VAPORIZADO SOBRE LA RESISTENCIA A LA
PUDRICIÓN DE MADERA
DE RENOVAL DE ROBLE
(*Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst)

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero de la Madera

DIEGO IGNACIO GUZMÁN SANTIBÁÑEZ

Profesores Guía: Ing. Forestal, Dr. René Carmona Cerda. Ing. Forestal, Dr. Ricardo Silva
Soto.

Santiago, Chile

2017

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y CONSERVACIÓN DE
LA NATURALEZA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA EN MADERAS Y
SUS BIOMATERIALES

INFLUENCIA DEL VAPORIZADO SOBRE LA RESISTENCIA A LA
PUDRICIÓN DE MADERA
DE RENOVAL DE ROBLE
(Nothofagus obliqua (Mirb.) Oerst)

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero de la Madera

DIEGO IGNACIO GUZMÁN SANTIBÁÑEZ

Calificaciones	Nota	Firma
Prof. Guía Sr. René Carmona
Prof. Guía Sr. Ricardo Silva
Prof. Consejero Alejandro Bozo
Prof. Consejero Javier González

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer el apoyo incondicional de mi familia, especialmente mis padres, por las palabras de aliento, la ayuda, comprensión, y por la motivación y fuerza que me entregaron durante este proceso, ya que sin ello, todo hubiera sido mucho más difícil.

Agradecer a Ángela, que fue un gran apoyo durante esta etapa, junto con ella, agradecer también enormemente a amigos y compañeros tales como Ariel, Claudia, Miguel, Magda y María José, que con sus conocimientos y apoyo, fueron esenciales para lograr concluir este trabajo.

A los profesores guía Rene Carmona y Ricardo Silva, que estuvieron dispuestos a compartir sus consejos y conocimientos dándose el tiempo, para llevar a cabo este proceso de la mejor manera posible.

A todos ellos, que colaboraron directamente y también a aquellas que lo hicieron de manera indirecta, muchas gracias.

INDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN

ABSTRACT

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes generales	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Revisión bibliográfica	2
1.3.1 La madera (antecedentes generales)	2
1.3.1.1 Composición química de la madera	3
1.3.2 Roble	4
1.3.2.1 Distribución y hábitat	4
1.3.2.2 Descripción	5
1.3.3 Renoval	5
1.3.4 Biodeterioro de la madera	5
1.3.4.1 Antecedentes generales	5
1.3.4.2 Durabilidad natural del roble	6
1.3.4.3 Hongos de pudrición	6
1.3.5 Vaporizado de la madera	9
2 MATERIALES Y MÉTODO	12
2.1 Materiales	12
2.1.1 Madera	12
2.1.2 Hongos empleados en el estudio	12
2.1.3 Equipos y materiales de laboratorio	13
2.2 Método	15
2.2.1 Diseño experimental	15
2.2.2 Vaporizado y esterilización de la madera	16
2.2.3 Montaje del ensayo	17
2.2.4 Determinación del porcentaje de pérdida de peso (%PP)	19
2.2.5 Determinación del porcentaje de solubilidad en soda (%S)	19

2.2.7 Determinación del porcentaje de contenido de lignina (%L).....	20
2.2.8 Tratamiento de datos.....	21
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
3.1 Porcentaje de pérdida de peso (%PP)	23
3.1.1 Análisis de resultados al tiempo de ataque T ₁	23
3.1.2 Análisis de resultados para pudrición café.....	24
3.2 Porcentaje de solubilidad (%S).....	25
3.2.1 Análisis de resultados al tiempo de ataque T ₁	25
3.2.2 Análisis de resultados para pudricion café.....	26
3.3 Porcentaje de Lignina (%L).....	27
3.3.1 Análisis de resultados al tiempo de ataque T ₁	27
3.3.2 Resultados obtenidos para pudricion café.....	28
4 CONCLUSIONES.....	29
5 BIBLIOGRAFIA	30
6 APENDICE.....	33
6.1 ANOVAS calculadas para las variables de salida	33
6.2 Test HSD de Tukey aplicado a las variables de salida.....	35

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Especies nativas e introducidas representativas de coníferas y latifoliadas.....	3
Cuadro 2. Clasificación de maderas nativas comerciales según su durabilidad natural.....	6
Cuadro 3. Distribución de la cantidad de probetas por tipo de madera y tratamiento.....	16
Cuadro 4. %L obtenido para pudrición café.....	28

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cámara de flujo laminar.....	13
Figura 2. A. Autoclave. B. Cámara de cultivo.....	14
Figura 3. A. Bomba de vacío-presión B. Estufa de secado.....	14
Figura 4. Proceso de vaporizado al interior de la autoclave.....	16
Figura 5. A. Probetas de albura (izquierda) y duramen (derecha) antes del vaporizado B. Probetas de duramen (izquierda) y albura (derecha) después del vaporizado	17
Figura 6. Frascos con sustrato y probetas colonizadas por los hongos.....	18
Figura 7. A. Gráfico de efectos principales para %PP al tiempo de ataque T_1 B. Gráfico de interacción para el %PP al tiempo de ataque T_1	23
Figura 8. A. Gráfico de efectos principales para %PP luego del ataque de <i>Poria monticola</i> B. Gráfico de interacción para el %PP luego del ataque de <i>Poria monticola</i>	24
Figura 9. A. Gráfico de efectos principales para el %S al tiempo de ataque T_1 B. Gráfico de interacción para el %S al tiempo de ataque T_1	25
Figura 10. A. Gráfico de efectos principales para el %S luego del ataque de <i>Poria monticola</i> B. Gráfico de interacción para el %S luego del ataque de <i>Poria monticola</i>	26
Figura 11. A. Gráfico de efectos principales para el %L al tiempo de ataque T_1 B. Gráfico de interacción para el % de lignina al tiempo de ataque T_1	27

RESUMEN

Nothofagus obliqua (Mirb.) Oerst (roble o pellín), es una especie que se distribuye desde la Región de Valparaíso hasta la Región de Los Lagos; también habita en Argentina. Esta especie se caracteriza por la alta durabilidad natural que presenta su madera en individuos adultos. Sin embargo, para la madera proveniente de renovales, con diferentes características de color y densidad, no existen antecedentes sobre su comportamiento frente al ataque de hongos de pudrición u otros agentes de biodeterioro.

Actualmente, la madera de renovales de roble es sometida a un tratamiento de “vaporizado”, el que tiene como objetivo igualar el color rosado a rojizo del duramen de la madera de renoval, con el rojo oscuro del duramen de roble pellín, mucho más apreciado en el mercado.

Con el objetivo de proporcionar antecedentes sobre la durabilidad natural de la madera de renoval de roble y de la influencia del tratamiento de cambio de color (vaporizado), se evaluó la resistencia de estas maderas frente a la acción de hongos de pudrición mediante la pérdida de peso, solubilidad en soda y el % de lignina.

Para realizar el estudio se utilizó madera de renoval de roble, empleándose 40 probetas de albura y 40 de duramen. Se aplicó el proceso de vaporizado a 20 probetas de cada grupo, de manera de compararlas con el comportamiento de la madera sin vaporizar frente al ataque del hongo de pudrición blanca *Polystictus versicolor* y de pudrición café *Poria monticola*, utilizando además, 20 probetas de roble adulto como testigo. La mitad de las probetas de cada conjunto fue evaluada a los 2 meses (T₁) y el resto a los 4 meses (T₂) desde el inicio del ataque fúngico.

Los resultados indicaron que el vaporizado no tuvo influencia sobre la resistencia de la madera de renoval frente al ataque de *P. versicolor*, que generó el %PP más alto para todos los tipos de madera a los 2 meses de acción fúngica. Así mismo, el % de solubilidad en soda indicó que el hongo de pudrición blanca provocó el mayor biodeterioro en comparación con el hongo de pudrición café. Para el caso de *P. monticola*, se observó que el vaporizado tampoco tuvo efecto sobre la resistencia al ataque de pudrición, generándose el mayor biodeterioro a los 4 meses (T₂) que a los 2 meses (T₁). Esto señaló finalmente, que la madera de renoval de roble no es una madera durable, considerando su resistencia frente al ataque de hongos de pudrición.

Palabras clave: *Nothofagus obliqua*, *Polystictus versicolor*, *Poria monticola*, pérdida de peso, solubilidad, lignina, hongos de pudrición.

ABSTRACT

Nothofagus obliqua (Mirb.) Oerst (roble o pellín), is a specie allocated from Valparaiso Region to Los Lagos Region, Chile, also it can be found in Argentina. This kind is characterised by its high natural durability of its wood in adults members. Nevertheless, there are not history, for wood from secondary forests, with different characteristics of color and density, about its behaviour against the fungal attack or other biodeterioration agents.

Nowadays, the roble wood from secondary forests is subjected to a “steaming” treatment, which aims to equalize pink to reddish heartwood color of the wood from secondary forests, with the dark red of the roble pellin heartwood, much more appreciated in the market.

In order to provide history about the natural durability of the roble secondary forest wood, and of the influence of the color change treatment (steaming), the resistance of these woods against the action of fungal through weightloss, soda solubility and the lignin percentage was evaluated.

Roble wood (*renoval*) was used to carry out the research, using 40 test tubes for sapwood and 40 test tubes for heartwood. Steaming process was tested in 20 test tubes of each group to do the comparison with those samples that were not under the process but under the white rot fungi attack *Polystictus versicolor* and the brown fungi *Poria monticola*. Also 20 test tubes of old roble were used as reference sample. Half of the samples of each group was checked at two months (T₁) and the remaining samples at four months (T₂) since the attacks of fungi started.

The results shown that the steaming did not affect the wood resistance against the attack of *P. versicolor* produced the highest %PP for all the samples at 2 months of the test. Moreover, the %S indicated that the white fungi produced a bigger biodeterioration than the brown one. In the case of *P. Monticola*, it was observed that the steaming had no effect neither about the resistance of fungal attack, generating the greatest deterioration at 4 months (T₂) than 2 months (T₁). This finally pointed that the roble secondary forest wood is not a durable one, considering its resistance against the fungal attack

Key words: *Nothofagus obliqua*, *Polystictus versicolor*, *Poria monticola*, loss weight, solubility, lignin, rot fungi.

1 INTRODUCCION

1.1 Antecedentes generales

En la mayoría de los ambientes la madera experimenta deterioro por ataque de organismos xilófagos, que se alimentan de los reservorios energéticos que contiene, que viven en ella o la utilizan para incubación de sus larvas. Ejemplos de estos organismos son los hongos, los insectos y los horadores marinos (moluscos y crustáceos).

En particular los hongos xilófagos, en su doble rol, causan grandes pérdidas económicas a nivel mundial al disminuir la durabilidad de las estructuras de madera. Al mismo tiempo, son protagonistas activos en la ecología de los ambientes naturales, por reciclar el carbono de los materiales lignocelulósicos que degradan, fundamentalmente en los bosques, lo que asegura la continuación de los ciclos biológicos.

El renoval de roble tiene un papel destacado como madera adulta por sus características estéticas y mecánicas, entre otras. La limitante de estas maderas como renoval es su color, ya que son débilmente coloreados, por lo que no existe gran interés en el mercado por productos de mayor grado de elaboración. Una de las ventajas de la madera nativa de renovales es que presenta un mayor rendimiento volumétrico en los procesos de fabricación que la madera madura, entre un 10 y un 15 % superior, debido a una baja presencia de pudrición y de ataque de agentes de biodeterioro, además de un menor costo como materia prima (Espinosa, 2004).

Una forma de mejorar la aceptación en el mercado de la madera de renovales de roble, es modificar su color mediante un tratamiento de calor y vapor (vaporizado), obteniéndose un color similar al de la madera de roble pellín. En este proceso, al exponer la madera a temperaturas de alrededor de 100°C con vapor saturado, esta se oscurece a tonalidades café-rojizas, donde los extraíbles contribuyen significativamente al cambio de color (Chow y Troughton, 1973). Este cambio es más pronunciado cuando la madera es secada con vapor a presiones sobre la atmosférica, influencia que depende de cada especie (McGinnes y Rosen, 1984).

