

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE LA MADERA

**CAMBIO DE COLOR EN MADERA DE RENOVALES DE
RAULI (*Nothofagus alpina* (POEPP. ET ENDL.)
KRASSER) Y ROBLE (*Nothofagus obliqua* (MIRB.)
OERST) MEDIANTE PROCESOS DE VAPORIZADO**

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero de la Madera

CAROLINA ANDREA ESPINOSA BARRUETO

Profesor Guía: Ing. de Ejecución Mecánico USACH
MS. en Ciencias y Tecnología de la Madera
Universidad de California, Berkeley
Sr. Misael Gutiérrez Dauré

SANTIAGO - CHILE
2004

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE LA MADERA**

CAMBIO DE COLOR EN MADERA DE RENOVALES DE RAULI(*Nothofagus alpina* (POEPP. ET ENDL.) KRASSER) Y ROBLE (*Nothofagus obliqua* (MIRB.) OERST) MEDIANTE PROCESOS DE VAPORIZADO

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero de la Madera

Carolina Andrea Espinosa Barrueto

Calificaciones:	Nota	Firma
Prof. Guía Sr. Misael Gutiérrez Dauré	7,0	.....
Prof. Consejero Sr. René Carmona C.	6,0	.....
Prof. Consejera Sra. Rose Marie Garay M.	6,5	.....

SANTIAGO-CHILE

2004

**A mis papás ...
Ricardo y Cecilia**

AGRADECIMIENTOS

A mi profesor guía Sr. Misael Gutiérrez Dauré por la confianza depositada en mí y en el desarrollo de esta memoria, por sus consejos y constante apoyo.

A la profesora consejera Sra. Rose Marie Garay M. por su preocupación, apoyo y consejos.

Al profesor consejero Sr. René Carmona Cerda por toda la ayuda entregada.

Al profesor Ricardo Silva por su disposición, gran ayuda y apoyo, oportunos consejos y dedicación.

Al Laboratorio de Biodeterioro y preservación del Departamento de Ingeniería de la Madera de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile, especialmente al profesor Juan Donoso y Luis Frías por la desinteresada ayuda brindada.

A Luis Frías por su franca amistad, sabios consejos y la gran ayuda prestada en el desarrollo de esta memoria.

A todos los funcionarios del Centro Tecnológico de la Madera por su excelente disposición, gran ayuda y

A mi familia, papás, hermanos, abuelos, tíos y primos, muchas gracias por el cariño, el apoyo, los valores entregados y todos los grandes momentos que me han entregado siempre ...

A mis amigos, gracias por acompañarme y compartir conmigo todos estos años.

A todas las personas que me han acompañado durante el largo desarrollo de esta memoria.

RESUMEN

Esta memoria se desarrolló en el marco del Proyecto FONTEC “Desarrollo de nuevo proceso y producto de aserrado de madera de renoval nativo de raulí y roble”, y tuvo por objetivo estudiar el efecto de tratamientos de vaporizado sobre el cambio de color de la madera de renoval de raulí y roble, para incrementar su valor agregado.

Los ensayos de vaporizado se realizaron sobre 224 tablas que provenían del Aserradero Río Negro (IX Región), perteneciente a la empresa MASEFCO Ltda. A 80 tablas se les aplicó vapor a presión atmosférica y las 144 tablas restantes se sometieron a vapor con presiones sobre la atmosférica. Estas últimas se dividieron en tres grupos de igual número de tablas (48) para ser sometidas a tres niveles de presión: 0,5; 1 y 1,5 [kg/cm²]. Esto se llevó a cabo para cada una de las especies estudiadas.

Para analizar la evolución del color en el transcurso de los tratamientos de vaporizado se realizaron cortes en las tablas, obteniéndose probetas de color, cada ciertos intervalos de tiempo. Paralelamente y con igual periodicidad se obtuvieron probetas para el control del contenido de humedad.

Con los valores de color obtenidos se confeccionaron tablas de contingencia de doble entrada. Una de las tablas consta de las clasificaciones color y presión, con el objetivo de analizar si existe independencia estadística entre los colores obtenidos durante cada tratamiento y la presión aplicada a cada uno de éstos. Además, para cada tratamiento se realizó una tabla de contingencia con las clasificaciones color y tiempo, con el fin de analizar si existe independencia estadística entre los colores obtenidos y el tiempo de vaporizado. Estas tablas se realizaron para las dos especies, raulí y roble.

En ambas especies estudiadas y una vez finalizados los tratamientos de vaporizado se determinaron los defectos producidos en las piezas de manera cuantitativa. Con estos datos se realizó, para cada defecto, un análisis de varianza unifactorial, aleatorio y con cuatro repeticiones.

Los resultados obtenidos respecto al grado de cambio de color para las dos especies demuestran que éste se encuentra sujeto a la presión aplicada y al tiempo de exposición. La velocidad de decoloración se incrementa al aumentar la presión y el comportamiento de la velocidad del cambio de color es brusco entre el tratamiento sin presión (Pa) y los tratamientos con presiones sobre la atmosférica. El oscurecimiento de la madera de renoval de raulí y roble en su espesor, ancho y largo es homogéneo a cualquier presión de trabajo y a cualquier tiempo de exposición.

En relación al contenido de humedad de las maderas vaporizadas, éste disminuye paulatinamente en el tiempo alcanzando contenidos finales cercanos al 45 % en ambas especies estudiadas. Respecto a los defectos, se determinó que son producto de las características de la madera y del vaporizado en su conjunto, y su aparición no depende del nivel de presión aplicado.

SUMMARY

This report was developed in the frame of the FONTEC Project “Development of a new process and sawed wood product from second growth of Raulí and Roble”. The main objective of this research was to study the effect of steaming treatments on the change of color in wood from second growth Raulí and Roble, to increase his added value.

The steaming tests were applied on 224 boards from the Sawmill “Río Negro” (IX Region), belonged to the MASEFCO Company. Eighty boards were treated with steam at atmospheric pressure, and the 144 remaining boards were treated with pressurized steam. Pressurized boards were divided in three groups of equal number of boards (48) under a determined level of pressure. These levels of pressure were of 0.5; 1.0, and 1.5 [kg/cm²]. This procedure was carried out for each one of the species.

In order to analyze the evolution of the color in the span of steaming treatments, cuts were made on boards to obtain samples of color at certain time intervals.

Contingency tables were constructed to study the relationship between colors obtained and pressure levels. In addition, for each treatment, a contingency table was constructed to study the relationship between the obtained color and the steaming time. These tables were made for the two species, Raulí and Roble.

For both species, defects on boards were determined once steaming processes finalized. Defects were measured in a quantitative form. With these data a randomly analysis of variance was made for each defect with four repetitions.

Results obtained with respect to the degree of change in color, show that it depends on applied pressure and exposure time. Discoloration rate increases with pressure, and the behavior of the rate of the change in color is abrupt between the treatment without pressure and the pressurized treatments.

Moisture contents on steamed boards diminish in a steadily pattern with time until reach moisture contents of 45% for both species. Defects were caused by inherent boards characteristic and steaming process, and they presence is independent of pressure level utilized.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la industria maderera en Chile se ha fijado nuevas directrices, que implican un mayor valor agregado en sus productos y por lo tanto, la necesidad de invertir en nuevas tecnologías, con el fin de adaptarse a las nuevas exigencias del mercado. Con este objetivo se busca un uso alternativo para el recurso forestal nativo, específicamente de renovales, el que se utiliza generalmente para productos de menor valor agregado como astillas para celulosa y madera rolliza, sin ningún procesamiento industrial.

Dentro de los renovales se pueden destacar dos especies, raulí y roble, las que tienen un papel destacado como maderas adultas por sus características estéticas y mecánicas, entre otras. La limitante de estas maderas como renoval es su color, el cual es débilmente coloreado, por lo que no existe un 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 bajo costo como materia prima.

Este estudio pretende alterar las características estéticas de la madera de renovales a través de diferentes procesos de vaporizado, con el objetivo de otorgarles una apariencia tal que permita su venta como sustituto de productos fabricados en la actualidad a partir de costosas maderas nativas europeas y africanas provenientes de árboles adultos. En experiencias preliminares efectuadas en el Departamento de Ingeniería en Madera, de la U. de Chile, se determinó que es factible el cambio de color de estas especies, sometiéndolas a tratamientos con vapor y temperatura, estudio que se enmarca dentro de un proyecto FONTEC sobre el cambio de color aplicando vapor, de la empresa MASEFCO Ltda. dedicada a la exportación de pisos y parquet.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Estudiar el efecto de tratamientos de vaporizado sobre el cambio de color de la madera de renoval de raulí y roble, con el objetivo de incrementar su valor agregado.

2.2 Objetivos específicos

1. Determinar los tiempos de tratamiento a los que se obtienen intensidades de color predefinidas, para distintas presiones de trabajo.
2. Determinar la variación en el contenido de humedad de la madera durante el tratamiento de vaporizado y evaluar las deformaciones físicas por efecto del vaporizado.
3. Verificar visualmente si los cambios de color producidos son homogéneos dentro de una misma pieza, tanto en el espesor como en su superficie.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 Antecedentes generales

En sentido estricto, renoval es todo bosque joven de segundo crecimiento, generalmente constituido por las especies más agresivas, de más rápido crecimiento y de mayor habilidad competitiva, entre las que constituyen la flora del área (Donoso, 1981). Las edades fluctúan entre los 20 y los 60 años (Grosse,1989). 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 fisionomía y apariencia de coetaneidad (Donoso, 1988).

Según las estadísticas del INFOR (en línea), un 20,7% de los 75.662.561 de hectáreas del territorio nacional, están cubiertas por bosques. Esta superficie está compuesta mayoritariamente por bosque nativo, 13.430.603 ha (85,9%), de las cuales 3.582.408 ha corresponden a renovales (26,6 %) (Bases conceptuales para el manejo sustentable de bosque nativo, 1998 y INFOR, 2003).

El área de distribución de los renovales de roble y raulí se divide en dos grandes zonas, la zona norte que va desde su límite septentrional hasta la ribera norte del río Ñuble por la Cordillera de Los Andes y el río Itata en la Cordillera de la Costa, área donde los renovales presentes se encuentran dentro del tipo forestal Roble – Hualo y la zona sur a partir de la ribera sur de los ríos mencionados y el límite austral de distribución de las dos especies (X región), donde los renovales se encuentran dentro del tipo forestal Roble – Raulí – Coigüe y del subtipo Renovales y Bosques puros de Roble y Raulí (Uribe, 1996).

Entre los tipos forestales existentes, el tipo Roble – Hualo ocupa 184.783 ha (1,4 %) (Bases conceptuales para el manejo sustentable de bosque nativo, 1998) y el tipo Roble – Raulí – Coigüe 1.460.531 ha (10,9 %) (INFOR, 2003) del territorio nacional (Bases conceptuales para el manejo sustentable de bosque nativo, 1998). Los bosques que constituyen este último tipo, son por definición renovales (Camelio *et al*,1998).

3.2 Caracterización general de las especies

3.2.1 Características generales

Nothofagus alpina (Poepp. et Endl) Krasser y *Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst son árboles monoicos (Donoso, 1972; Donoso y Landrum, 1973; Pérez, 1983; Rodríguez *et al.*, 1983). Presentan hojas caducas, simples (Pérez, 1983; Rodríguez *et al.*, 1983) de margen ondulado, suavemente aserrado en el caso del raulí (Pérez, 1983) y en el roble, doblemente aserrado (Pérez, 1983; Rodríguez *et al.*, 1983). El tronco es recto cilíndrico y libre de ramas hasta una buena altura (Donoso, 1972; Hoffmann, 1982; Pérez, 1983; Rodríguez *et al.*, 1983). Son árboles que alcanzan hasta 40 m de altura y cerca de dos metros de diámetro (Pérez, 1983). El raulí crece en suelos cordilleranos profundos y de buena calidad, pero también en suelos delgados y rocosos (Pérez, 1983) y el roble, crece en suelos fértiles, con cierta humedad y profundidad (Pérez, 1983; Camelio *et al.*, 1998).

Estas dos especies presentan anillos de crecimiento bien diferenciados. Madera de porosidad difusa. Poros muy pequeños múltiples en cadenas radiales de 2 a 6 combinados con poros solitarios moderadamente abundantes (Torres, 1971; Díaz – Vaz, 1987; Ortiz, 1999), en el caso del roble presenta engrosamiento espiralado (Brazier y Franklin, 1961). Los vasos del raulí son pequeños, en su mayoría múltiple, las placas son de perforación inclinada simple; en cambio, los vasos del roble tienen placas de perforación inclinada simple y tilosis en el duramen (Torres, 1971; Díaz – Vaz, 1987; Ortiz, 1999).

La madera adulta de raulí es de color café – rosado pálido brillante, con albura diferenciada blanca rosácea. Anillos de crecimiento visibles. La textura es homogénea y fina, de un veteado muy suave. Madera semi – pesada y durable (Torres, 1971; Díaz – Vaz, 1987) y su madera de renoval es de color blanco con leves tintes de color rosado, mucho más clara que la madera de raulí maduro (Carabias y Karsulovic, 1978). En cambio, la madera de roble adulto presenta un color café rojizo opaco, que se diferencia de la albura blanquecina amarillenta. Anillos de crecimiento poco visibles. Madera pesada y dura de gran durabilidad (Torres, 1971; Pérez, 1983).

La madera de renoval de roble se caracteriza por su color blanquecino rosáceo y anillos de crecimiento más anchos que su madera madura. ^(*)

3.2.2 Composición química

En un estudio realizado por Mansilla *et al.* (1991), se afirma que las especies nativas no han sido intensivamente estudiadas en su composición química y concluye que el contenido de lignina es bajo en maderas duras y la cantidad de extraíbles es significativamente baja.

En el cuadro 1 se entregan valores de la composición química de la madera de raulí, maduro y renoval, y roble maduro.

Cuadro 1. Composición química de la madera de roble maduro y raulí maduro y de renoval.

Especies		Celulosa [%]	Holocelulosa [%]	Lignina [%]	Extraíbles [%]	Ceniza [%]
Raulí	Albura ¹	52,3	84,0	16,3	7,3	0,34
	Duramen ¹	41,9	81,9	17,4	5,5	0,31
Raulí	Renoval	---	71,2	25,0	---	0,35
Roble	Maduro	38,5	81,1	19,4	6,1	0,62

Fuente: Campos *et al* (1990); Mansilla *et al.* (1991); Baeza (1999).

3.2.3 Propiedades físicas

La densidad de la madera de renoval es menor, dada su falta de formación del duramen o en vía de formación, no distinguiéndose de la formación de la albura (Carabias y Karsulovic, 1978).

En el cuadro 2 se entrega un resumen de las densidades determinadas para raulí y roble maduro y de renoval.

^(*) Comunicación personal. Ref. Sr. Iván Ulloa (2004).

¹ Determinaciones de la composición química de raulí en el Laboratorio de Química de la Madera, Dpto. de Ing. de la Madera, Facultad de Ciencias Forestales, U. de Chile.

Cuadro 2. Resumen de las densidades [gr/cm³] del raulí y roble maduro y de renoval.

Especies		Densidad básica	Densidad Anhidra	Densidad al 12 % de CH
Raulí	Maduro	0,53	0,51	---
	Renoval	0,46	0,51	0,48
Roble	Maduro	0,49	0,61	---
	Renoval	0,50	---	---

Fuente: Carabias y Karsulovic (1978); Pérez (1983); Forestal Mininco (1994); Ortiz (1999).

3.2.4 Propiedades mecánicas

Según un estudio realizado por Forestal Mininco (1994) sobre el aprovechamiento industrial de la madera proveniente del manejo de renovales de raulí y roble, determinó que los valores calculados para las propiedades mecánicas de la madera de renoval de raulí y roble se encuentran dentro de los rangos aceptables para su uso.

En el caso del raulí existe un estudio realizado por Carabias y Karsulovic (1978), con relación a las propiedades mecánicas relevantes entre raulí de renovales y duraminizado, el cual entregó diferencias no significativas, como se indica en el cuadro 3.

Cuadro 3. Resumen de propiedades mecánicas entre raulí de renovales, raulí y roble maduro.

Solicitud	Unidad	Renoval Raulí	Raulí Maduro	Roble Maduro
Flexión estática	[Kg/cm²]	411	414	359
Compresión paralela	[Kg/cm²]	249	262	263
Cizalle Radial	[Kg/cm²]	44,3	39,4	67
Tangencial		47,7	48,9	89
Clivaje Radial	[Kg/cm]	16,4	16,9	---
Tangencial		19,3	20,7	65
Dureza Normal	[Kg]	327	319	428
Paralela		---	---	410

Fuente: Carabias y Karsulovic (1978); Pérez (1983).

3.2.5 Usos de las maderas

El uso principal de la madera de raulí maduro es como madera aserrada en construcción de viviendas. Debido a su estabilidad dimensional, la madera de raulí es usada en puertas, ventanas, mueblería, pisos, persianas, escaleras, cielos y tejuelas. Las trozas de gran diámetro y con un veteado homogéneo y buenas condiciones estéticas, se pueden utilizar en la fabricación de chapas decorativas, las que son muy apreciadas en mueblería, revestimientos interiores y exteriores (Torres, 1971; Camelio *et al*, 1998; Ortiz, 1999).

La madera de roble maduro, debido a sus excelentes propiedades mecánicas y durabilidad, se utiliza para fines estructurales en forma de vigas, postes, durmientes, rodrigones, etc., ya sea para viviendas, puentes, muelles, embarcaciones u otros. Se utiliza además para techumbres, tejuelas, marcos, puertas, ventanas y revestimientos exteriores de viviendas (Camelio *et al*, 1998; Ortiz, 1999).

Los renovales de estas especies tienen como destino preponderante la fabricación de astillas o simplemente es exportada como madera rolliza, sin ningún procesamiento industrial previo (Forestal Mininco, 1994).

3.3 Extraíbles

Este sub- capítulo aporta al conocimiento desde el punto de vista químico de la madera, debido a que los extraíbles de ésta son en parte responsable de la coloración de la madera; aunque este estudio no tiene como objetivo hacer una caracterización química de las especies en estudio.

Los extraíbles o compuestos accesorios son sustancias que se encuentran en las paredes celulares, espacios intercelulares y lúmenes de las células, los cuales son en su mayoría compuestos solubles (Poblete y Zárate, 1986), éstos no son considerados como integrantes de la parte estructural de la pared celular y la lamela media (Klock, 2004). Los extraíbles afectan el comportamiento físico – químico de la madera y en algunos casos influyen sobre las posibilidades de trabajar y utilizar esta materia prima (Poblete y Zárate, 1986), también son responsables de determinadas características, como son color, olor,

resistencia natural a la pudrición, gusto, inflamabilidad y características abrasivas (Klock, 2004).

La composición y cantidad relativa dependen de factores diversos, como especie, edad y región de origen (Klock, 2004). La biosíntesis de extraíbles es controlada genéticamente y cada especie de madera tiende a producir sustancias específicas (Sjöström, 1981).

Estos compuestos orgánicos se pueden remover mediante solventes neutros (éter, hexano) o mediante vapor (Alessandrini y Vargas, 2002).

En el caso de maderas chilenas estos compuestos accesorios se encuentran en cantidades que oscilan entre 3 a 10 % (Mancilla *et al*, 1991).

3.3.1 Clasificación de los extraíbles

El contenido de extraíbles y su composición varía entre las especies de madera y dentro de las diferentes partes del árbol (Sjöström, 1981). Los extraíbles de la madera pueden dividirse en tres grupos: terpenos y terpenoides, compuestos alifáticos (principalmente grasas y ceras) y compuestos fenólicos (Klock, 2004 y Sjöström, 1981). La resina parenquimática es rica en componentes alifáticos, la oleoresina está principalmente compuesta de terpenoides y característico del duramen es la acumulación de compuestos fenólicos (Sjöström, 1981).

- Terpenos y terpenoides: Son compuestos volátiles o aceites esenciales de naturaleza de terpenos y son llamados terpenoides (Sjöström, 1981). Éstos entregan características de olor y sabor (Klock, 2004). Los terpenos son productos de la condensación de dos o más moléculas de isopreno, resultando en dímeros y otros oligómeros con fórmula elemental $(C_{10}H_{16})_n$ (Klock, 2004 y Sjöström, 1981). Los terpenoides (figura 1) incluyen los poliprenoles, que contienen grupos característicos de varios tipos, tales como hidroxil, carbonil, carboxil y ésteres funcionales (Sjöström, 1981).
- Compuestos alifáticos: Son grasas, ceras y ácidos grasos (Klock, 2004 y Sjöström, 1981). La cantidad de alcanos y alcoholes son relativamente pequeños. Aracínol, behenol y lignocerol representan los principales componentes alcohólicos (Sjöström,

1981). Los componentes de este tipo se caracterizan por ser lipofílicos y estables (Klock, 2004).

Los ácidos grasos se presentan como ésteres y son el principal componente de la resina del parénquima en maderas de coníferas y latifoliadas. En las grasas, el principal éster se presenta, generalmente, como triglicérido. Los ésteres de otros alcoholes, usualmente son alcoholes alifáticos o de naturaleza terpenoide, éstos son conocidos como ceras (Sjöström, 1981).