Actualmente no hay información sobre si esta modificación química que experimentan los extraíbles y otros componentes de la madera de roble, tiene influencia sobre otra importante propiedad de la madera madura (pellín) de esta especie, como es su durabilidad natural. Por lo tanto, este estudio pretende determinar si el vaporizado de madera de albura y duramen de renovales de roble incide sobre la intensidad del ataque fúngico en relación con el producido en madera de roble pellín sin vaporizar, de igual forma, evidenciar si otras características químicas de la madera se ven modificadas por el efecto del vaporizado y la acción fúngica.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Determinar la influencia del vaporizado sobre la resistencia a la pudrición de madera de renoval de roble.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Determinar la pérdida de peso generada por dos hongos de pudrición sobre la madera de roble adulto y albura y duramen de renoval de roble con y sin vaporizado a dos tiempos de acción fúngica.
2. Determinar el contenido de lignina y la solubilidad en soda de la madera atacada por ambos hongos a dos tiempos de acción fúngica.
3. Relacionar la acción fúngica sobre la madera, y la presencia o ausencia de vaporizado previo, con su contenido de lignina y su solubilidad en soda.

1.3 Revisión bibliográfica

1.3.1 La madera (antecedentes generales)

La madera o xilema es un conjunto de tejidos vegetales leñosos perennes que forman la masa principal del cuerpo de los árboles. Es un material organizado y muy heterogéneo, cuya aplicación depende de sus propiedades, es decir, del modo cómo se comporta bajo diversas condiciones. Las características principales de las plantas leñosas es que son plantas vasculares (presentan xilema y floema), son perennes (viven por muchos años) y poseen un tallo que persiste año a año (Saccarello y Borgioli, 2010).

Las especies de maderas comerciales que se utilizan en Chile corresponden a dos grupos: las coníferas, que son árboles de copas más o menos piramidales y hojas en forma de agujas; y las latifoliadas, que son árboles con hojas de forma laminar y copa más ramificada. A continuación, en el cuadro 1, se listan algunas de las especies nativas e introducidas más representativas de cada grupo.

Coníferas		Latifoliadas		
Alerce	Pino oregón	Roble	Tineo	Tepa
Araucaria	Sequoia	Raulí	Eucaliptus	
Mañíos		Coigüe	Álamo	
Cipreses		Lenga	Lingue	
Pino radiata		Ulmo	Laurel	

Cuadro 1: Especies nativas e introducidas representativas de coníferas y latifoliadas

Las diferencias entre las especies de coníferas y latifoliadas también se observan en el tipo de madera que producen. Las maderas de coníferas son denominadas maderas blandas, ya que sus densidades varían entre los $0,30 \text{ g/cm}^3$ y $0,55 \text{ g/cm}^3$, mientras que las latifoliadas son consideradas maderas duras, presentando densidades mayores a los 60 g/cm^3 .

1.3.1.1 Composición química de la madera

La madera está compuesta por carbono elemental ($\approx 50\%$), oxígeno ($\approx 43\%$), hidrógeno ($\approx 6\%$), nitrógeno y pequeñas cantidades de componentes de cenizas ($\approx 1\%$). Los componentes esenciales de la madera son: celulosa ($\approx 40 - 50\%$), hemicelulosa ($\approx 20 - 30\%$) y lignina ($\approx 22 - 30\%$). Además contiene otros componentes secundarios ($\approx 6\%$), correspondientes a sustancias orgánicas tales como resinas, grasas, gomas, ceras y colorantes, entre otras, como también algunas sustancias inorgánicas como potasio, sodio, calcio, magnesio, ácido fosfórico y óxido de hierro, entre otras (Nutsch, 2000). Desde un punto de vista estructural, la madera está compuesta básicamente por:

- **Celulosa:** Se encuentra en forma de filamentos o cadenas largas y delgadas. La unidad de anhidro glucosa ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$) se ve como un hexágono y se compone de cinco átomos de carbono y uno de oxígeno. Los grupos laterales OH desempeñan un papel importante en la formación de los enlaces intermoleculares. Dentro de una cadena de celulosa se encuentran enlaces covalentes, ya sea al interior del anillo de glucosa o entre los distintos anillos de la cadena molecular. Este tipo de enlace contribuye significativamente a la notable resistencia en dirección longitudinal de la madera (Saccarello y Borgioli, 2010). La molécula de celulosa tiene una longitud aproximada de 5 micras, con zonas amorfas y zonas cristalinas. Es destacable la existencia de grupos H-C-OH y H-C-CH₂-OH, los que le dan un carácter polar a la celulosa y, por tanto, a la madera. Estos grupos polares permiten la unión de cadenas de celulosa entre sí, formando las fibrillas elementales (Zanni, 2004).
- **Hemicelulosa:** Tiene la función de contribuir a consolidar la integridad estructural de la madera y su rigidez. La hemicelulosa, así como la celulosa, es un polisacárido, y difiere en su composición dependiendo si pertenece a latifoliadas o a coníferas. En ambos casos el grado de polimerización y cristalización es bajo, pues las moléculas contienen menos de 150 unidades; por esta razón y debido a su baja resistencia a los

álcalis, la hemicelulosa se diferencia de la verdadera celulosa (Saccarello y Borgioli, 2010). Al igual que en el caso de la celulosa, hay existencia de grupos tipo H-C-OH y H-C-CH₂OH, los que le dan un carácter polar a la hemicelulosa y, por tanto, contribuyen a la polaridad de la madera. Las hemicelulosas se pueden unir entre sí o con las cadenas de celulosa, normalmente en la superficie de las microfibrillas (Zanni, 2004).

- **Lignina:** Es un complejo compuesto de hidrocarburos aromáticos con grupos fenólicos, pero aún no se ha determinado exactamente su estructura. Es amorfa y su estructura varía entre coníferas y latifoliadas. Su presencia esta siempre relacionada a la presencia de celulosa, no así viceversa. Parte de la lignina se encuentra en el laminado medio, una capa intercelular compuesta por lignina y pectina. La mayor parte de la lignina ($\approx 75\%$) se encuentra en el sector de la lamela media, siendo el proceso de lignificación, el final del periodo de diferenciación, el cual coincide con la muerte de la célula (Saccarello y Borgioli, 2010). Es una sustancia bastante inerte, existiendo escasos organismos que se alimenten de ella, lo que sin duda proporciona una gran durabilidad a la madera, más cuanto mayor sea el contenido de esta sustancia. La lignina rodea las microfibrillas sirviendo de unión entre éstas, permitiendo que trabajen sólidamente (Zanni, 2004).
- **Extraíbles:** Son compuestos orgánicos complejos presentes en la madera. Se trata de sustancias extrañas a la pared celular, y la misma palabra indica que pueden ser extraídas de la madera a través de procedimientos químicos, para fines comerciales. Ceras, grasas y azúcares tienen poca importancia económica, pero otros, como el caucho y las resinas, son de considerable valor. Algunos de estos pueden, además, provocar la corrosión de equipos metálicos utilizados para el corte y el acabado de la madera, y pueden influenciar negativamente en la polimerización de adhesivos utilizados en ella. El duramen del tronco normalmente contiene los extraíbles, que además de brindar un particular color a la madera, le proporcionan la durabilidad natural, por ser tóxicos para insectos y microorganismos. Son comúnmente asociados a la formación del duramen y se encuentran principalmente fuera de la pared celular más que en su interior. Desde un punto de vista químico, son terpenos, polifenoles, ácidos resínicos, grasas, ceras e hidratos de carbono, entre otros (Saccarello y Borgioli, 2010).

1.3.2 Roble

1.3.2.1 Distribución y hábitat

El roble, *Nothofagus obliqua* (del latín *nothofagus*, que significa “falsa haya”; y *obliqua*, que hace referencia a la base de sus hojas), también conocido como Pellín o Coyán (nombre mapuche), crece desde Valparaíso hasta Llanquihue (Región de Valparaíso hasta la Región

de Los Lagos), en ambas cordilleras y en el valle central; también en Argentina. Habita áreas con suelos profundos y fértiles. Es una especie común en los tipos forestales Roble-Hualo, Roble-Raulí-Coihue, Ciprés de la Cordillera y Araucaria.

1.3.2.2 Descripción

La madera de roble adulto es de un color café rojizo opaco, que se diferencia de la albura blanquecina amarillenta. Anillos de crecimiento poco visibles. Es pesada y densa, de gran durabilidad; en cambio la madera de renoval se caracteriza por su color blanquecino rosáceo y anillos de crecimiento más anchos que la madera madura (Torres, 1971). A su vez, la densidad de la madera de renoval es menor en comparación con la madera adulta, dada su falta de formación de duramen o en vías de formación, no distinguiéndose de la formación de la albura (Carabias y Karsulovic, 1978).

1.3.3 Renoval

Renoval es un término empleado en silvicultura y ecología forestal para hacer referencia a un bosque joven, normalmente de tipo secundario, cuyos árboles dominantes o que conforman el dosel superior de dicho bosque son relativamente coetáneos. Generalmente estos bosques están constituidos por las especies más agresivas, de más rápido crecimiento y de mayor habilidad competitiva entre las que conforman la flora del área (Donoso, 1981). Un bosque deja de ser denominado como renoval cuando los árboles ya no pertenecen al mismo rango de edad por la incorporación de especies en fases más avanzadas de la sucesión vegetal, o dejan de pertenecer a un cierto rango de diámetros y alturas por crecimiento diferencial de especies, con lo cual el bosque pierde su fisonomía y apariencia de coetaneidad (Donoso, 1988).

1.3.4 Biodeterioro de la madera

1.3.4.1 Antecedentes generales

Los hongos son los organismos de mayor interés, en lo que a biodeterioro de la madera se refiere, debido a su forma de ataque, ya que degradan los distintos componentes estructurales que la conforman, reconociéndose hongos que producen diferentes tipos de pudrición, entendiéndose por tal a un reblandecimiento, decoloración y, con frecuencia, desintegración de los tejidos de un vegetal (Agrios, 1996).

1.3.4.2 Durabilidad natural del roble

La durabilidad natural se define como la resistencia intrínseca de la madera frente a degradaciones que pueden producir los agentes destructores de la madera (Remacha, 2004). La madera de roble se caracteriza por su alta durabilidad natural en edad madura, la que es producto de su proceso de duraminización, el que comienza después de los primeros 30 a 40 años de crecimiento. Árboles viejos con duramen rojo, lo que normalmente se llama madera apelinada, es muy solicitada en la construcción (Hall y Witte, 1998). La durabilidad natural del roble se debe a su composición química, especialmente a los extraíbles presentes en el duramen, los cuales pertenecen a la familia de los polifenoles, lignanos, cumarinas, ácidos fenólicos y taninos (Hall y Witte, 1998).

La siguiente es una clasificación (Cuadro 2) basada en la Nch 789/1. Of 1987, de la durabilidad natural de maderas nativas comerciales sometidas a la acción de hongos de pudrición.

Cuadro 2: Clasificación de maderas nativas comerciales según su durabilidad natural

Categoría	Nombre común	Nombre científico
Muy durables (> 20 años)	Roble Ciprés de las Guaitecas Alerce	<i>Nothofagus obliqua</i> <i>Pilgerodendron uvifera</i> <i>Fitzroya cupressoides</i>
Durables (> 15 años)	Raulí Lenga Lingue	<i>Nothofagus alpina</i> <i>Nothofagus pumilio</i> <i>Persea lingue</i>
Moderadamente durables (> 10 años)	Coihue Ulmo Tineo	<i>Nothofagus dombeyi</i> <i>Eucryphia cordifolia</i> <i>Weinmannia trichosperma</i>
Poco durables (> 5 años)	Araucaria Laurel Mañío macho	<i>Araucaria araucana</i> <i>Laurelia sempervirens</i> <i>Podocarpus nubigenus</i>
No durables (< 5 años)	Álamo Olivillo Tepa	<i>Populus sp.</i> <i>Aextoxicon punctatum</i> <i>Laurelia philippiana</i>

Fuente: Nch 789/1. Of 1987: Clasificación de maderas comerciales por su durabilidad natural

1.3.4.3 Hongos de pudrición

Los hongos pertenecen a las talofitas, grupo de organización muy primitiva. Su aparato vegetativo no posee raíz, tallo ni hojas. Sus células no se especializan, y carecen por tanto de los tejidos diferenciados de los vegetales superiores. Todas sus células son iguales, excepto las destinadas a generar los elementos reproductores, y las que constituyen los falsos tejidos

que le sirven de cuerpos de fructificación, de protección o de soporte. Se distinguen de las otras talofitas, las algas, por la ausencia de clorofila, lo que les obliga a vivir de forma saprofita (sobre elementos muertos), o parasita (se alimentan y desarrollan a partir de sustancias de animales o vegetales con quienes establecen relaciones simbióticas), ya que no son capaces de elaborar sustancias a partir del anhídrido carbónico de la atmósfera, el agua, y la energía solar, teniendo entonces que alimentarse de compuestos orgánicos ya existentes, que transforman en sustancias más elementales con la ayuda de enzimas producidas por ellos mismos (Zanni, 2004).

El cuerpo vegetativo de los hongos de interés forestal está constituido por una serie de filamentos entrelazados, llamados hifas, cuyo conjunto se denomina micelio. Las hifas de los hongos inferiores no presentan tabiques transversales, por lo que su citoplasma es continuo. Esta estructura caracteriza a los ficomicetes. Los hongos superiores tienen sus hifas tabicadas, formadas por filas de células separadas unas de otras por membranas transversales; estos son los ascomicetes y los basidiomicetes. Vegetativamente, los hongos se propagan por medio de sus esporas, que son células o grupos de células que al germinar forman un nuevo micelio, igual al que lo originó. Estas esporas son arrastradas por el viento, el agua o los seres vivos (Zanni, 2004).

Los hongos de pudrición conforman el grupo de hongos xilófagos propiamente tal, que por su dotación de enzimas son capaces de degradar los componentes elementales del esqueleto leñoso de la madera. La pudrición afecta drásticamente las propiedades mecánicas, en especial la resistencia estática y dinámica, registrándose pérdidas importantes de las mismas, aún en ataques aparentemente leves. Si bien sus condiciones óptimas de desarrollo varían según la especie forestal considerada, en ningún caso un contenido de humedad en la madera inferior al 22%, permite satisfacer sus necesidades de agua. Es por eso que toda madera (sin importar su durabilidad natural) que se coloque seca en obra, no será atacada por hongos, mientras conserve esas condiciones (Zanni, 2004).

El ataque enzimático del hongo debilita la madera, degradando la celulosa y la lignina contenida entre las células. El ataque fúngico sobre celulosa en las paredes celulares reduce la resistencia al pandeo, mientras que la degradación de la lignina afecta la resistencia a la compresión de la madera (Luley, 2005).

En términos generales, los hongos de pudrición se clasifican en tres grupos: hongos de pudrición blanda, pudrición parda (café) y pudrición blanca. Estos últimos son considerados los más importantes y potentes organismos destructores de la madera, ya que degradan más eficientemente los materiales lignocelulósicos, pudiendo depolimerizar tanto la lignina como la celulosa y hemicelulosas. El orden y proporción en que descomponen estas sustancias no es uniforme, encontrándose variaciones según el tipo de pudrición blanca producida (Eriksson, 1990).

Estos tipos de pudrición realmente constituyen formas de ataque enzimático en la madera. De modo interesante, algunos hongos xilófagos pueden llevar a cabo más de un tipo de ataque al mismo huésped. Hay también tipos diferentes de pudrición blanca y café, los cuales dejan un modelo característico de pudrición en la madera, como son las bolsas de pudrición, las pudriciones fibrosas o las pudriciones cubicas (Luley, 2005).

- Pudrición blanca: La mayoría de los hongos xilófagos que atacan los árboles de hoja caduca causan pudrición blanca. Estos hongos remueven la lignina, y también pueden, al mismo tiempo, degradar la celulosa de la madera. Debido a la degradación de la lignina la madera se decolora, quedando con un aspecto pálido, sobre todo en los últimos estados del proceso de pudrición (Luley, 2005). El resultado de este ataque es un complejo celulósico blanquecino que no suele presentarse de manera uniforme, sino en forma de alveolos o vetas blancas separadas siempre por leño normal. La densidad de la madera disminuye notablemente y, en consecuencia, aumenta la humedad retenida en esa zona. Esta pudrición deja un residuo fibroso en forma de fascículos longitudinales que conservan una resistencia elástica apreciable, por lo que se le conoce también como pudrición fibrosa (Zanni, 2004). Los árboles afectados por alteraciones en su madera y estructura causadas por pudrición blanca son más propensos a manifestar crecimientos adaptativos, o crecimientos activos localizados en respuesta al estrés, que puede resultar en varios grados de hinchazones o cambios en las características de la corteza (Luley, 2005). Algunos hongos causantes de este tipo de pudrición son *Ganoderma applanatum*, *Xyloria hypoxylon*, *Eutypa flavovirescens*, *Schizophyllum commune* y *Polystictus versicolor*, entre otros.
- Pudrición café: Los hongos causantes de esta pudrición concentran su ataque fundamentalmente sobre la celulosa, dejando un residuo formado por lignina más o menos alterada que puede disgregarse fácilmente al frotarla con los dedos. Al igual que en el caso anterior (pudrición blanca), también aquí el peso específico de la madera disminuye, aumentando la retención de agua. En este tipo de pudrición, la madera, al principio del ataque, conserva intacta su estructura celular exterior, pero si disminuye su contenido de humedad, aparecen zonas de contracción en las direcciones radial, tangencial y transversal, que le confieren un aspecto característico que ha determinado que este tipo de daño sea conocido también como pudrición cubica (Vignote y Martínez, 2006).

Dentro de la pudrición parda o café pueden distinguirse las húmedas y las secas, manifestándose la diferencia en el mayor tamaño de los cubos originados por esta última. El agente causal de la pudrición seca es un basidiomiceto llamado *Merulius lacrymans*, cuyas hifas tienen la propiedad de transportar agua desde lugares húmedos hasta la madera seca, por lo que su pudrición puede extenderse fuera de la fuente de humedad. Atacan generalmente la madera empotrada en muros de edificios viejos donde la mampostería ha disminuido su pH, ya que la falta de alcalinidad de construcciones más nuevas impide su desarrollo (Zanni, 2004). En cantidad, son bastante menos los hongos que generan pudrición café en comparación a los que

provocan pudrición blanca, y la mayoría de ellos atacan a coníferas. Los hongos causantes de pudrición café degradan los componentes holocelulósicos de la madera, y dejan tras su ataque un residuo principalmente de lignina de una coloración café, que es el color característico del proceso de descomposición de la lignina (Luley, 2005). Hongos como *Poria monticola*, *Coniophora cerebella*, *Lencites betulina* y el recién nombrado *Merulius lacrymans*, provocan este tipo de pudrición.

- Pudrición blanda: La causan generalmente los hongos descomponedores de la familia de los ascomicetos, aunque algunos basidiomicetos pueden causar una pudrición similar a la pudrición blanda. Los hongos de pudrición blanda utilizan un tipo de ataque parecido a los causantes de la pudrición café; se degrada preferentemente la celulosa (Luley, 2005). Aparece con frecuencia en maderas que se encuentran en contacto con el suelo, y le confieren a la madera (cuando el grado de humedad es elevado), una consistencia blanda similar a la de un queso fresco. Cuando la madera atacada por pudrición blanda se seca, su superficie se rompe formando muchos cubos pequeños (Zanni, 2004). Estos hongos atacan la celulosa de las paredes celulares y forman a menudo cavidades microscópicas en la pared secundaria celular (Schwarze *et al*, 2000). El hongo más importante causante de esta pudrición es *Chaetornium globosum* (Remacha, 2004). La especie *Ursulina deusta* es una de las más comunes que causan la pudrición blanda en árboles urbanos vivos (Zanni, 2004).

1.3.5 Vaporizado de la madera

El vaporizado de la madera es una técnica que ha sido investigada para una gran variedad de propósitos. Entre estas experiencias se incluyen la reducción de tensiones internas, aumento de la permeabilidad, mejoramiento de la estabilidad dimensional, mejoramiento de la penetración de preservantes y la disminución de los tiempos de secado. Entre las nuevas aplicaciones destaca la homogeneización de colores, basada en los movimientos de los extraíbles de la madera hacia la superficie de las piezas y su reacción con la temperatura y el vapor saturado (CORFO, 1999).

El flujo del calor y la humedad en la madera se vuelven relevantes cuando ésta es impregnada, secada, calentada o vaporizada (Siau, 1971). Es en estos casos, cuando la humedad relativa es alta, sobre el 70 %, el comportamiento encontrado en la madera es de régimen transitorio, debido a la lenta absorción de calor en la pared. En este tipo de régimen, cambian las condiciones interiores en un período de tiempo. Por lo tanto, en el régimen transitorio, el flujo del calor y el gradiente de temperatura son variables en el tiempo y en el espacio (Siau, 1971).

La ecuación del flujo de calor y del movimiento de humedad, basados en la ley de Fourier y ley de Fick, respectivamente, tienen igual forma matemática y tienen idénticas soluciones. El flujo de calor depende de la conductividad térmica (k) de la madera, del área de la muestra y de su gradiente de temperatura. La conductividad térmica está relacionada con el calor específico de la madera y el coeficiente de difusión térmica. En el caso del movimiento de humedad, ésta depende del área de las muestras, del contenido de humedad de la madera y del coeficiente de conductividad correspondiente a la difusión de humedad (Siau, 1971).

Conforme a lo anterior, los diferentes cambios que experimentan las piezas de madera desde el punto de vista de la transferencia de calor son situaciones complejas, que se pueden resumir en:

- Madera con un alto CH (inicio del proceso de vaporizado): La transferencia de calor es a través de la sustancia leñosa y el agua (libre y ligada).
- El CH de la madera comienza a disminuir: La transferencia de calor es a través de la sustancia leñosa, el agua y el vapor de agua del lumen y el agua de la pared celular.
- Al 30% de CH de la madera: La transferencia de calor ocurre en la sustancia leñosa, el agua de la pared celular y el vapor de agua presente en los lúmenes.

El comportamiento de la conductividad térmica y el tiempo que se demora el centro de la madera en alcanzar una determinada temperatura, son factores importantes para el tiempo de vaporizado, a presiones sobre la atmosférica, para cambiar homogéneamente el color de ésta (Espinosa, 2004).

Al comienzo del vaporizado se genera una transferencia de calor desde el vapor a la madera verde que se encuentra originalmente a una menor temperatura, elevándose esta gradualmente hasta alcanzar valores similares o próximos al del vapor. Es en este momento en que comienza a manifestarse el cambio de color. Además, se genera un secado en la superficie de la madera debido a las condiciones de temperatura cercanas al punto de ebullición del agua. Posteriormente la coloración llega a ser permanente (CORFO, 1999).

McGinnes y Rosen (1984), concluyeron que el oscurecimiento de la madera es notablemente mayor en las muestras secadas con vapor y presión al compararlas con las muestras secadas al aire. Esto concuerda con estudios anteriores realizados por Brauner y Conway (1964), quienes afirman que los procesos de oscurecimiento se aceleran considerablemente a tonos más oscuros cuando la temperatura de la madera es superior a los 90°C. Así también, Chen y Workman (1980) concluyen que el vaporizado prolongado y temperaturas sobre los 100°C son altamente efectivos en el cambio de color de la madera.

Básicamente, la decoloración de la madera proviene de los cambios de color de los extraíbles que están presentes en la albura y el duramen (Sehlsted, 2003). Cuando las maderas son sometidas al secado con vapor a presiones sobre la atmosférica se oscurecen significativamente más, esto al compararlas con aquellas secadas al aire o en cámara de secado (McGinnes y Rosen, 1984).