Los ácidos grasos pueden ser saturados o insaturados. Éstos últimos, especialmente los poliinsaturados y tipos conjugados son totalmente inestables y participan en reacciones de adición o son fácilmente oxidados (Sjöström, 1981).

En el cuadro 4 se presentan ejemplos de la estructura química de algunos compuestos alifáticos.

Cuadro 4. Ejemplos de compuestos alifáticos.

Grupo	Estructura
n – alcanos	$\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_n - \text{CH}_3$ n = 8 - 30
Alcoholes grasos	$\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_n - \text{CH}_2\text{OH}$ n = 16 - 22
Ácidos grasos	$\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_n - \text{COOH}$ n = 10 - 24
Grasas (ésteres de glicerol)	$\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{OR} \\ | \\ \text{CH} - \text{OR}' \\ | \\ \text{CH}_2 - \text{OR}'' \end{array}$ R, R' y R'' pueden ser residuos de ácidos grasos o hidrógenos
Ceras (ésteres de otros alcoholes)	$\text{RO} - (\text{CH}_2)_n - \text{CH}_3$ R es residuo de un ácido graso $\text{RO} - \text{Esterol}$
Suberina (poliesteloides)	$[- \text{O} - (\text{CH}_2)_n - \text{CO} -]$ n = 18 - 28 $[- \text{O} - (\text{CH}_2)_n - \text{CO} - (\text{CH}_2)_n - \text{CO} -]$

Fuente: Sjöström (1981).

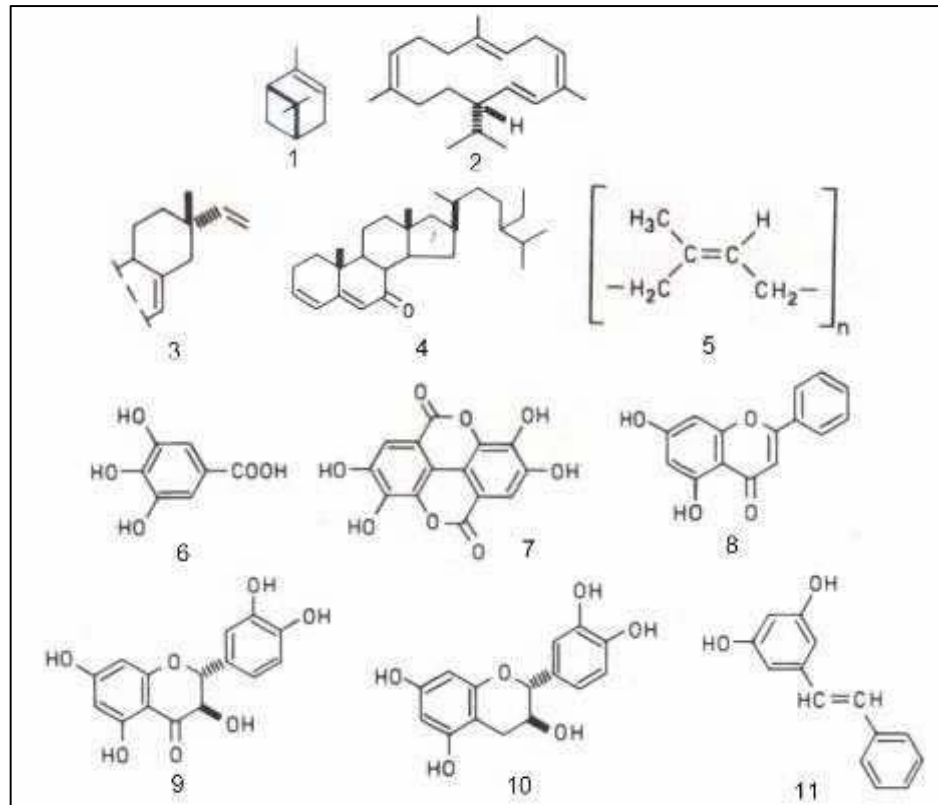
- Compuestos fenólicos: Este grupo de extraíbles es una clase de compuestos heterogéneos (Sjöström, 1981), algunos son residuos y subproductos de la biosíntesis de la lignina (Klock, 2004).

Se encuentran en pequeñas cantidades en el xilema y como resultado de los cambios

secundarios, el duramen contiene una gran variedad de estas sustancias fenólicas. A la madera le proporcionan propiedades fungicidas (Klock, 2004 y Sjöström, 1981), además de contribuir al color natural de la madera (Sjöström, 1981).

Estos extraíbles (figura 1) se pueden dividir en los siguientes grupos: (1) Taninos hidrolizables, son un grupo de sustancias, sobre las cuales la hidrólisis produce ácidos gálico y elágico y azúcares, usualmente la glucosa, como producto principal. No son muy comunes en las maderas. (2) Flavonoides son polifenoles, los cuales tienen un esqueleto carbono $C_6C_3C_6$. Sus polímeros son denominados taninos condensados. Típicos representantes del monómero de los flavonoides son la crisina, taxifolina y catequina. (3) Lignan son formados por el “enganche” oxidativo de dos unidades de fenilpropano (C_6C_3), por ejemplo el conidrin, pinoresinol, siringaresinol. (4) Estilbenos (1,2 – difeniletieno) derivados poseen un sistema de doble enlace conjugado, por lo tanto son compuestos extremadamente reactivos. La pinosilvina es un importante representante de este grupo. (5) Tropolonas, se caracterizan por ser compuestos anulares o cíclicos insaturados de siete átomos de carbono (Sjöström, 1981).

Figura 1. Ejemplos de la estructura química de algunos compuestos pertenecientes a los grupos de terpenos y fenoles.



Terpenos: (1) α – pineno (2) turbengene (3) ácido pimárico (4) tremulona (5) caucho. Fenoles: (6) ácido gálico (7) ácido elágico (8) crisin (9) taxifolin (10) catequina (11) pinosilvina.

Fuente: Sjöström (1981).

3.3.2 Extraíbles en el duramen

Desde un punto de vista químico, el duramen contiene sustancias solubles en agua, entre ellas hidratos de carbono, polisacáridos, alcaloides y taninos que al oxidarse le dan su característico color oscuro; además de sustancias minerales, como carbonatos oxalato de calcio y ácido sílico (Kollmann, 1959). De acuerdo a Diaz - Vaz (2003), las modificaciones químicas de los compuestos accesorios asociadas al proceso de duraminización, producen cambio de color en la madera. Algunas de estas sustancias, de naturaleza fenólica, son las que resultan ser tóxicas para los organismos biodegradadores, aumentando la durabilidad natural de la madera.

La riqueza del duramen en cenizas y nitratos es, en general, bastante inferior a la de la albura. En las coníferas, el duramen coloreado contiene mucha más resina y aceites que

la albura, impidiendo la hinchazón. En las latifoliadas, los fenómenos químicos que acompañan a la formación del duramen son parecidos a los de las coníferas, aunque más complejos (Kollmann, 1959).

Se presume que el oscurecimiento de los tejidos ocurre durante la transformación de albura a duramen debido a la degradación (hidrólisis, oxidación y polimerización) de los fenoles coloreados en pigmentos del duramen (Burtin *et al.*, 1998).

El almacenamiento de sustancias en el duramen no sólo disminuye el punto de saturación de las fibras, y con ello la contracción volumétrica, sino que también eleva la duración de las maderas al favorecer la resistencia natural ante el ataque de hongos lignívoros (Kollmann, 1959).

3.3.3 Extraíbles del raulí y roble

En el caso de los *Nothofagus* no se conocen muchos estudios relacionados con la composición química de la corteza y la madera, pero se ha encontrado que este género presentaría distintos flavonoides aún no caracterizados (Arriagada *et al.*, 2000). Por otra parte se ha detectado en maderas de *Fagus sylvatica*, la presencia de las siguientes sustancias: catequina, escualeno, cicloartenil acetato, amirin acetato, acetil metil betulinato, sitosterol, estigmasterol, dihidro – sitosterol. Siendo los *Nothofagus* y *Fagus* géneros de la misma familia, se esperaría encontrar compuestos similares en los *Nothofagus* (Arriagada *et al.*, 2000).

En el cuadro 5 se muestra el porcentaje total de extraíbles y el porcentaje de taninos que poseen éstos, para las especies raulí y roble.

Cuadro 5. Porcentaje total de extraíbles, porcentaje de taninos y la naturaleza de éste.

Especies		Total Extraíbles [%]	Insoluble [%]	No tanino [%]	Tanino [%]	Naturaleza del tanino
Raulí	Madera	4,3	0,1	2,2	2,0	Catequínico
	Corteza	8,6	0,2	3,1	5,3	Catequínico
Roble	Madera	1,9	0,1	1,2	0,6	Catequínico
	Corteza	5,3	0,6	1,9	2,8	Catequínico

Fuente: Poblete y Zárate (1986).

3.4 Cambio de color o decoloración

Se denomina decoloración al cambio de color que experimenta la madera respecto a su color natural, este fenómeno puede ocurrir por diversas causas.

La decoloración puede ser clasificada en dos tipos (Gorisek *et al*, 2003):

- Biótica: causada por hongos o bacterias.
- Abiótica: de origen químico. También denominada química u oxidativa.

Los mecanismos implicados en la decoloración abiótica no están del todo claros y la literatura al respecto es limitada (Kreber y Byrne, 1994). Ésta involucra la formación de polímeros coloreados en la estructura química de la madera. Los constituyentes químicos de las distintas especies y el rol de los factores externos como la temperatura y la humedad están siendo estudiados para determinar las causas de este tipo de decoloración (Kreber y Byrne, 1994).

3.4.1 Antecedentes generales de la decoloración de la madera en procesos de vaporizado

Los cambios de color comienzan en el proceso de vaporizado después que la temperatura en la madera se aproxima a la del vapor (Hildebrand, 1970). El cambio de color depende de:

- 1) Tiempo de vaporizado (Brauner y Conway, 1964; Davis y Thompson, 1964; Hildebrand,

1970; Chen y Workman, 1980; M^c Ginnes y Rosen, 1984; Bekhta y Niemz, 2003 y Sehlsted, 2003).

2) Condiciones de operación del vapor:

- Temperatura del vapor (Brauner y Conway, 1964; Davis y Thompson, 1964; Hildebrand, 1970; Chen y Workman, 1980; M^c Ginnes y Rosen, 1984; Bekhta y Niemz, 2003; Gorisek *et al*, 2003 y Sehlsted, 2003).
- Condición del vapor (Hildebrand, 1970).

3) Tipo de extraíbles de la madera (Brauner y Conway, 1964; Chow y Troughton, 1973; Gorisek *et al*, 2003; Sehlsted, 2003).

4) El pH de la madera (Chen y Workman, 1980 y Sehlsted, 2003).

5) El contenido de humedad (CH) inicial de la madera al momento del vaporizado (Brauner y Conway, 1964; Chen y Workman, 1980; Gorisek *et al*, 2003 y Sehlsted, 2003).

Respecto a la coloración de la madera por medio de vaporizado, diversos autores concuerdan en que los mayores tiempos de vaporizado a los que la madera se expone y el aumento de la temperatura son factores claves para que ocurra este fenómeno (Brauner y Conway, 1964; Davis y Thompson, 1964; Hildebrand, 1970; Chen y Workman, 1980; M^c Ginnes y Rosen, 1984; Bekhta y Niemz, 2003 y Sehlsted, 2003). Dependiendo de las especies, bajo temperaturas cercanas a los 50° C no ocurre cambio de color (Brauner y Conway, 1964; Ananías *et al*, 2001 y Gorisek *et al*, 2003).

M^c Ginnes 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) donde 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 efectivas en el cambio de color de la madera.

Hildebrand (1970), afirma que el vaporizado debería realizarse a un alto CH para obtener un color uniforme (comparado con material pre - secado); es decir, la madera recién cortada debe ser vaporizada sin ser sujeta a ningún secado al aire previo.

3.4.2 Origen de los cambios de color de tipo químico

En los procesos de decoloración química de la madera se han diferenciado dos orígenes, termoquímico y oxidativo.

- a) Origen termoquímico: Se produce una reacción termoquímica entre los azúcares y los compuestos nitrogenados de la madera (reacción de Maillard), la que se desarrolla debajo de la superficie de la madera (Haslett *et al.*, 1999; M^c Donald *et al.*, 2000) formando productos coloreados (Haslett *et al.*, 1999). El oscurecimiento proviene de la formación de un gradiente de concentración de azúcares reductores (fructosas) y compuestos nitrogenados (ácidos amínicos tal como ácido glutamínico), a ciertas condiciones de temperatura (M^c Donald *et al.*, 2000).

- b) Origen oxidativo: Aunque se acepta que la oxidación de la lignina puede alterar el color de la madera, tales reacciones se dan en condiciones muy específicas, ya sea por acción enzimática o por reacción con ácidos o álcalis concentrados (Silva, 2002), situación ajena a las asociadas al tratamiento de la madera con vapor y temperatura. Así entonces, la decoloración derivada de las condiciones anteriores tiene su origen en la transformación química de los extraíbles en presencia de oxígeno. Cada especie se comporta de manera diferente, dependiendo del tipo de extraíbles presentes en esa madera, pero en general son los taninos (condensables o hidrolizables) los involucrados en este proceso. La decoloración por transformación química en presencia de oxígeno está condicionada por el contenido de humedad inicial de la madera, la temperatura de secado y la presencia de oxígeno en la atmósfera de secado (Ananías *et al.*, 2001).

En el cuadro 6 se muestran algunas especies con su respectivo mecanismo de cambio de color en el transcurso del secado.

Cuadro 6. Mecanismo de decoloración para algunas especies estudiadas.

Especie	Mecanismo
Haya sp.	Oxidación química de catequinas (Irmouli, 1998).
Encina sp.	Hidrólisis y oxidación química de los elagitaninos (Charrier, 1992).
Acer sp.	Oxidación química de compuestos fenólicos (Miller et al. 1990).
Pino sp.	Reacción de Maillard de los azúcares reductores (M ^c Donald, 2000).

Fuente: Ananías *et al.* (2001).

3.4.3 Rol de los extraíbles

La decoloración de la madera proviene de los cambios de color de los extraíbles que constituyen la albura y el duramen (SehIsted, 2003).

Al inducir calor a la madera, los extraíbles contribuyen significativamente en la intensidad del 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 (M^c Ginnes y Rosen, 1984).

Ciertos extraíbles, especialmente polifenoles, son una fuente en la producción de color de la madera. La interacción entre los diferentes componentes químicos de ésta puede afectar el índice de la formación del color (Chow y Troughton, 1973). Los extraíbles fenólicos tipo flavonoides, como catequina y epicatequina, conocidos precursores de taninos, altamente coloreados y de fenoles poliméricos, son sugeridos, fuertemente, como productores del oscurecimiento (Kreber y Byrne, 1994).

La decoloración es uniforme y más intensa cuando la catequina es calentada en presencia de agua. La oxidación de la catequina ocurre a elevadas temperaturas, formando estructuras quinoideas simples y complejas. Se produce un aumento en la decoloración, con radicales peroxi involucrados en la oxidación de catequina en presencia de grasas no saturadas y agua (Kreber y Byrne, 1994). La migración de los extraíbles a la superficie, es debida al aumento de la temperatura al interior de la madera y ayudada por las condiciones de humedad (M^c Ginnes y Rosen, 1964).

3.4.4 Cambio de color en el transcurso del secado de *Fagus sylvatica*

Los taninos condensados son los precursores del fenómeno oxidativo observado en el transcurso del secado del haya. El monómero de catequina bajo la acción del oxígeno se transforma en quinona y polimeriza enseguida en productos coloreados. De la acción de las quinonas y aminoácidos resultaría la decoloración (Ananías *et al.*, 2001).

El cambio de color de la madera en el transcurso del secado es favorecido por la temperatura. En estudios realizados por Ananías *et al.* (2001), en relación con las temperaturas de secado se observó que:

- A los 50 ° C, no existe oscurecimiento de la madera.
- Entre los 60 y 70 ° C se produce rápidamente el enrojecimiento de la madera, inclusive sin oxígeno.

A temperaturas mayores a los 60 ° C la desoxigenación no reduce sistemáticamente la decoloración, lo que implica la participación de elementos de otra naturaleza, tales como la reacción de Maillard.

Siendo los *Nothofagus* y *Fagus* géneros de la misma familia, se esperaría encontrar un comportamiento similar en la coloración de los *Nothofagus*.

3.5 Vaporizado

En el caso de *Nothofagus*, no existen experiencias de vaporizado como técnicas de cambio de color, que puedan ser relevantes o extrapolables para los fines de este estudio.

3.5.1 Antecedentes generales

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, técnicas de doblado (usando madera sólida) y la disminución de los tiempos de secado. Entre las nuevas técnicas 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).

Algunas características de la madera vaporizada son:

- La trabajabilidad de la madera vaporizada no difiere de la madera no vaporizada después de secada y enfriada (Hildebrand, 1970).
- Si al inicio del vaporizado está en condiciones verdes disminuye su humedad (Hildebrand, 1970; Addis *et al*, 1989), por lo que el gradiente de humedad a través del espesor de la madera se reduce (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 vaporizar madera en condiciones verdes y a una temperatura no superior a los 85 ° C (Simpson, 1976).

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

- Cambios dimensionales, debidos a la variación de las condiciones ambientales (Hildebrand, 1970).
- 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).

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, 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).

Cuando las maderas son sometidas al secado a vapor con presiones sobre la atmosférica se oscurecen significativamente más, al compararlas con secado al aire o en cámara de secado (M^c Ginnes y Rosen, 1964).

3.5.2 Calor y humedad en la madera

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 un 70 %, implica que el comportamiento encontrado en la madera es de régimen transitorio, debido a la lenta sorción en la pared de la célula (Wadsö, 1994). 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 del calor y del movimiento de humedad, basadas en la ley de Fourier y ley de Fick, respectivamente, tienen igual forma matemática y tienen idénticas soluciones. El flujo del calor depende de la conductividad térmica (k) de la madera, del área de la muestra y del gradiente de temperatura (Siau, 1971 y Rodríguez, 2002). 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).

La conductividad térmica se comporta de forma distinta en sólidos, líquidos y gases. En sólidos es independiente de la presión; en líquidos k depende mínimamente de la presión; varía en forma no lineal con la temperatura pero en pequeños intervalos se admite la interpolación lineal. En gases, k se comporta de forma variable con la presión y temperatura (Rodríguez, 2002). Cuando las presiones superan a la atmosférica, el comportamiento de la conductividad térmica es diferente, es así como la conductividad térmica de los gases aumenta con la temperatura, mientras que para la mayor parte de los líquidos disminuye al aumentar esta variable (Bird *et al.*, 1975).

De acuerdo a lo anterior y relacionándolo con el estudio, los diferentes cambios que experimentan las piezas desde el punto de vista de la transferencia de calor son situaciones complejas, que se pueden sintetizar en:

1. Madera con un alto contenido de humedad (inicio del proceso de vaporizado): La transferencia de calor es a través de la sustancia leñosa y el agua (libre y ligada).
2. El contenido de humedad 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.
3. Al 30% de contenido de humedad de la madera: La transferencia de calor ocurre en la sustancia leñosa, el agua de la pared y el vapor de agua presente en los lúmenes.

El comportamiento de la conductividad térmica y el tiempo que se demora en alcanzar una determinada temperatura el centro de la madera, son factores importantes para el tiempo de vaporizado de la madera con presiones sobre la atmosférica para cambiar homogéneamente el color de ésta. En la figura 2 se muestra cuanto tiempo se demora en alcanzar el centro de la pieza una determinada temperatura para un espesor dado.

Figura 2. Temperatura en el centro de madera aserrada de 1 " de espesor después de varios periodos de calor.



Coefficiente de difusión térmica = $2,51 \times 10^{-4}$ pulg²/seg; temperatura inicial = 60 ° F (15,5 ° C); temperatura exterior = 200 ° F (93,3 ° C).
Fuente: Siau (1971)

4. MATERIAL Y MÉTODO

4.1 Material

4.1.1 Madera

- Madera verde de renovales de raulí (*Nothofagus alpina*) y roble (*Nothofagus obliqua*), aserrada en tablas, provenientes del Aserradero Río Negro, IX Región de la Araucanía, sector de Curacautín.
- Madera clear (en lo posible) destinada a la fabricación de pisos.
- Las tablas utilizadas llegaron al Centro Tecnológico de la Madera, Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile, en paquetes de 28 unidades. El total de paquetes utilizados fue de 18.

Dimensiones de las tablas o piezas (figura 3):

- Espesor tabla (e): 30 mm
- Ancho tabla (a): 90 mm
- Largo tabla (L): 530 mm

Figura 3. Dimensiones de las tablas usadas en este estudio.



En el cuadro 7 se presentan los volúmenes sometidos a los procesos de vaporizado para las dos especies estudiadas.

Cuadro 7. Volúmenes requeridos por especie para los distintos procesos de vaporizado.