La madera vaporizada presenta algunas características importantes, tales como:

- Su trabajabilidad, que no difiere del de la madera no vaporizada después de secada y enfriada (Hildebrand, 1970).
- Si al inicio del vaporizado la madera está en condiciones verdes disminuye su humedad, por lo que el gradiente de humedad a través del espesor de la madera se reduce (Hildebrand, 1970; Addis *et al.*, 1989).
- Pueden generarse células colapsadas si el vaporizado de madera húmeda es muy intenso (Hildebrand, 1970).
- Iguala los diferentes contenidos de humedad de la madera entre las piezas individuales (Hildebrand, 1970).
- La calidad de la madera no se ve afectada al vaporizarla en condiciones verdes y a una temperatura no superior a los 85°C (Simpson, 1976).

Además de lo mencionado previamente, el vaporizado genera las siguientes modificaciones en las propiedades de la madera:

- El equilibrio higroscópico de la madera vaporizada es ligeramente más bajo que el de la madera no vaporizada (Hildebrand, 1970).
- Aumenta la permeabilidad de la madera (Simpson, 1975; Addis *et al.*, 1989).
- Disminuye la dureza de la madera de manera lineal al aumentar la temperatura (Davis y Thompson, 1964).

2 MATERIALES Y MÉTODO

2.1 Materiales

2.1.1 Madera

- Madera verde de renoval de roble (*Nothofagus obliqua*), aserrada y dimensionada en probetas, proveniente de una parcela particular de la Región de la Araucanía.
- Madera verde de roble pellín (*Nothofagus obliqua*), aserrada y dimensionada en probetas, obtenida de un pequeño propietario de la localidad de Lonquén, Región Metropolitana. Este propietario obtiene y comercializa las trozas de roble y de otras especies nativas provenientes de aserraderos ubicados en la Región de Los Lagos.
- Las trozas de renoval y de roble pellín, de diversos tamaños, fueron aserradas y dimensionadas en probetas en el aserradero perteneciente a la Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza de la Universidad de Chile, dimensionamiento que se basó en la norma ASTM D2017-81. Conforme a dicha norma, se utilizaron probetas de madera (test blocks) de roble adulto, y de renoval de roble con y sin tratamiento de vaporizado, con las siguientes dimensiones y características: 25 x 25 x 9 mm, con la dimensión de 9 mm en la dirección del grano, sin evidencia visible de infección por hongos y libre de nudos.
- De la madera de renoval de roble se obtuvieron probetas de duramen y de albura, con las dimensiones y características anteriormente señaladas.

2.1.2 Hongos empleados en el estudio

Los hongos de pudrición fueron seleccionados de acuerdo a la norma E10 – 09 “Standard Method of Testing Wood Preservatives by Laboratory Soil – Block Cultures” y corresponden a *Poria monticola* (pudrición café) y *Polystictus versicolor* (pudrición blanca), códigos 104 y 106 respectivamente. Estos códigos corresponden a los asignados según la nomenclatura empleada en el Laboratorio de Biodegradación y Preservación de la Madera, de cuya micoteca fueron obtenidos los hongos mencionados.

2.1.3 Equipos y materiales de laboratorio

- Cámara de flujo laminar (figura 1)
- Autoclave (figura 2A)
- Cámara de cultivo (figura 2B)
- Bomba de vacío-presión (figura 3A)
- Estufa de secado (figura 3B)
- Destilador.
- Baño termostático
- Balanza digital con una precisión de $\pm 0,001$
- Molino Wiley.
- Reactivos apropiados para cada tratamiento.
- Sustrato compuesto por tierra de vivero y tierra de hojas, en la proporción 70% y 30% respectivamente.
- Frascos de vidrio de 1000 ml.
- Material fungible de laboratorio (varillas de agitación, placas Petri, termómetros, vasos precipitados, crisoles de filtrado, matraces).



Figura 1: Cámara de flujo laminar

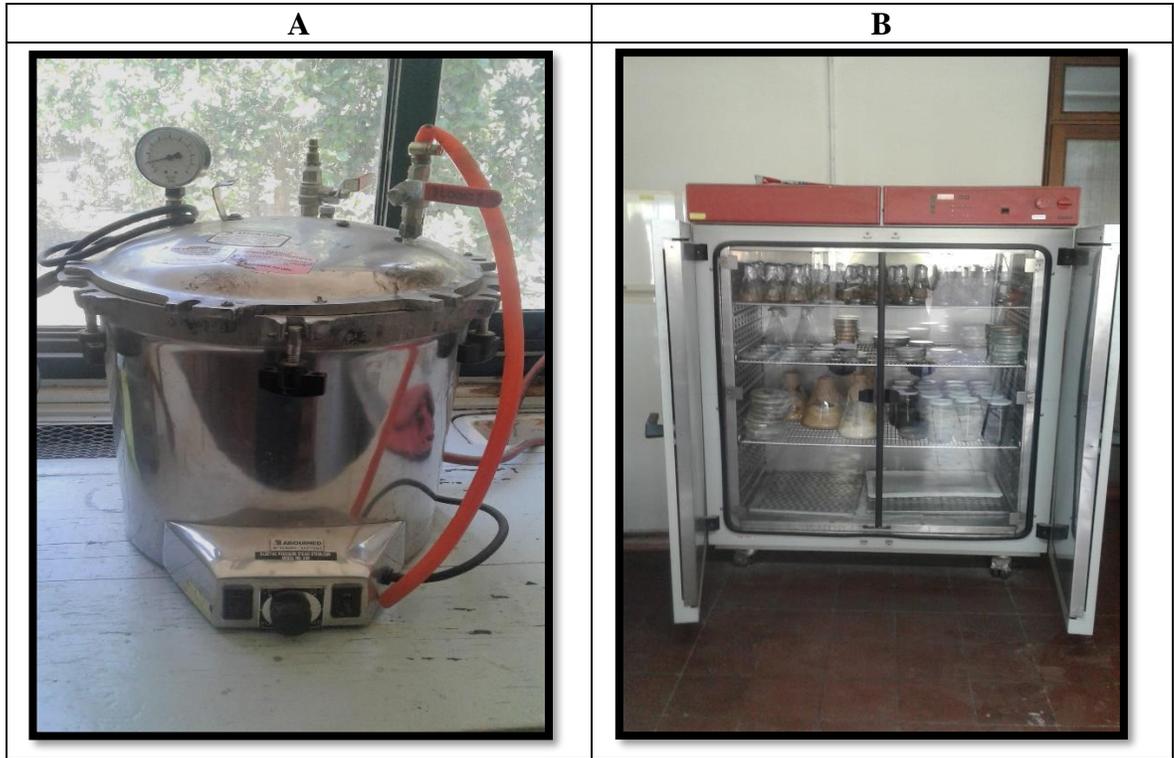


Figura 2: A. Autoclave B. Cámara de cultivo

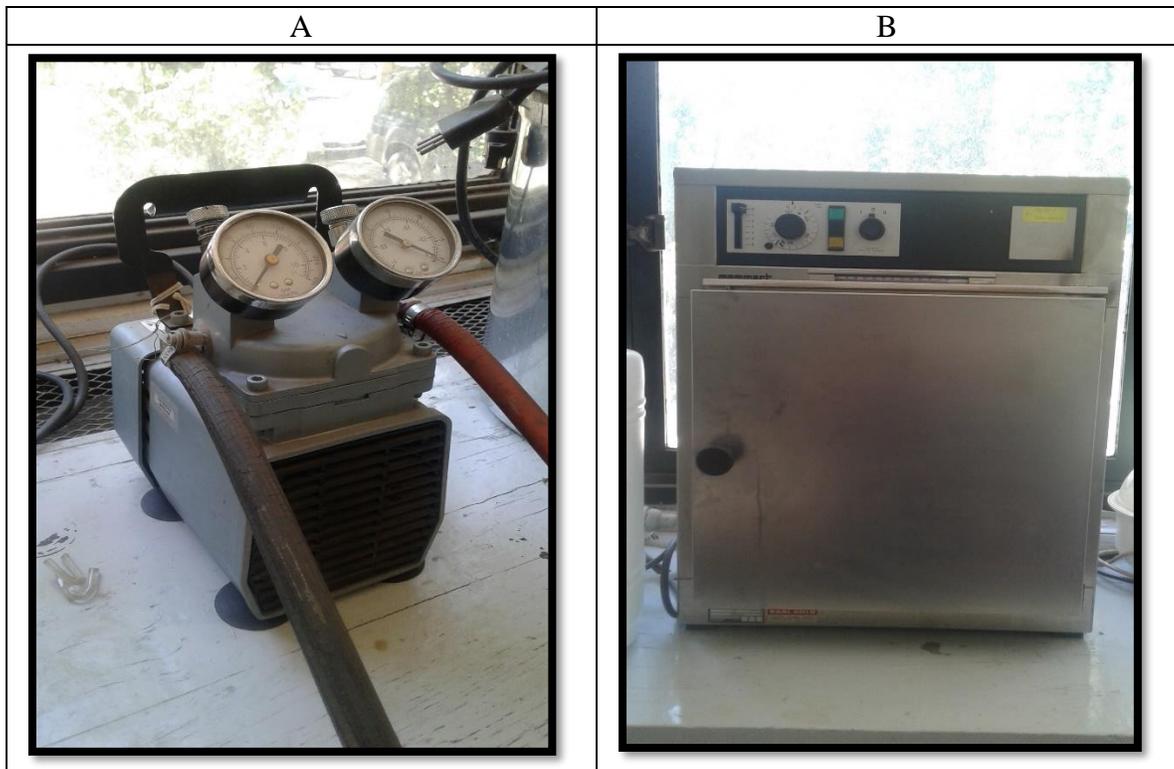


Figura 3: A. Bomba de vacío-presión B. Estufa de secado

2.2 Método

2.2.1 Diseño experimental

A efectos de cumplir con los objetivos planteados, se diseñó un experimento factorial que con las siguientes variables de entrada y niveles:

- a) Tipo de madera
 - Roble adulto: R_A
 - Albura de renoval de roble con tratamiento de vaporizado: A_{CV}
 - Albura de renoval de roble sin tratamiento de vaporizado: A_{SV}
 - Duramen de renoval de roble con tratamiento de vaporizado: D_{CV}
 - Duramen de renoval de roble sin tratamiento de vaporizado: D_{SV}

- b) Especie de hongo
 - *Polystictus versicolor* (podrición blanca): P_B
 - *Poria monticola* (podrición café): P_C

- c) Tiempos de acción fúngica
 - Primer tiempo de ataque fúngico (2 meses): T_1
 - Segundo tiempo de ataque fúngico (4 meses): T_2

La combinación de los distintos niveles de las variables de entrada da como resultado veinte tratamientos distintos ($5 \times 2 \times 2$). Esto se puede explicar más gráficamente con multiplicación de matrices, como se muestra a continuación:

$$\begin{pmatrix} R_A \\ A_{CV} \\ A_{SV} \\ D_{CV} \\ D_{SV} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} P_B & P_C \end{pmatrix} = \begin{matrix} R_A P_B + A_{CV} P_B + A_{SV} P_B + D_{CV} P_B + D_{SV} P_B + \\ R_A P_C + A_{CV} P_C + A_{SV} P_C + D_{CV} P_C + D_{SV} P_C \end{matrix}$$

Luego:

$$\begin{pmatrix} R_A P_B & A_{CV} P_B & A_{SV} P_B & D_{CV} P_B & D_{SV} P_B & R_A P_C & A_{CV} P_C & A_{SV} P_C & D_{CV} P_C & D_{SV} P_C \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix}$$

$$= R_A P_B T_1 + A_{CV} P_B T_1 + A_{SV} P_B T_1 + D_{CV} P_B T_1 + D_{SV} P_B T_1 + R_A P_C T_1 + A_{CV} P_C T_1 + A_{SV} P_C T_1 + D_{CV} P_C T_1 + D_{SV} P_C T_1 + R_A P_B T_2 + A_{CV} P_B T_2 + A_{SV} P_B T_2 + D_{CV} P_B T_2 + D_{SV} P_B T_2 + R_A P_C T_2 + A_{CV} P_C T_2 + A_{SV} P_C T_2 + D_{CV} P_C T_2 + D_{SV} P_C T_2$$

Se realizaron cinco repeticiones por tratamiento, por lo que se evaluó un total de cien probetas. Las variables respuesta evaluadas para cada tratamiento fueron: pérdida de peso, contenido de lignina y solubilidad en soda de la madera luego del ataque fúngico, medidas al segundo y al cuarto mes desde el inicio de la incubación.