Procesos de vaporizado	Vol [m ³]		N° tablas	
	Raulí	Roble	Raulí	Roble
Autoclave	0,20	0,20	144	144
Cámara de vaporizado	0,11	0,11	80	80
SUB-TOTAL	0,31	0,31	224	224
TOTAL	0,62 m³		tablas 448	

4.1.2 Equipos y accesorios

- Cámara de vaporizado experimental (figura 4).
Volumen útil: 0,246 m³
Sistema de calefacción por resistencia eléctrica.
Temperatura máxima: 100 ° C
- Autoclave BAIND y TATLOCK (figura 5).
Volumen útil: 0,0726 m³
Sistema de calefacción por resistencia eléctrica.
Temperatura máxima: 150 ° C
Presión máxima: 60 lb / in²
- Equipo medidor del color Handy – Brite modelo H3, Technidtyne Corporation (figura 5).
- Balanza digital excell modelo BH – 300
Capacidad 300 gr; 0,01 gr
- Estufa eléctrica Thelco PS modelo 18.
T° máxima = 150 ° C
- Sierra circular Guilliet BFB (figura 6).
- Lijadora de banda Invicta modelo 80 (figura 4).

Figura 4. Equipos utilizados en este estudio A. Cámara de vaporizado experimental B. Lijadora de banda Invicta modelo 80

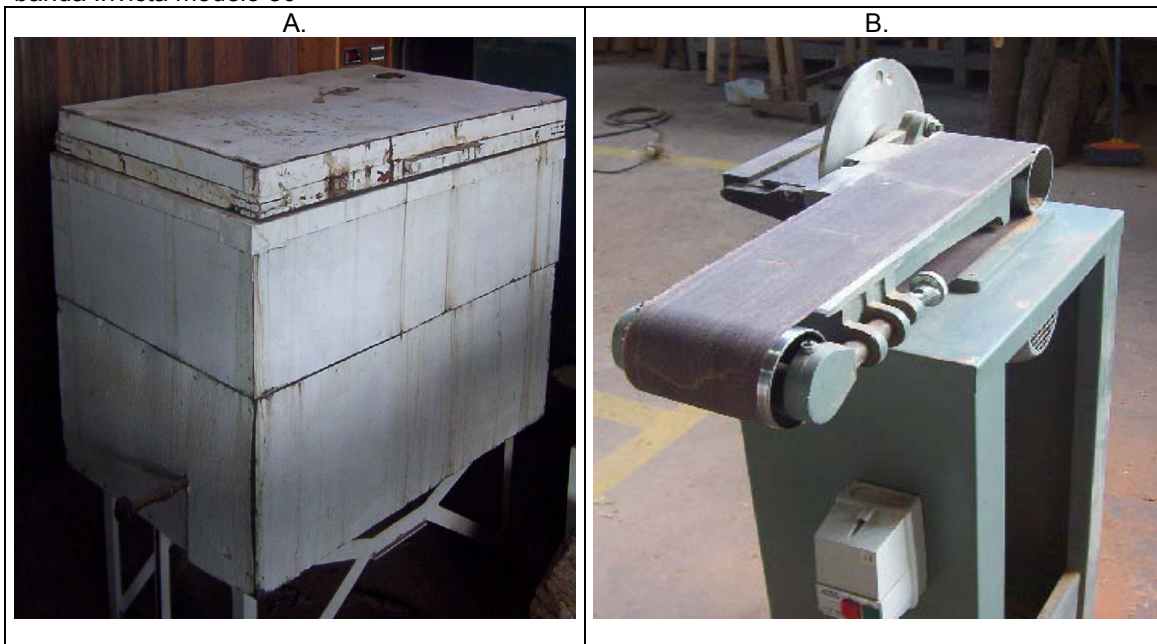


Figura 5. Equipos utilizados en este estudio A. Autoclave BAIND y TATLOCK B. Equipo medidor del color Handy – Brite modelo H3, Technidtyne Corporation



Figura 6. Sierra circular Guilliet BFB



4.2 Método

4.2.1 Selección de las muestras

Las piezas a ensayar fueron elegidas al azar, seleccionándose un número de 12 ó 20 tablas por paquete, dependiendo del proceso de vaporizado aplicado.

4.2.2 Procesos de vaporizado y cambio de color

Procesos de Vaporizado

En el desarrollo experimental de los procesos de vaporizado para modificar el color de las maderas provenientes de renovales de raulí y roble, se analizaron las siguientes condiciones de presión y temperatura asociada:

- a) Presión atmosférica (Pa) con temperaturas próximas a los 100 °C (teóricamente 100

- °C). Estas condiciones las proporcionó una cámara de vaporizado experimental.
- b) Presiones mayores a la atmosférica y temperaturas correspondientes entre los 110 y 130 °C. Para generar estas condiciones se empleó un autoclave experimental.

En el cuadro 8 se muestran las diferentes condiciones de presión, definidas para los ensayos, según tabla de Mollier.

Cuadro 8. Presiones experimentales.

Presión [kg / cm²]	Temperatura [° C]
Pa ≈ 1	100
Pa + 0,5	111
Pa + 1,0	120
Pa + 1,5	127

Nota: Temperaturas correspondientes al punto de ebullición, según tabla de vapor.

Cambio de Color

De cada pieza sometida a vaporizado, se obtuvo un total de 3 u 8 probetas (dependiendo del tratamiento) de 1 cm de longitud, diferenciándose éstas en el tiempo que se les aplicó vapor. El objetivo de esto es observar la evolución del color en el tiempo. Los intervalos de tiempo fueron predeterminados en los ensayos exploratorios según la presión del tratamiento, debido a que una mayor presión implica una mayor rapidez en el cambio de color. Adicionalmente, antes de aplicarles vapor a las piezas, se extrajo una probeta testigo y otra para determinar el contenido de humedad inicial de la pieza antes de ser sometidas a vaporizado. Las probetas, finalizado el tratamiento, fueron envueltas en papel y guardadas dentro de una bolsa oscura hasta hacer las mediciones de color, con el fin de que éste no sea modificado por el efecto de la luz.

Paralelamente, y con igual periodicidad, se extrajeron probetas de 1 cm de longitud para determinar el contenido de humedad y tener así un registro continuo de la evolución de éste parámetro durante el tratamiento, información relevante por su incidencia en los tiempos de secado (figura 7).

Figura 7. Ejemplo de la obtención de las probetas para color y contenido de humedad al inicio y durante los tratamientos.



La intensidad de color, que varía entre café claro a café - rojizo oscuro, fue calificada con un índice, definido como un número entero entre 1 y 4. La tabla de intensidades de color se construyó con los cambios de color observados en las pruebas preliminares, estos colores fueron asociados a un rango de color. Cada rango de color se cuantificó con el equipo medidor de color Handy - Brite. Luego, a cada probeta se le midió el color con este equipo y con este valor dado se asignó el índice correspondiente a la tabla de intensidades de color (cuadro 9). Esta calificación se usó siempre que el cambio de color fue homogéneo en todo el espesor de la probeta. Los rangos de intensidades de color se aprobaron por la empresa MASEFCO Ltda. de acuerdo a las intensidades de color exigidas por el mercado externo. De acuerdo a esta empresa, los colores más solicitados en el mercado externo son los clasificados con los índices 2 y 3, que corresponden a las intensidades de color moderado y exigente, respectivamente. La tabla de intensidades de color fue la misma para las dos especies en estudio.

El valor que entrega el equipo de color Handy – Brite es el porcentaje de blancura presente en las probetas. Este valor entregado por el equipo es la comparación entre éste y un patrón 100 % blanco; los valores que puede entregar el equipo varían entre un 100 % (ausencia total del color) y un 0 % (negro absoluto). Por lo tanto, la madera al oscurecerse va perdiendo porcentaje de blancura y los valores dados por el equipo disminuyendo. Para efectos prácticos, a los valores dados por el equipo se les calculó el inverso.

Cuadro 9. Tabla de intensidad de color con su respectivo índice, rango de color y el color representante de cada una de éstas.

Índice	Intensidad de color	Rango de color en el instrumento [%]	Rango de color [%]	Color patrón
0	Mínimo	]31 –	- 69[
1	Leve	]24,9 – 31]	[69 – 75,1[
2	Moderado	]19,1 – 24,9]	[75,1 – 80,9[
3	Exigente	]13,1 – 19,1]	[80,9 – 86,9[
4	Extremo	- 13,1]	[86,9 -	

A las probetas en que el rango de color fue superior a 31, se les asignó el valor cero. Este valor corresponde a las probetas que presentaban colores muy claros.

En el cuadro 10 se muestra para cada presión y su respectiva temperatura el tiempo total de vaporizado, los tiempos de toma de muestra, el número de mediciones, el número de piezas por repetición, el número de repeticiones para cada presión y el número total de piezas a ensayar para cada una de éstas. Esto es igual para las dos especies estudiadas, raulí y roble.

Cuadro 10. Cuadro resumen de los procesos de vaporizado.

Presión [Kg/cm ²]	Código	Temperatura [° C]	t total [h]	Δ tiempo [h]	N ° mediciones	N ° piezas	N° repeticiones	Total piezas a ensayar
Pa	D	≈100	72	24	3	20	4	80
0,5	A	110	24	3	8	12	4	48
1,0	B	120	16	2	8	12	4	48
1,5	C	127	8	1	8	12	4	48

4.2.3 Contenido de humedad (CH) y defectos

El contenido de humedad inicial de las probetas fue sobre el punto de saturación de la fibra (CH > 30 %), debido a que la conductividad térmica (k) del agua es 14 veces mayor que la del aire ($k_{\text{agua}} = 14 \times 10^{-4} [\text{cal} / \text{cm} \text{ } ^\circ\text{C} \text{ seg}] > k_{\text{aire}} = 0,57 \times 10^{-4} [\text{cal} / \text{cm} \text{ } ^\circ\text{C} \text{ seg}]$). Esto implica que la madera verde alcanza la temperatura mínima necesaria para el cambio de color en menos tiempo. Esto se debe a que la presencia de agua en lugar de aire al

interior de los lúmenes de las células, permiten que la madera alcance las temperaturas deseadas en un menor período de tiempo con la ventaja de un ahorro de energía.

Este parámetro fue determinado antes de entrar al vaporizado, en el transcurso de éste y al término del proceso, según el programa de cada proceso de vaporizado.

Para el caso de los defectos, se determinó la frecuencia de aparición y se midieron los defectos para cada pieza: rajaduras, grietas (externas) y deformaciones (torcedura, acanaladura, encorvadura y arqueadura). El conteo y las mediciones se realizaron al finalizar cada proceso de vaporizado y su objetivo fue conocer las características de la materia prima que, luego, continuará con el proceso de transformación secundaria.

La cuantificación de cada defecto se realizó de la forma detallada a continuación:

- Rajadura: Se midió el largo de ésta en el espesor y largo de la pieza.
- Grietas: Se midió la longitud de ésta.
- Torcedura: Se midió la deformación mediante la distancia (mm) de una esquina de la cara a una superficie plana sobre la cual están apoyadas las otras tres esquinas (NCh992).
- Acanaladura: Se midió la deformación máxima (mm) que presenta una cara con respecto a una línea recta trazada por sus aristas (NCh992).
- Arqueadura: Se midió la deformación máxima (mm) que presenta una cara con respecto a una línea recta trazada por los extremo de la pieza (NCh992).