2.2.2 Vaporizado y esterilización de la madera

Luego de obtener las probetas de madera con las dimensiones especificadas anteriormente, se procedió a la aplicación del tratamiento de vaporizado a 40 de las 100 probetas del total evaluado, es decir, 20 probetas de madera de albura de renoval y 20 probetas de duramen de renoval, además de 20 probetas de roble adulto como testigo. A continuación en el cuadro 3 y en la figura 4 respectivamente, se muestra la forma en que se distribuyó la madera para realizar el estudio y el proceso de vaporizado al interior de la autoclave.

	Tratamiento/Madera	Albura renoval	Duramen renoval	Roble adulto
N° de probetas tratadas	Con vaporizado	20	20	0
	Sin vaporizado	20	20	20

Cuadro 3: Distribución de la cantidad de probetas por tipo de madera y tratamiento.

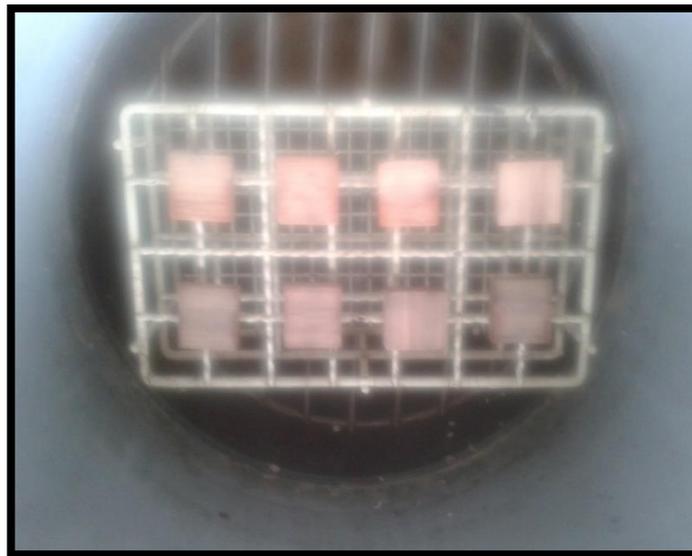


Figura 4: Proceso de vaporizado al interior de la autoclave.

El proceso de vaporización de la madera se realizó durante 7 horas aproximadamente, en una autoclave a 100°C y presión atmosférica. Luego, se procedió al secado de la madera en una

estufa a $\pm 105^{\circ}\text{C}$. Terminada esta etapa, las probetas se llevaron a un contenido de humedad (CH) cercano al 60%, empleando para ello una bomba de vacío-presión. Aquellas probetas que no fueron sometidas al proceso de vaporizado, se esterilizaron en autoclave a 120°C y a una presión de 1 atm.

La figura 5 muestra las probetas de albura y duramen de renoval antes y después del vaporizado.

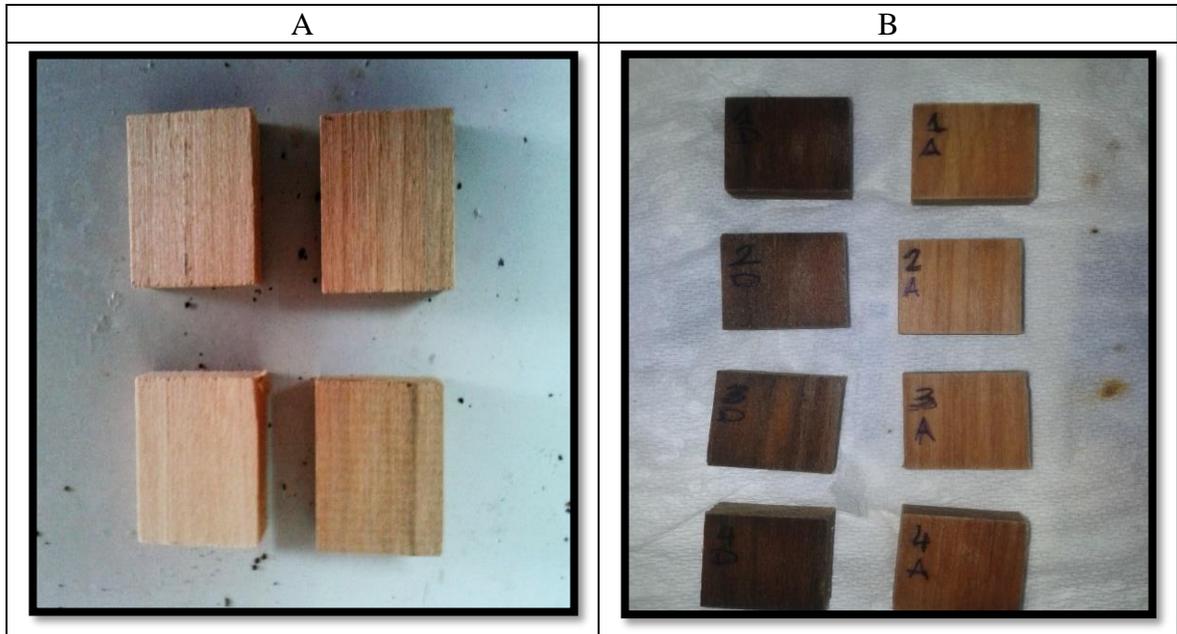


Figura 5: A. Probetas de albura (izquierda) y duramen (derecha) antes del vaporizado B. Probetas de duramen (izquierda) y albura (derecha) después del vaporizado

2.2.3 Montaje del ensayo

Como fue mencionado, el ensayo de biodegradación se realizó basándose en el método señalado en la norma ASTM D2017-81, el cual establece un procedimiento para evaluar la pérdida de peso generada por el ataque de hongos de pudrición. Por otra parte, utilizando la norma TAPPI T 264 om-88, se realizó la preparación de la madera para su posterior análisis químico, el que se desarrolló siguiendo el método indicado en la norma TAPPI T 222 om-88 para el caso de la determinación de lignina, y en la norma TAPPI T 212 om-88 para la determinación de la solubilidad en soda, en ambos casos sobre la madera luego del ataque fúngico (TAPPI, 1988).

Para llevar a cabo el montaje propiamente tal del ensayo, las probetas de madera (test blocks), tanto las que fueron sometidas al proceso de vaporizado como las que no, se introdujeron en

frascos de vidrio (conteniendo suelo) sobre placas de alimentación, también de madera (*Feeder Strips*). Estas últimas fueron previamente inoculadas con los hongos e incubadas a 25°C, llevándose a los frascos una vez que estuvieron cubiertas por micelio en toda su superficie. Con esto se evitó el contacto directo de las probetas con el suelo, asegurándose que el ataque de los hongos no se viera afectado por la presencia de otros microorganismos que pudiesen estar en él, lo que podría contaminar las probetas afectando el proceso de biodegradación fúngica y, por ende, los resultados del ensayo.

Se emplearon frascos de vidrio de 1000 ml de capacidad en los cuales, previo a la incorporación de las placas de alimentación y de las probetas, se introdujeron 200 g de suelo, compuesto por tierra de vivero y tierra de hojas en la proporción 70% y 30% respectivamente. De esta manera el sustrato quedó con una capacidad de retención de agua entre 20 y 40%, pH entre 5 y 8, como estipula la norma. Finalmente, las probetas se introdujeron en los frascos los que fueron sellados y llevados a incubación por un período de 2 y 4 meses según el tiempo de medición establecido, obteniendo en última instancia, la colonización de los hongos de pudrición sobre la madera (figura 7).



Figura 6: Frascos con sustrato y probetas colonizadas por los hongos.

2.2.4 Determinación del porcentaje de pérdida de peso (%PP)

La determinación del %PP de las probetas, se realizó basándose en el método señalado en la norma ASTM D2017-81. Para llevar a cabo este proceso, en primer lugar se obtuvo el peso anhidro de todas las probetas antes de que fueran sometidas al ataque fúngico, secándolas en una estufa a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ hasta alcanzar un peso constante. Luego del ataque fúngico, se obtuvo nuevamente el peso anhidro de las probetas, medidos a los 2 y 4 meses desde el inicio del ataque). Los resultados se representaron en porcentajes y se calculó como se muestra a continuación.

$$X = \frac{P_2 * 100}{P_1}$$

Donde:

X corresponde al peso final de las probetas expresada en porcentaje luego del ataque fúngico.

P_1 corresponde al peso seco (g) de las probetas antes del ataque fúngico

P_2 corresponde al peso seco (g) de las probetas después del ataque fúngico

Finalmente se determinó el %PP con la siguiente operación: %PP = 100% - X (%)

2.2.5 Determinación del porcentaje de solubilidad en soda (%S)

Esta determinación se llevó a cabo siguiendo el método señalado en la norma TAPPI T 212 om – 88. El método se puede aplicar a la madera sólida y a la pulpa de madera sin blanquear, Este proceso se realizó mediante una extracción aplicando una solución caliente de hidróxido de sodio al 1% de NaOH durante una hora. La pérdida de peso se determina y se calcula como porcentaje de solubilidad.

Para realizar este procedimiento, previamente se molieron las probetas hasta obtener harina de madera. Se separaron muestras de $2,0 \pm 0,1$ g, depositándolas en vasos de precipitado, a las cuales se les añadió 100 ml de hidróxido de sodio al 1% de NaOH, luego se cubrieron los vasos con vidrios reloj y se colocaron en un baño termostático a una temperatura entre 95° y 100°C durante un periodo de 60 minutos. Se mantuvo el agua del baño en el punto de ebullición y su nivel por encima del de la solución alcalina en el vaso de precipitado.

Transcurrido los 60 minutos, se transfirió el material a un crisol previamente tarado y se lavó con 100 ml de agua caliente. Se añadieron 25 ml de ácido acético al 10% de CH_3OOH , se dejó en remojo 1 minuto antes de removerlo. Este paso se repitió con una segunda porción de ácido acético y luego se lavó el material con agua caliente hasta que quedó libre de ácido. Finalmente, los crisoles y su contenido se secaron en estufa a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ hasta peso constante el que fue registrado.

Para realizar el cálculo de la solubilidad en soda, en primer lugar se midió el peso seco de los crisoles antes de la extracción. Este peso obtenido, se le resto al peso seco registrado del crisol con la madera residual después de la extracción, obteniendo los valores de B (peso seco del material residual) para calcular el porcentaje de solubilidad según la formula como sigue a continuación

$$S = \frac{A - B}{A} * 100$$

Donde:

S representa el porcentaje de solubilidad en soda de la madera analizada.
A corresponde al peso de la muestra inicial de harina de madera (2 g secos).
B corresponde al peso seco (g) del material residual después de la extracción.

2.2.7 Determinación del porcentaje de contenido de lignina (%L)

Para desarrollar esta etapa se empleó como referencia el método señalado en la norma TAPPI T 222 om – 88, el cual describe un procedimiento que se puede aplicar para la determinación del %L insoluble en ácido sulfúrico de la madera y en todos los grados de pastas papeleras sin blanquear.

En primer lugar, se introdujeron en vasos de precipitado las muestras secas de maderas de $1,0 \pm 0,1$ g, a los que se les añadió 15 ml de ácido sulfúrico al 72% de H_2SO_4 frío (10 a $15^\circ C$). El ácido se añadió gradualmente en pequeños incrementos mientras se agitó y se maceró el material con una varilla de vidrio. Los vasos de precipitado se mantuvieron en un baño a $2 \pm 1^\circ C$ durante la dispersión del material. Después que el material se dispersó, se cubrieron los vasos con vidrio reloj, removiéndose el contenido con frecuencia, asegurándose que la solución cubriera toda la muestra de madera.