4.2.4 Diseño estadístico

Con los datos de color obtenidos durante los tratamientos de vaporizado se determinaron las frecuencias totales de aparición de las intensidades de color por tratamiento y las frecuencias de aparición de estas intensidades en el transcurso de cada tratamiento. Esta información fue la base para la construcción de tablas de contingencia de doble entrada. La elección de este método para el análisis se basó en que los datos de color son variables cualitativas (atributos).

Las tablas de contingencia se confeccionaron con las frecuencias relativas que se observan para las dos clasificaciones y sus correspondientes categorías. El análisis de esta tabla supone que las dos clasificaciones son independientes. Esto es, bajo la hipótesis nula de independencia se desea saber si existe una diferencia suficiente entre las frecuencias que se observan y las correspondientes frecuencias que se esperan*, de manera tal que la hipótesis nula se rechace (Canavos, 1995).

Es así como la hipótesis nula puede establecerse de la siguiente forma:

$H_0: p_{ij} = p_{i.} p_{.j}$ donde $i = 1, \dots, r$ y $j = 1, \dots, c$

$p_{i.}, p_{.j}$ = probabilidades marginales

p_{ij} = probabilidad de que una observación seleccionada al azar de una población de interés se encuentre en la categoría (i, j) de la tabla de contingencia

Entonces bajo la hipótesis nula, el valor de la estadística es:

$\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \frac{(N_{ij} - n p_{i.} p_{.j})^2}{n p_{i.} p_{.j}}$, tiene una distribución chi-cuadrada con $(r-1)(c-1)$ grados de libertad. Donde N_{ij} = total de las observaciones (Canavos, 1995).

Una de las tablas de contingencia realizadas en este estudio consta de las clasificaciones color y presión, con el objetivo de analizar si existe independencia estadística entre los colores obtenidos durante cada tratamiento y la presión aplicada a cada uno de éstos. Además, para cada tratamiento se realizó una tabla de contingencia con las clasificaciones color y tiempo, con el fin de analizar si existe independencia estadística entre los colores obtenidos y el tiempo de vaporizado. Estas tablas se realizaron para las dos especies, raulí y roble.

En ambas especies estudiadas y una vez finalizados los tratamientos de vaporizado se determinaron los defectos producidos en las piezas de forma cuantitativa. Con estos datos se realizó para cada defecto, un análisis de varianza unifactorial, aleatorio y de cuatro

* La frecuencia esperada de la celda (i, j) es el producto del total del i-ésimo renglón por el total de la j-ésima columna dividido por el tamaño de la muestra N_{ij} .

repeticiones. El cual tiene como hipótesis nula que no existe ningún efecto debido a los tratamientos (Canavos, 1995). Se realizaron 5 diseños para cada especie en estudio de manera de aceptar o rechazar la hipótesis nula de independencia, donde el factor analizado fue cada defecto y los tratamientos las cuatro presiones aplicadas.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Color

Para determinar si existe relación entre las intensidades de color obtenidas durante el transcurso del vaporizado y los tratamientos aplicados se realizó una tabla de contingencia de doble entrada. Además, se elaboró otra tabla de contingencia para analizar si existe dependencia entre las intensidades de color obtenidas a las distintas horas del tratamiento en cada uno de éstos. Estas tablas se realizaron por separado para cada especie estudiada.

5.1.1 Color respecto a los tratamientos aplicados.

Los resultados obtenidos del análisis estadístico para el raulí con respecto al cambio de color ocurrido en esta madera y las distintas presiones a las que fueron sometidas, se presentan en el cuadro 11, y en el caso del roble, en el apéndice 8.1.1.

Cuadro 11. Tabla de contingencia con las frecuencias observadas, esperadas y el valor de la estadística de los colores obtenidos en el transcurso de cada tratamiento, para el raulí.

		Tratamientos de vaporizado				TOTAL
		A (0,5 [Kg/cm ²])	B (1 [Kg/cm ²])	C (1,5 [Kg/cm ²])	D (Pa)	
C o l o r	1	22 ¹ 13,84 ² 4,81 ³	13 14,80 0,22	10 14,66 1,48	9 10,69 0,27	54 54,0 6,78
	2	51 38,45 4,09	36 41,12 0,64	31 40,74 2,33	32 29,70 0,18	150 150,0 7,24
	3	28 43,07 5,27	47 46,05 0,02	57 45,62 2,84	36 33,26 0,23	168 168,0 8,35
	4	0 5,64 5,64	12 6,03 5,91	9 5,97 1,53	1 4,36 2,58	22 22,0 15,64
	TOTAL	101 101 19,81	108 108 6,78	107 107 8,18	78 78 3,26	394 394 38,03

¹ Frecuencia observada; ² Frecuencia esperada; ³ Valor de la estadística.

La hipótesis nula se estableció de la siguiente manera:

$$H_0: p_{ij} = p_{i.} \cdot p_{.j} \quad \text{donde } i = 1, \dots, 4 \text{ Categorías de la característica color.}$$

$$j = 1, \dots, 4 \text{ Categorías de la característica tratamientos de vaporizado.}$$

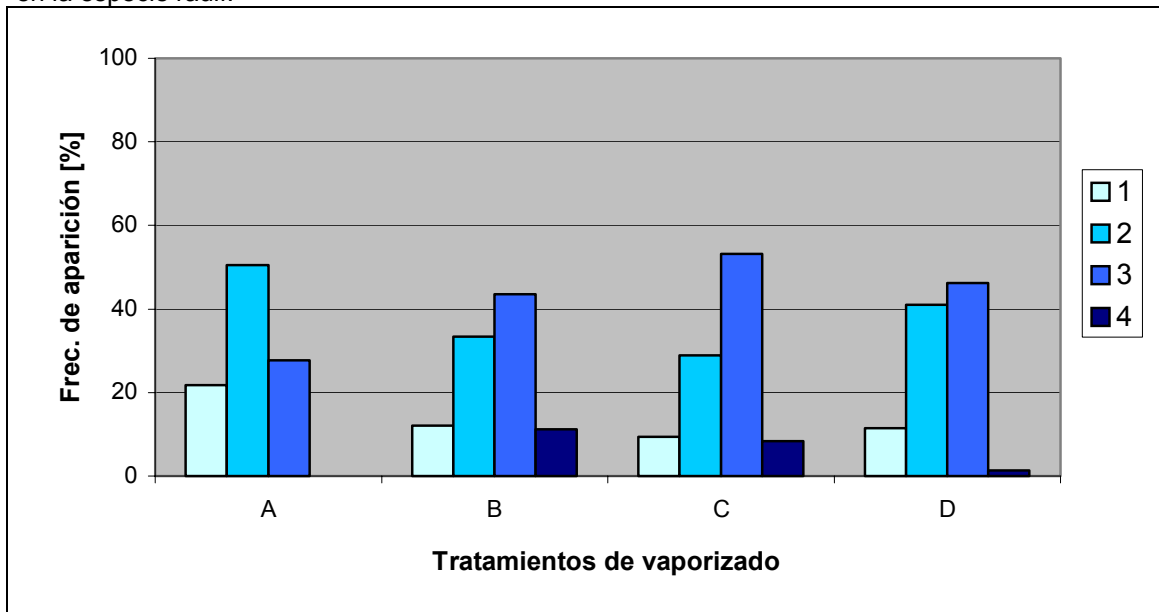
Donde p_{ij} es la probabilidad de que una probeta seleccionada al azar se encuentre en la categoría (i, j) ; $p_{i.}$ es la probabilidad marginal de que una probeta seleccionada al azar pertenezca a la intensidad de color i y $p_{.j}$ es la probabilidad marginal de que una probeta seleccionada al azar pertenezca a un tratamiento de vaporizado j . La frecuencia esperada de la celda (i, j) es el producto del total del i -ésimo renglón por el total de la j -ésima columna dividido por el tamaño de la muestra $N_{ij} = 394$. Por ejemplo, el número esperado de probetas que presenten la intensidad de color 1 y pertenezcan al tratamiento de vaporizado A, es $(101)(54) / 394 = 13,84$, donde $N_{ij} = 394$.

Es así como el valor de la estadística es

$$X^2 = \frac{(22 - 13,84)^2}{13,84} + \frac{(13 - 14,80)^2}{14,80} + \dots + \frac{(1 - 4,36)^2}{4,36} = 38,03$$

Dado que $r = c = 4$, el número de grados de libertad es 9. Para $\alpha = 0,05$, el valor crítico es $X^2_{0,95; 9} = 16,93$. De esta forma, el valor que se observa de la estadística de prueba se encuentra fuera de la región crítica, y la hipótesis nula se rechaza. De acuerdo a lo anterior, existe una razón para creer que los tratamientos aplicados a las maderas y las intensidades de color obtenidas durante el tratamiento, no son independientes. Esta dependencia se puede apreciar en la figura 8.

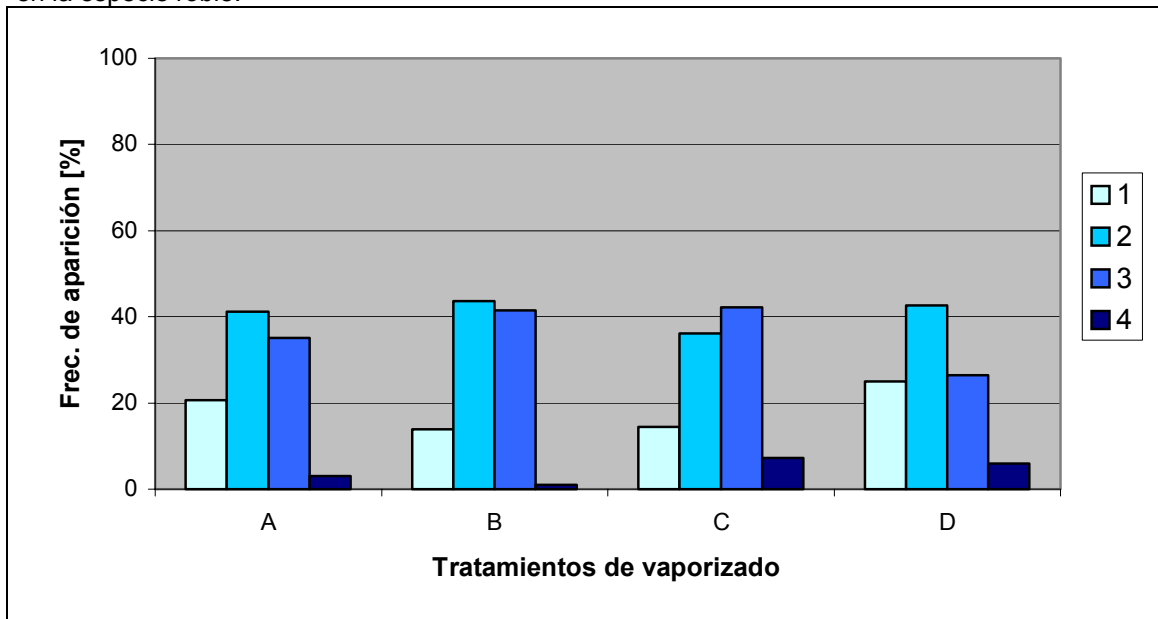
Figura 8. Variación del color con el tiempo de vaporizado para los cuatro tratamientos aplicados en la especie raulí.



En la figura 8 se puede observar que al aumentar la presión las frecuencias de las intensidades de color más oscuras (3 y 4) van aumentando, mientras que la intensidad de color 2 (moderada) va disminuyendo al aumentar la presión. Excepto para el caso del tratamiento D (a presión atmosférica) en donde el comportamiento recién descrito no ocurre, esto se puede deber a que el tratamiento D considera un tiempo de vaporizado (72 horas) considerablemente mayor al de los tratamientos A, B y C (corresponde al triple del tratamiento A, a 4,5 veces del B y a 9 veces del C). Dado que los tiempos totales de aplicación de vapor para cada tratamiento son distintos, se puede afirmar que al aumentar la presión de vaporizado la velocidad de cambio de color se incrementa.

En el caso del roble, la hipótesis nula se acepta con un grado de confianza de un 95% (ver apéndice 8.1.1). Por lo tanto, se puede pensar que son independientes las clasificaciones intensidad de color y tratamientos de vaporizado. En la figura 9 se puede observar la variación de color del roble con el tiempo de vaporizado para los cuatro tratamientos aplicados.

Figura 9. Variación del color con el tiempo de vaporizado para los cuatro tratamientos aplicados en la especie roble.



Como se puede apreciar en la figura 9 no se ve una clara correspondencia entre las presiones y las frecuencias de aparición de los colores obtenidos durante los tratamientos, dado que la frecuencia de la intensidad de color 2 (moderada) es similar para los cuatro tratamientos; en cambio, la intensidad de color 3 (exigente) tiene una frecuencia de aparición similar en los tratamientos sobre presión atmosférica (A, B, y C), excepto en el tratamiento D (a presión atmosférica) donde esta frecuencia disminuye y por último la frecuencia de aparición de la intensidad de color 4 (extremo) no tiene un claro comportamiento.

A pesar de la independencia estadística, de la figura 9 se puede afirmar que al aumentar la presión de vaporizado la velocidad de coloración se incrementa, debido a que los tiempos totales de aplicación de vapor para cada tratamiento son distintos (aumenta la presión y disminuyen los tiempos totales).

Con respecto al comportamiento del color de la madera vaporizada a presiones sobre la atmosférica se observa que no existen diferencias significativas en las frecuencias totales de aparición de las intensidades de color entre los tratamientos B (1,0 [Kg/cm²]) y C (1,5 [Kg/cm²]) para las dos especies en estudio. Estos datos concuerdan con el estudio de Brauner y Conway (1964) donde afirman que la coloración sobre los 110° C (0,5 [Kg/cm²])

no es notable. En general, se puede observar en el vaporizado de las maderas de raulí y roble que el tiempo de vaporizado y temperaturas sobre los 100° C son altamente efectivas en el cambio de color de la madera, esto coincide con los diversos autores citados en la revisión bibliográfica (Brauner y Conway, 1964; Chen y Workman, 1980 y M^c Ginnes y Rosen, 1984).

En el vaporizado de las maderas de raulí y roble el tiempo de exposición y las temperaturas de 100 °C y superiores son altamente efectivas en el cambio de color de la madera, una de las causas por las que esto se puede deber es que al aumentar las presiones aumentan las temperaturas, por lo tanto el tiempo en que se demora en alcanzar el centro de las piezas la temperatura necesaria para el cambio de color disminuye.

5.1.2 Color con respecto al Tratamiento A

En el cuadro 12 se muestran las características del tratamiento A, con el objetivo de recordar la presión de trabajo utilizada, la temperatura, el tiempo total del vaporizado, los intervalos de tiempo a los que se realizaron los cortes de las maderas, el número de mediciones o cortes realizados, el número de piezas ensayadas por cada repetición, el total de repeticiones y el total de piezas ensayadas en este tratamiento. Esto es igual para las dos especies estudiadas.

Cuadro 12. Características del tratamiento A.

Presión [Kg/cm ²]	Temperatura [° C]	t total [h]	Δ tiempo [h]	N ° mediciones	N ° piezas	N° repeticiones	Total piezas a ensayar
0,5	110	24	3	8	12	4	48

Los resultados obtenidos del análisis estadístico para el tratamiento A con respecto a las intensidades de color obtenidas durante el transcurso del vaporizado a los distintos tiempos, se presentan en el cuadro 13 para el caso del raulí, y en el caso del roble en el apéndice 8.2.1.

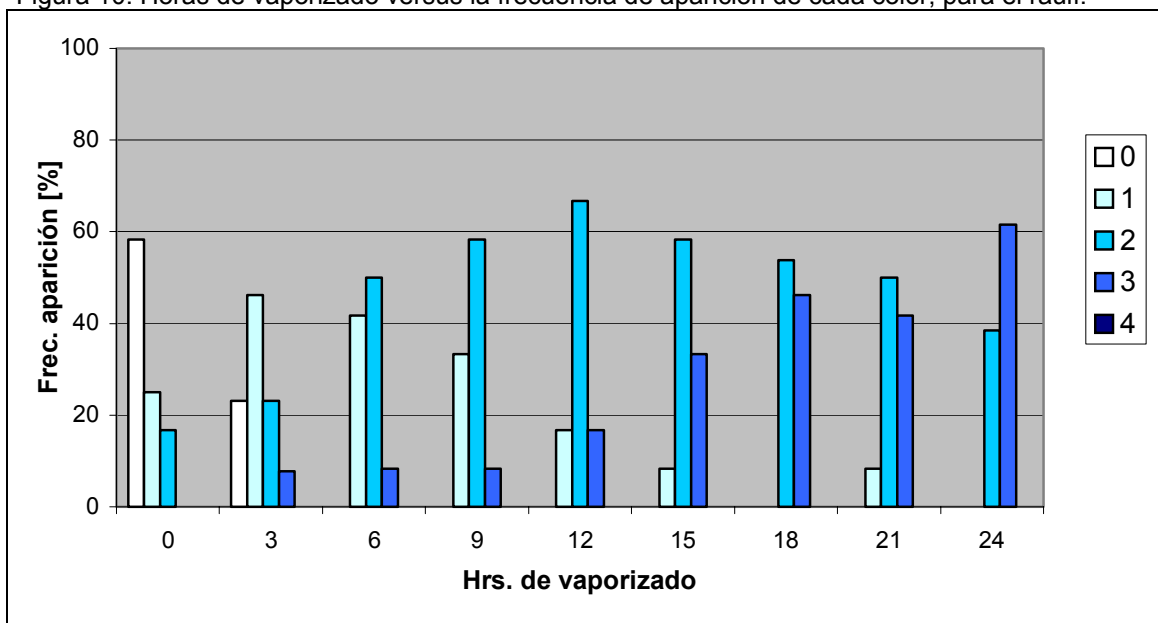
Cuadro 13. Tabla de contingencia con las frecuencias observadas, esperadas y el valor de la estadística de los colores obtenidos en el transcurso del tratamiento A, para el raulí.

		Color					
Raulí		1	2	3	4	TOTAL	
Δ T i e m p o	3 h (1C)	5,75 ¹ 1,80 ² 8,71 ³	2,5 4,57 0,94	0,75 2,63 1,34	0 0,0 0,0	9 11,0 11,75	9,0 11,0 11,75
	6 h (2C)	5,25 2,34 3,60	5,75 5,97 0,01	0,75 3,44 2,10	0 0,0 0,0	11,75 5,71 12,0	11,75 5,71 12,0
	9 h (3C)	4 2,39 1,08	6,75 6,10 0,07	1,25 3,51 1,45	0 0,0 0,0	12 2,60 12,0	12,0 2,60 12,0
	12 h (4 C)	2,25 2,39 0,01	7,5 6,10 0,07	2,25 3,51 0,45	0 0,0 0,0	12 0,78 10,75	12,0 0,78 10,75
	15 h (5C)	0,5 2,14 1,26	6,75 5,46 0,30	3,5 3,14 0,04	0 0,0 0,0	10,75 1,60 12,0	10,75 1,60 12,0
	18 h (6 C)	0 2,39 2,39	6,5 6,10 0,03	5,5 3,51 1,13	0 0,0 0,0	12 3,55 12,0	12,0 3,55 12,0
	21 h (7 C)	0,5 2,39 1,50	6,25 6,10 0,0	5,25 3,51 0,86	0 0,0 0,0	12 2,37 12,0	12,0 2,37 12,0
	24 h (8 C)	0 2,39 2,39	4,5 6,10 0,42	7,5 3,51 4,54	0 0,0 0,0	12 7,35 91,5	12,0 7,35 91,5
	TOTAL	18,25 18,25 20,95	46,5 46,5 2,09	26,75 26,75 11,93	0 0,0 0,0	91,5 91,5 34,97	91,5 91,5 34,97

¹ Frecuencia observada; ² Frecuencia esperada; ³ Valor de la estadística

En el caso del raulí se rechaza la hipótesis de independencia con un grado de confianza de un 95% y un valor crítico de $X_{0,95; 21} = 32,68$ (valor tabla), éste valor es menor que el obtenido, $X = 34,97$. De acuerdo a lo anterior, existe una razón para creer que las intensidades de color obtenidas con respecto al tratamiento y a los tiempos en que se realizaron los cortes en el transcurso del vaporizado, son dependientes. Esta dependencia se puede apreciar en la figura 10.