Se añadió aproximadamente 300 a 400 ml de agua destilada en matraces de 1000 ml, a los cuales se transfirió el material desde los vasos de precipitado. Luego, con agua destilada se disminuyó la concentración del ácido a un 3% en el interior de los matraces, aumentando su contenido hasta llegar a los 575 ml. Esta solución se hirvió durante 4 horas en un baño termostático, manteniendo constante el volumen de agua del baño, adicionando frecuentemente agua caliente. La lignina finalmente dispersa, requirió alrededor de un día completo para que se asentara al fondo de los matraces.

Posteriormente, sin levantar el precipitado, se decantó la solución sobrante a través de crisoles filtrantes. Se transfirió la lignina cuantitativamente al filtro, usando agua caliente y

una varilla de vidrio para liberar la muestra del ácido sobrante. Finalmente los crisoles con la lignina se secaron en la estufa a $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$ hasta llegar a un peso constante, luego se enfriaron en un desecador y se pesaron. La determinación del contenido de lignina se expresa en porcentaje y se calculó con la siguiente formula:

$$L = \frac{A * 100}{W}$$

Donde:

L representa el contenido de lignina de la madera analizada.

A corresponde al peso seco (g) del material residual (lignina) después de la extracción.

W corresponde al peso seco inicial (g) del material antes de la extracción.

2.2.8 Tratamiento de datos

Los datos obtenidos de los ensayos realizados en laboratorio fueron ordenados en Excel. Luego, para el análisis estadístico de la información y elaboración de los gráficos que representaron el comportamiento de los datos, se utilizó el programa Minitab17. Dicho análisis comprendió un modelo lineal general, a través del cual, se generó una ANOVA para cada variable del salida, además de las comparaciones múltiples correspondientes, donde se utilizó la prueba paramétrica de Tukey con $\alpha = 0,05$.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para llevar a cabo el análisis de los resultados, no se consideraron válidos los datos obtenidos para el %PP, generado por el hongo de pudrición blanca (*Polystictus versicolor*) al tiempo de ataque T_2 , correspondientes a los tipos de madera A_{SV} , D_{CV} y D_{SV} , debido a que si bien se pudieron analizar desde el punto de vista estadístico, fueron incompatibles al momento de relacionarlos con el proceso de pudrición fúngica, principalmente porque presentaron comportamientos erróneos, y por lo tanto, resultados inconsistentes cuando se compararon ambos tiempos de ataque, presentando un %PP mucho menor al tiempo T_2 (4 meses) que al tiempo T_1 (2 meses), lo que es ilógico considerando que las maderas utilizadas en ambos tiempos de ataque para todos los tipos de madera (en este caso albura y duramen, con y sin vaporizado) tenían idénticas condiciones iniciales, es decir, fueron extraídas de la misma troza de renoval, aserradas y dimensionadas en probetas (según norma ASTM D2017-81) de igual forma, y aplicando las mismas condiciones de vaporizado para aquellas que lo requirieron (mismo tiempo de vaporizado en autoclave). Este problema de incompatibilidad fue producto del anormal desarrollo del hongo durante el ensayo, lo que puede ser atribuido a dos posibles factores:

- En primer lugar, al humectar las probetas de madera por medio de vacío para su posterior proceso de pudrición con ambos hongos, hubo algunas que no obtuvieron el mismo contenido de humedad que el resto, posiblemente debido a que durante el proceso de humectación quedaron probetas traslapadas unas sobre otras, impidiendo que absorbieran la cantidad de agua necesaria, presentando un contenido de humedad más bajo por lo que al momento de entrar en contacto con el hongo, dicha humedad no fue suficiente para el correcto desarrollo del mismo dentro de los frascos.
- El segundo factor posible es que al momento de replicar el hongo desde la placa madre a las placas secundarias, y posteriormente inocularlo sobre las probetas para su posterior desarrollo, algunos trozos replicados no hayan tenido una densidad de micelio suficiente para que la colonización del hongo se llevara de manera adecuada. Adicionalmente, es posible que ambos factores mencionados pudieran actuar tanto en forma independiente como de forma conjunta.

Para ser congruente con lo anterior, tampoco se consideraron en el análisis los resultados obtenidos para el %S y el %L de las maderas atacadas con el hongo de pudrición blanca al tiempo de ataque T_2 , ya que ambas variables respuesta están estrechamente relacionadas con aquellos resultados obtenidos en el %PP. De esta manera, para realizar el análisis estadístico y utilizar la mayor cantidad de datos fiables posibles, se compararon, para todas las variables de salida recién nombradas, los resultados obtenidos al tiempo de ataque T_1 para ambos tipos de pudrición, como también la comparación de ambos tiempos de ataque sólo para pudrición café (*Poria monticola*).

En el caso particular del %L, para efectos del análisis estadístico, sólo se compararon los resultados obtenidos al tiempo de ataque T_1 para ambos hongos de pudrición. Debido a que la lignina fue el parámetro de evaluación, no generó información relevante al contrastar

ambos tiempos de ataque (T_1 y T_2) para *Poria monticola*, ya que es el hongo de pudrición blanca el que preferentemente solubiliza y degrada lignina, además de otros componentes en menor medida a diferencia del hongo de pudrición café, el cual se inclina por la celulosa. Para este último, los resultados obtenidos para el %L se expresaron en el cuadro 4, apartado 3.3.2.

3.1 Porcentaje de pérdida de peso (%PP)

3.1.1 Análisis de resultados al tiempo de ataque T_1

El análisis estadístico realizado, indicó que existen diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0,05$) entre los tipos de madera (R_A , A_{CV} , A_{SV} , D_{CV} , D_{SV}), entre las especies de hongo (*Polystictus versicolor* y *Poria monticola*, pudrición blanca y pudrición café respectivamente), y en la interacción tipo de madera*hongo.

El análisis del comportamiento de los tipos de madera frente al ataque fúngico, indicó que R_A fue el único que presentó diferencias significativas en comparación al resto. Esto se manifestó en la interacción de la madera con el hongo de pudrición blanca, ya que en contraste con R_A , las maderas de renoval, tanto de albura como de duramen, con y sin vaporizado, no presentaron diferencias significativas, lo que reveló que el vaporizado de la madera no tuvo efecto alguno sobre el ataque de pudrición blanca. En el caso de la pudrición café, como se aprecia en la gráfico B de la figura 7, generó un %PP menor para todos los tipos de madera, sin embargo, no hubo diferencias significativas entre estos últimos, lo que indicó que frente a esta pudricion, el vaporizado tampoco no tuvo influencia en el %PP.

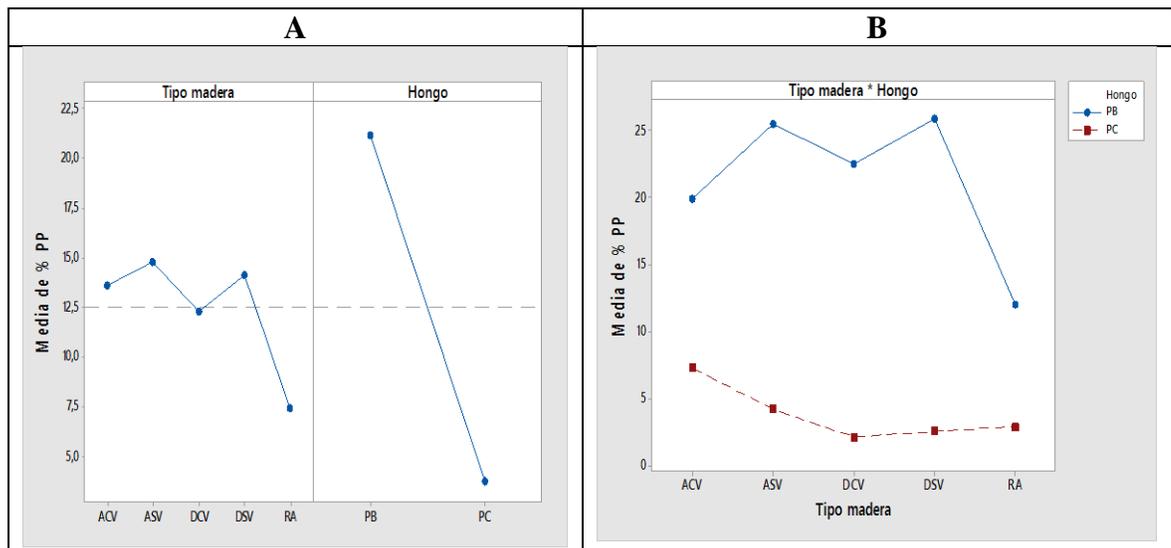


Figura 7: A. Gráfico de efectos principales para %PP al tiempo de ataque T_1 . B. Gráfico de interacción para el %PP al tiempo de ataque T_1 .

3.1.2 Análisis de resultados para pudrición café

El análisis estadístico realizado indicó que existen diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0,05$) entre los tiempos de ataque (T_1 y T_2), sin embargo, no ocurre lo mismo entre los tipos de madera (R_A , A_{CV} , A_{SV} , D_{CV} , D_{SV}), y en la interacción tipo de madera*tiempo de ataque.

En este caso, no se generaron diferencias estadísticamente significativas entre los tipos de madera, comportándose de manera similar entre sí, por lo que el vaporizado no provocó ningún efecto frente al ataque de pudrición café, esto, independiente de la gran diferencia en el % PP que sufrieron tanto A_{CV} y A_{SV} al tiempo de ataque T_2 en comparación al resto de los tipos de madera, lo que muestra que el tratamiento de vaporizado hizo a la albura más susceptible al ataque de hongos de pudrición. Esto se puede relacionar con lo establecido por Simpson (1975), señalando que una de las características más importantes de la madera vaporizada es el aumento de su permeabilidad. Considerando además, el nulo o mínimo grado de duraminización de la albura de renoval, resulta lógico que este tipo de madera sea degradada fácilmente por hongos de pudrición de la madera, sobre todo si fue expuesta a un tiempo de ataque fúngico más prolongado (4 meses).

Por otra parte, la interacción entre los tipos de madera y el tiempo de ataque tampoco mostró diferencias estadísticamente significativas, sin embargo, el tiempo de ataque como variable individual, sí generó diferencias significativas, estableciéndose que el %PP se debió principalmente al tiempo de exposición de las maderas al ataque fúngico, sin importar el tipo de madera utilizada.

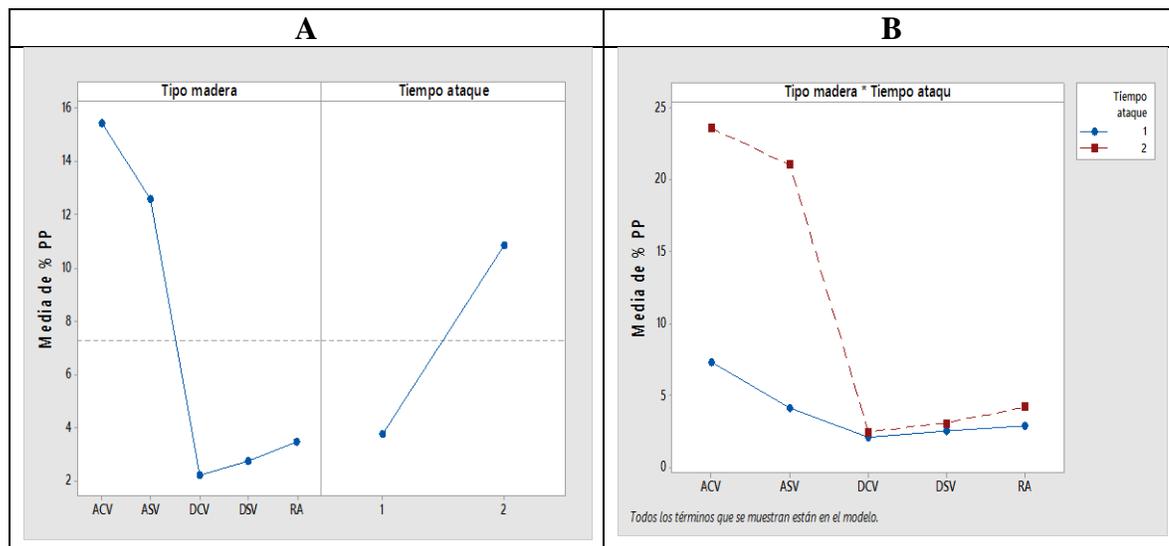


Figura 8: A. Gráfico de efectos principales para %PP luego del ataque de *Poria monticola*. B. Gráfico de interacción para %PP luego del ataque de *Poria monticola*

3.2 Porcentaje de solubilidad (%S)

3.2.1 Análisis de resultados al tiempo de ataque T₁

El análisis estadístico realizado indicó que existen diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0,05$) entre los tipos de madera (R_A, A_{CV}, A_{SV}, D_{CV}, D_{SV}), entre las especies de hongo (*Polystictus versicolor* y *Poria monticola*, pudrición blanca y pudrición café respectivamente), y en la interacción tipo de madera*hongo.

La comparación entre los tipos de madera mostró la existencia de diferencias significativas entre ellos, debido a que D_{SV} se comportó distinto al resto. Este tipo de madera presentó el %S más alto, lo que indicó que sufrió el mayor biodeterioro durante el ataque fúngico. Entre los hongos de pudrición también se encontraron diferencias significativas, comportamiento que se representó en el gráfico A y en la interacción con el tipo de madera en el gráfico B de la figura 9, donde no sólo D_{SV} presentó diferencias significativas al interactuar con *Polystictus versicolor*, sino que A_{SV} también mostró diferencias significativas al interactuar con *Poria monticola*. Esto reveló que el proceso de vaporizado no tuvo efecto sobre el biodeterioro (%S) de la madera, ya que no marcaron diferencia ni en el ataque de pudrición blanca ni en el ataque de pudrición café a los dos meses de iniciado el ensayo.

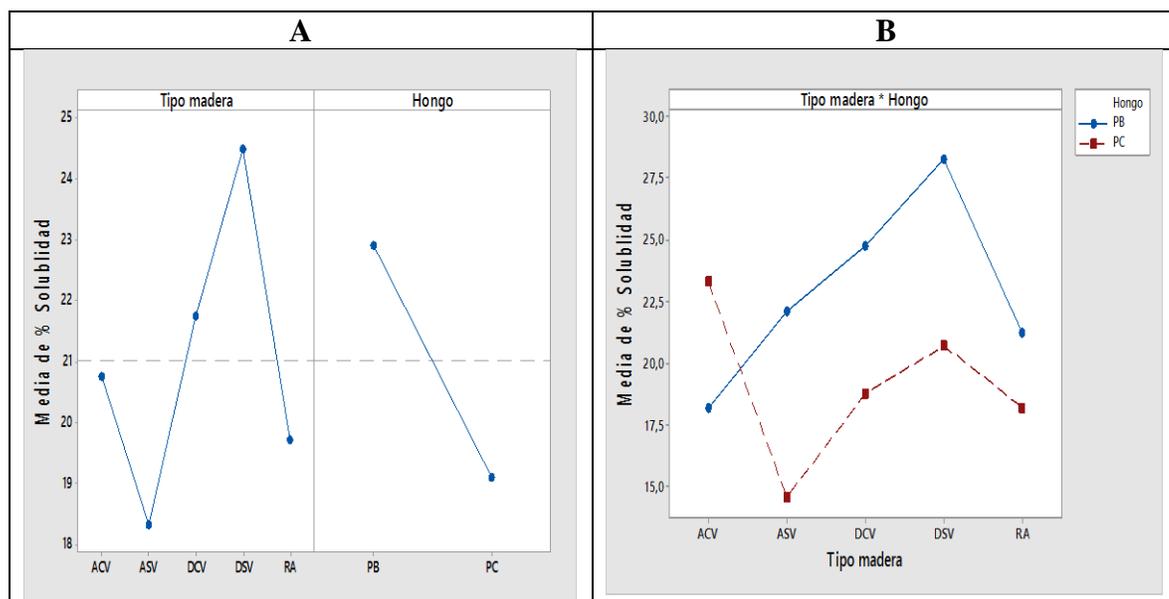


Figura 9: A. Gráfico de efectos principales para %S al tiempo de ataque T₁ B. Gráfico de interacción para %S al tiempo de ataque T₁

3.2.2 Análisis de resultados para pudrición café

En este caso, el análisis estadístico indicó que existen diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0,05$) entre todos los tipos de madera (R_A , ACV , ASV , DCV , DSV), como también entre los tiempos de ataque (T_1 y T_2) y en la interacción tipo de madera*tiempo de ataque.

Los tipos de madera DSV y DCV presentaron diferencias significativas en comparación con el resto de los tipos de madera, lo que se aprecia en el gráfico A de la figura 10, donde éstas maderas presentaron un %S mucho menor al resto, y por tanto, un grado de biodegradación menor. Esto quiere decir que si bien, uno de los tipos de madera mencionados presenta vaporizado, en términos generales, no indicó una influencia del vaporizado sobre la resistencia de la madera frente al ataque del hongo de pudrición café.

Por otra parte, el análisis de los tiempos de ataque señaló que sí existen diferencias significativas entre T_1 y T_2 , estableciendo que estos tienen directa influencia en la biodegradabilidad de la madera. A su vez, la interacción del tipo de madera con el tiempo de ataque, como se muestra en la gráfico B de la figura 10, indicó que existen diferencias significativas para el tipo de madera ASV a ambos tiempos de ataque, por lo que se reafirma que el vaporizado no influyó en la biodegradabilidad de la madera, independiente del tiempo de exposición de la misma frente al ataque fúngico.

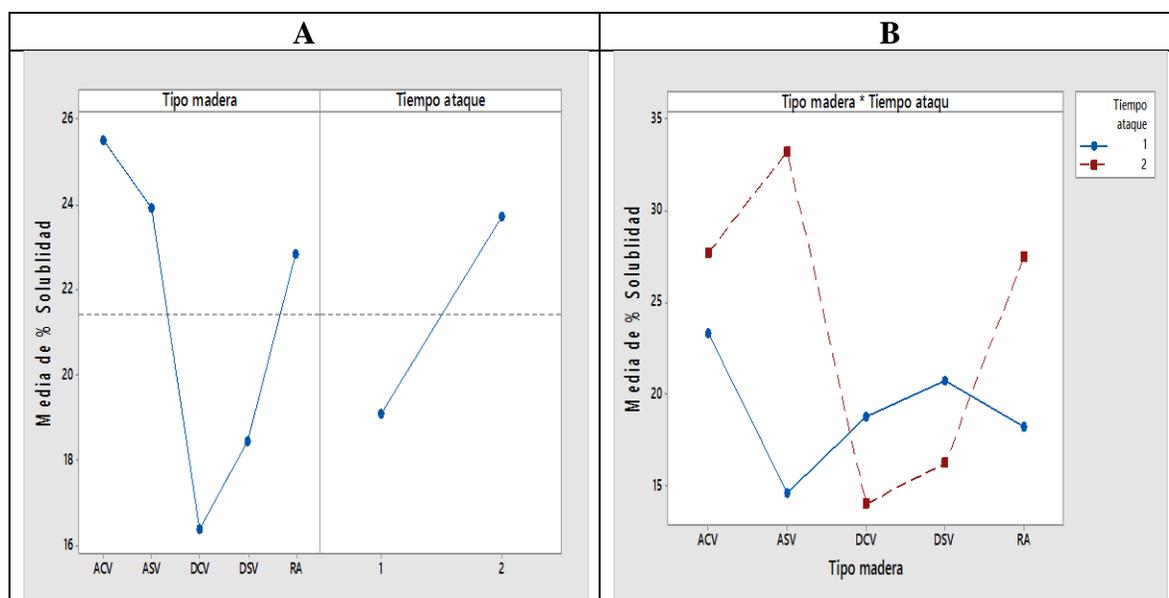


Figura 10: A. Gráfico de efectos principales para %S luego del ataque *Poria monticola* B. Gráfico de interacción para %S luego del ataque de *Poria monticola*

3.3 Porcentaje de Lignina (%L)

3.3.1 Análisis de resultados al tiempo de ataque T₁

El análisis estadístico realizado indicó que existen diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0,05$) entre las especies de hongo (*Polystictus versicolor* y *Poria monticola*, pudrición blanca y pudrición café respectivamente), sin embargo, no ocurre lo mismo entre los tipos de madera (RA, ACV, ASV, DCV, DSV), ni en la interacción tipo de madera*hongo.

El análisis de los resultados para el %L indicó, que sólo entre las especies de hongos de pudrición se encontraron diferencias significativas, estableciéndose que fue el efecto de esta variable la que influyó en los porcentajes obtenidos, no así el vaporizado.

Como se aprecia en ambos gráficos de la figura 11, fue el hongo de pudrición blanca el que generó un %L más bajo, lo que es lógico debido a que es este tipo de pudrición el que degrada preferentemente lignina, siendo ambos tipos de maderas vaporizadas, ACV y DCV, las que presentaron el menor %L. Se puede reafirmar nuevamente lo señalado por Simpson (1975), sobre el aumento de la permeabilidad de la madera vaporizada, e incluso, considerar la posibilidad de que el vaporizado pudo generar el efecto inverso al esperado, ya que probablemente no sólo se alteraron las propiedades físicas de la madera, sino también las propiedades químicas, haciendo de la madera vaporizada un material aún más vulnerable a un ataque fúngico, lo que provocó, en última instancia, la disminución de su resistencia frente al biodeterioro por hongos de pudrición.

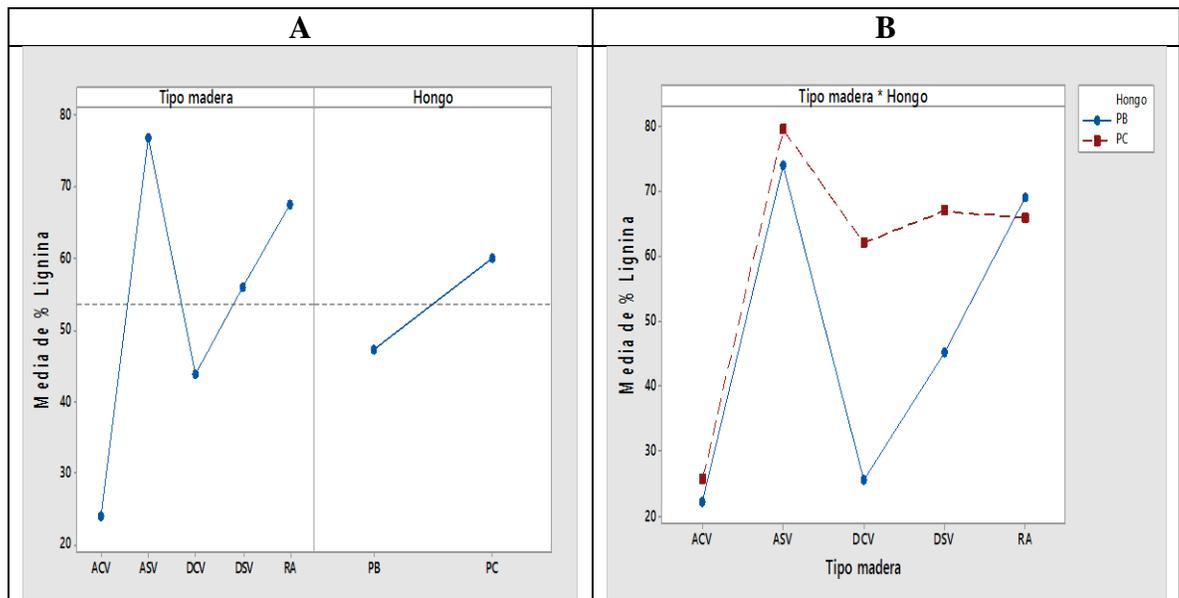


Figura 11: A. Gráfico de efectos principales para %L al tiempo de ataque T₁ B. Gráfico de interacción para %L al tiempo de ataque T₁

3.3.2 Resultados obtenidos para pudrición café

Como se señaló con anterioridad y debido a las razones expuestas al inicio de este capítulo, los resultados obtenidos para el %L para ambos tiempos de ataque de pudrición café no fueron considerados para el análisis, y sólo se exponen a efectos informativos a continuación en el cuadro 4.

Tipo de madera	Tiempo de ataque	
	T1	T2
RA	65,9	73,3
ACV	25,7	81,8
ASV	79,6	81,7
DCV	62,1	67,2
DSV	67	89,6

Cuadro 4: %L obtenido para pudrición café

4 CONCLUSIONES

El porcentaje de pérdida de peso obtenido indicó que el vaporizado, y por ende el cambio de color, no tiene influencia sobre la resistencia a la pudrición de la madera de renoval de roble frente al ataque de *Polystictus versicolor* (pudrición blanca) medida a los 2 meses, y frente al ataque de *Poria monticola* (pudrición café) medida a los 2 y 4 meses desde el inicio del ataque fúngico.

A los dos meses desde el inicio del ataque fúngico, *Polystictus versicolor* generó en todos los tipos de madera (R_A , A_{cv} , A_{sv} , D_{cv} , D_{sv}) un porcentaje de pérdida de peso mayor en comparación con *Poria monticola*, así como también un porcentaje de solubilidad en soda más alto, indicando que el hongo de pudrición blanca provocó el mayor biodeterioro en la madera con y sin vaporizado.

Luego del análisis del porcentaje de pérdida de peso, se observó que no hubo diferencias estadísticamente significativas entre el duramen de renoval con y sin vaporizado, siendo la madera de roble pellín la que presentó la mayor resistencia al ataque de hongos de pudrición.

De acuerdo con los resultados obtenidos para el porcentaje de pérdida de peso, de solubilidad en soda y el porcentaje de lignina, e independientemente de la aplicación del proceso de vaporizado, la madera de renoval de roble pertenecería a la categoría no durable, teniendo como referencia la Nch 789/1. Of 1987.

5 BIBLIOGRAFIA

- Addis, S; Harris, R. y Schroeder, J. 1989. Steaming of red oak to kiln – drying: Effects on moisture movement. *Forest products journal* 39(11/12): pp 70–72.
- Agrios, G. 1996. *Fitopatología*. Ed. Limusa. Bogotá. Colombia. 838p.
- American Standard Test Method (ASTM), 1984. Standard Method of Accelerated Laboratory Test of Natural Decay Resistance of Woods.
- American Wood Protection Association Standard, 2009. Standard Method of Testing Wood Preservatives by Laboratory Soil – Block Cultures”.
- Brauner, A. and Conway, E. 1964. Steaming walnut for color. *Forest products journal* 14(11): pp 525–527.
- Carabias, R. y Karsulovic, J. 1978. Densidad y propiedades mecánicas de madera de renovales de raulí. *Boletín Técnico* n° 51. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 36 p.
- Chen, P. and Workman, E. 1980. Effect of steaming on some physical and chemical properties of black walnut heartwood. *Wood and fiber* 11(4): pp 218–237.
- Chow, S. and Troughton, G. 1973. Heat – induced color – intensity change in coastal Douglas – Fir and White Spruce. *Wood and fiber* 4: pp 259–263.
- Cohen, M and Gabriele, P. 1982. Degradation of Coal by the Fungi *Polyporus versicolor* and *Poria monticola*: pp 23-27.
- CORFO – Fontec – Forestal Russfin Ltda. 1999. Investigación para el desarrollo de una planta prototipo que permita homogeneizar el color de la madera nativa de Lengua. Chile.
- Donoso, C. 1981. Tipos forestales de los bosques nativos de Chile. Documento de trabajo n° 38. CONAF/PNUD/FAO. Santiago, Chile. 70p.
- Donoso, C. 1988. Los renovales de Chile. *Corma* 205(2): pp 15.
- Eriksson, K. E. 1990. Biotechnology in the pulp and paper industry. *Wood Science and Technology*, 24: 79-101
- Espinosa, C. 2004. Cambio de color en madera de renovales de raulí (*Nothofagus alpina* (Poepp. Et. Endl.) Krasser) y roble (*Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst) mediante procesos de vaporizado. Memoria de Ingeniero de la Madera. Facultad de Cs. Forestales y Conservación de la Naturaleza, U de Chile. Santiago. 88p.

- Fengel, D and Wegener, G. 1984. Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. Walter de Gruyter & Co. Berlin. Alemania. 613p.
- Hall y Witte. 1998. *Maderas del Sur de Chile - Árboles, Aplicaciones, Procesos*. Santiago, Chile.
- Hildebrand, R. 1970. Kiln drying of sawn timber. Robert Hildebrand. 200p
- Kirk, T and Farrell R. 1987. Enzymatic “combustión”: the microbial degradation of lignin. Annual Reviews of Microbiology; 41: 465-505.
- Luley, C. J. 2005. Wood Decay Fungi Common to Urban Trees in Northeast and Central United States. Urban Forestry LLC. Naples, NY.
- Mc Ginnes, E. and Rosen, H. 1984. Macroscopic and microscopic analyses of color changes of wood pressure steam – dried above atmospheric pressure. Wood and fiber 16 (1): pp 48–56.
- Nch 789/1. Of 87. Clasificación de maderas comerciales por su durabilidad natural.
- Nutsch, W. 2000. Tecnología de la Madera y el Mueble. 515p.
- Remacha, A. 2004. Degradación de la madera por los organismos xilófagos vegetales. Universidad Politécnica de Madrid. España. 89-91p.
- Saccarello, M. V. y Borgioli, L. 2010. La Madera: de su conocimiento y conservación.
- Schmidt, C. J., B. Whitten, and D. Nicholas, 1981. A proposed role for oxalic acid in non-enzymatic wood decay by brown-rot fungi. Proc Am. Wood Preserv. Assoc. 77;1-7.
- Schwarze, F., Engels, J, and Mattheck, C, 2000. Fungal Strategies of Wood Decay in Trees. Springer, New York, NY.
- Sehlsted, M. 2003. Colour responses to heat – treatment of extractives and sap from pine and spruce. 8th International IUFRO Wood drying conference. 459–464 p.
- Siau, J. 1971. Flow and Wood. Syracuse University Press. 131 p
- Simpson, W. 1975. Effect of steaming on the drying rate of several species of wood. Wood Science 7(3): pp 247–269.
- Simpson, W. 1976. Steaming northern red oak to reduce kiln – drying time. Forest products journal 26(10): pp 35–36.
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry. 1998. TAPPI Tests methods vol. 1. Fibrous material and pulping testing T1 – T270. Paper and paperboard testing T400 – T547. TAPPI, Atlanta.

Torres, H. 1971. Maderas. Corporación Chilena de la Madera. Santiago, Chile. 261p.

Vignote, S. y Martinez, I. 2006. Tecnología de la Madera. 678p.

Zanni, E. 2004. Patología de la Madera. “Degradación y rehabilitación de estructuras de la madera”. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina. 244p.

6 APENDICE

6.1 ANOVAS calculadas para las variables de salida

- Análisis de varianza del %PP al tiempo de ataque T_1 para ambos tipos de pudrición

	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tipo madera	4	350,3	87,57	8,59	0,000
Hongo	1	3793,2	3793,20	372,17	0,000
Tipo madera*Hongo	4	377,1	94,26	9,25	0,000
Error	40	407,7	10,19		
Total	49	4928,2			

- Análisis de varianza del %PP para ambos tiempos de ataque de pudricion café

	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tipo madera	4	1541,1	385,3	3,60	0,013
Tiempo ataque	1	630,1	630,1	5,89	0,020
Tipo madera*Tiempo ataque	4	758,3	189,6	1,77	0,154
Error	40	4280,5	107,0		
Total	49	7209,9			

- Análisis de varianza del %S al tiempo de ataque T_1 para ambos tipos de pudrición

	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tipo madera	4	86,623	21,6557	32,91	0,000
Hongo	1	72,962	72,9620	110,88	0,000
Tipo madera*Hongo	4	113,113	28,2783	42,98	0,000
Error	10	6,580	0,6580		
Total	19	279,278			

- Análisis de varianza del %S para ambos tiempos de ataque de pudricion café

	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tipo madera	4	236,173	59,043	84,35	0,000
Tiempo ataque	1	106,722	106,722	152,46	0,000
Tipo madera*Tiempo ataque	4	390,703	97,676	139,54	0,000
Error	10	7,000	0,700		
Total	19	740,598			

- Análisis de varianza del %L al tiempo de ataque T₁ para ambos tipos de pudrición

	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tipo madera	4	6851,3	1712,8	10,39	0,001
Hongo	1	822,9	822,9	4,99	0,050
Tipo madera*Hongo	4	1042,5	260,6	1,58	0,253
Error	10	1649,0	164,9		
Total	19	10365,7			

- Análisis de varianza del %L para ambos tiempos de ataque de pudricion café

	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tipo madera	4	1891,8	472,95	18,68	0,000
Tiempo ataque	1	1737,2	1737,25	68,62	0,000
Tipo madera*Tiempo ataque	4	1999,8	499,95	19,75	0,000
Error	10	253,2	25,32		
Total	19	5882,0			

6.2 Test HSD de Tukey aplicado a las variables de salida

- Comparaciones múltiples para %PP (T₁)

Tipo madera*Hongo	N	Media	Agrupación
DSV PB	5	25,852	A
ASV PB	5	25,510	A
DCV PB	5	22,532	A
ACV PB	5	19,934	A
RA PB	5	12,020	B
ACV PC	5	7,246	B C
ASV PC	5	4,110	C
RA PC	5	2,840	C
DSV PC	5	2,476	C
DCV PC	5	2,076	C

- Comparaciones múltiples para %PP (pudricion café)

Tipo madera*Tiempo ataque	N	Media	Agrupación
ACV 2	5	23,572	A
ASV 2	5	21,040	A
ACV 1	5	7,246	A
RA 2	5	4,156	A
ASV 1	5	4,110	A
DSV 2	5	3,074	A
RA 1	5	2,840	A
DSV 1	5	2,476	A
DCV 2	5	2,406	A
DCV 1	5	2,076	A

- Comparaciones múltiples para %S (T₁)

Tipo madera*Hongo	N	Media	Agrupación
DSV PB	2	28,30	A
DCV PB	2	24,75	B
ACV PC	2	23,30	B C
ASV PB	2	22,10	B C
RA PB	2	21,25	C D
DSV PC	2	20,70	C D
DCV PC	2	18,75	D
ACV PB	2	18,20	D
RA PC	2	18,20	D
ASV PC	2	14,55	E

- Comparaciones múltiples para %S (pudrición café)

Tipo madera*Tiempo ataque	N	Media	Agrupación
ASV 2	2	33,25	A
ACV 2	2	27,70	B
RA 2	2	27,45	B
ACV 1	2	23,30	C
DSV 1	2	20,70	C D
DCV 1	2	18,75	D E
RA 1	2	18,20	D E
DSV 2	2	16,20	E F
ASV 1	2	14,55	F
DCV 2	2	14,00	F

- Comparaciones múltiples para %L (T₁)

Tipo madera*Hongo	N	Media	Agrupación
ASV PC	2	79,610	A
ASV PB	2	74,020	A B
RA PB	2	69,150	A B C
DSV PC	2	66,990	A B C
RA PC	2	65,865	A B C
DCV PC	2	62,055	A B C
DSV PB	2	45,215	A B C
ACV PC	2	25,725	B C
DCV PB	2	25,490	B C
ACV PB	2	22,225	C

- Comparaciones múltiples para %L (pudrición café)

Tipo madera*Tiempo ataque	N	Media	Agrupación
DSV 2	2	89,555	A
ACV 2	2	81,785	A B
ASV 2	2	81,680	A B
ASV 1	2	79,610	A B
RA 2	2	73,270	A B
DCV 2	2	67,155	B
DSV 1	2	66,990	B
RA 1	2	65,865	B
DCV 1	2	62,055	B
ACV 1	2	25,725	C