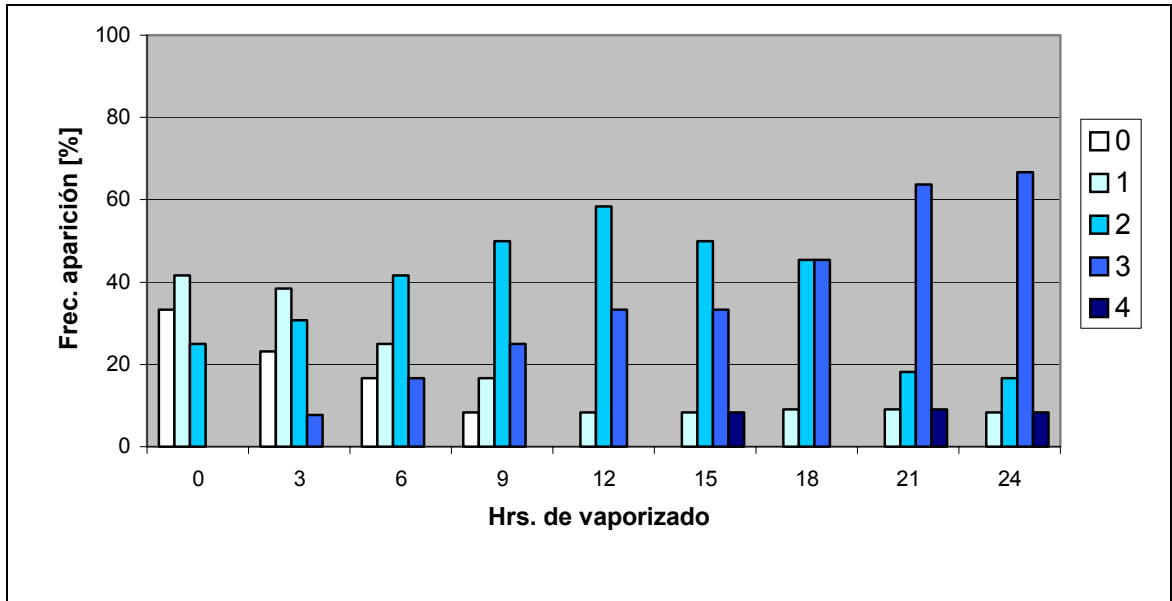
Figura 10. Horas de vaporizado versus la frecuencia de aparición de cada color, para el raulí.



Como se observa en la figura 10, el color de las maderas se va oscureciendo al transcurrir las horas de vaporizado y a mayor cantidad de horas la frecuencia de aparición del índice 3 incrementa y las intensidades de color más claras (índices 0 y 1) disminuyen. A las 18 horas de vaporizado el 100% de las maderas presentan las intensidades de color moderada (índice 2) y exigente (índice 3), manteniéndose estas intensidades de color hasta el final de vaporizado. No se alcanza la intensidad de color extrema (índice 4) en el tratamiento A para el raulí.

En el caso del roble, la hipótesis nula se acepta con un grado de confianza de un 95% (ver apéndice 8.2.1). Por lo tanto, se puede pensar que son independientes las clasificaciones intervalos de tiempo a los que se realizaron los cortes en la madera e intensidad de color. En la figura 11 se puede observar las horas de vaporizado versus la frecuencia de aparición de cada color.

Figura 11. Horas de vaporizado versus la frecuencia de aparición de cada color, en el caso del roble.



Al igual que en la figura 10, en la figura 11 se aprecia como va evolucionando el color en la madera a medida que el tiempo de vaporizado transcurre. A las 12 horas de vaporizado el 91,7% de las piezas presentan el índice 2 (intensidad de color moderada) y 3 (intensidad de color exigente). El índice 4 (intensidad de color extrema) presenta un pequeño porcentaje, alrededor del 8,6%, en las últimas horas del vaporizado.

El hecho que marca la independencia estadística entre las clasificaciones intensidad de color y horas de vaporizado radica en el bajo porcentaje (33,3%) del índice 0, bajo el 50%, presente en las piezas a vaporizar (0 horas de vaporizado); por lo que existe una mayor frecuencia de los índices 1 y 2. Esto determina que la evolución del color en el transcurso del tiempo de vaporizado sea menos drástica.

A pesar de la independencia estadística, en la figura 11 se puede observar como al prolongar los tiempos de vaporizado se obtienen intensidades de color más oscuras, lo que concuerda con los diversos autores citados en la bibliografía (Brauner y Conway, 1964; Davis y Thompson, 1964; Hildebrand, 1970; Chen y Workman, 1980; M^c Ginnes y Rosen, 1984; Bekhta y Niemz, 2003; y Sehlsted, 2003).

5.1.3 Color con respecto al Tratamiento B

En el cuadro 14 se presentan las características del tratamiento B. Esto es igual para las dos especies estudiadas.

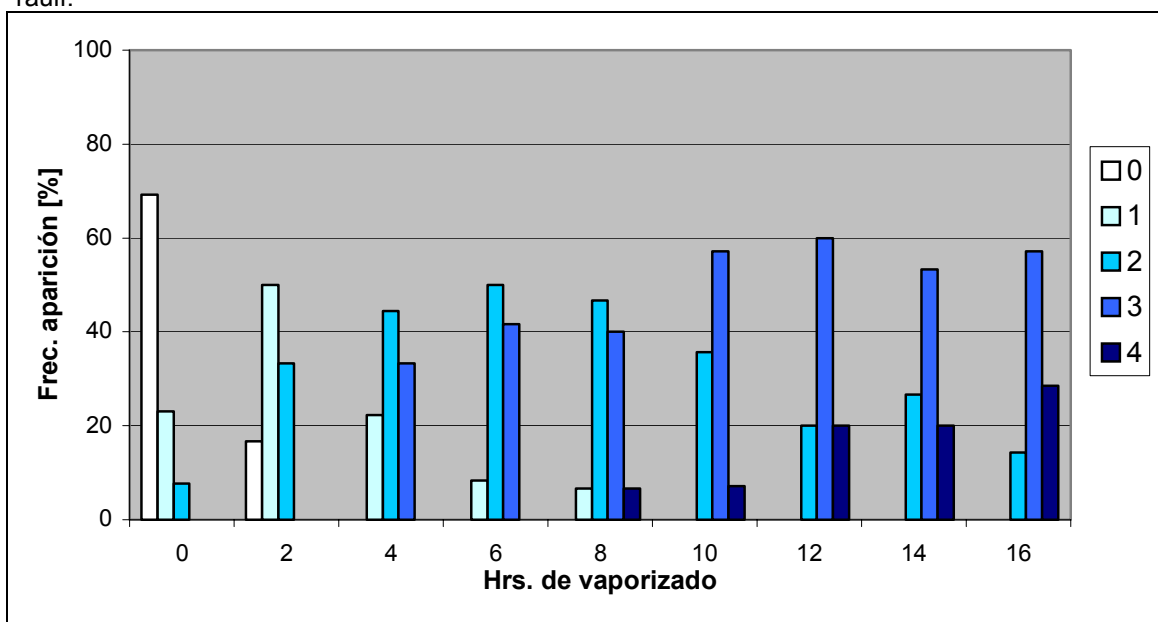
Cuadro 14. Características del tratamiento B.

Presión [Kg/cm ²]	Temperatura [° C]	t total [h]	Δ tiempo [h]	N ° mediciones	N ° piezas	N ° repeticiones	Total piezas a ensayar
1,0	120	16	2	8	12	4	48

Los resultados obtenidos del análisis estadístico para el tratamiento B con respecto a las intensidades de color obtenidas durante el transcurso del vaporizado a los distintos tiempos, se presentan en el apéndice 8.2.2 para el caso de las dos especies estudiadas.

En la figura 12 se puede observar el comportamiento de la madera de raulí en el transcurso del tiempo al someterlo a 1 [Kg/cm²] de presión sobre la atmosférica y en el caso del roble, en la figura 13.

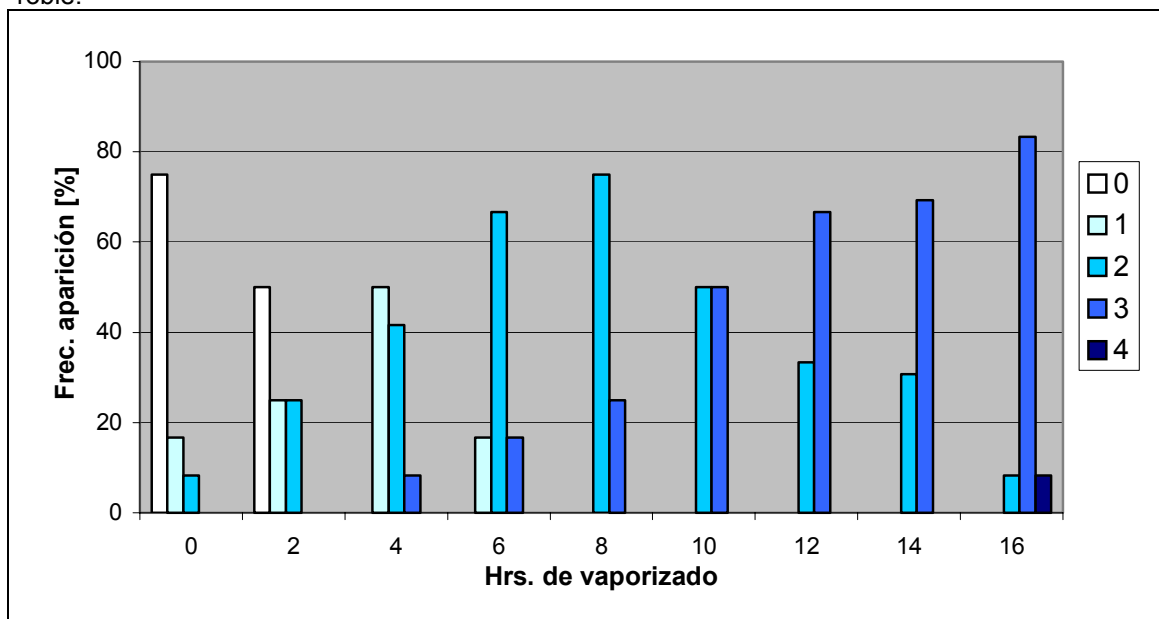
Figura 12. Horas de vaporizado versus la frecuencia de aparición de cada color, en el caso del raulí.



En la figura 12 se puede observar como la madera al someterla a vapor saturado se va oscureciendo y al estar expuesta por más horas alcanza la intensidad de color más

oscura, con mayores frecuencias. A las 6 horas de vaporizado el 91,7% de las piezas presentan las intensidades de color moderada (índice 2) y exigente (índice 3). La intensidad de color extrema (índice 4) se presenta a las 12 horas de vaporizado con una frecuencia de aparición de un 6,7%, aumentando paulatinamente hasta las 16 horas alcanzando una frecuencia de un 28,6%.

Figura 13. Horas de vaporizado versus la frecuencia de aparición de cada color, en el caso del roble.



En la figura 13 se puede observar como la madera al someterla a vapor saturado se va oscureciendo y al estar expuesta por más horas alcanza con una mayor frecuencia la intensidad de color exigente, la intensidad de color más oscura sólo aparece en las últimas horas de vaporizado. A las 8 horas de vaporizado el 100% de las piezas presentan las intensidades de color moderada (índice 2) y exigente (índice 3). La intensidad de color extrema (índice 4) se presenta sólo a las 16 horas de vaporizado con una frecuencia de aparición de un 8,3%.

5.1.4 Color con respecto al Tratamiento C

En el cuadro 15 se presentan las características del tratamiento C. Esto es igual para las dos especies estudiadas.

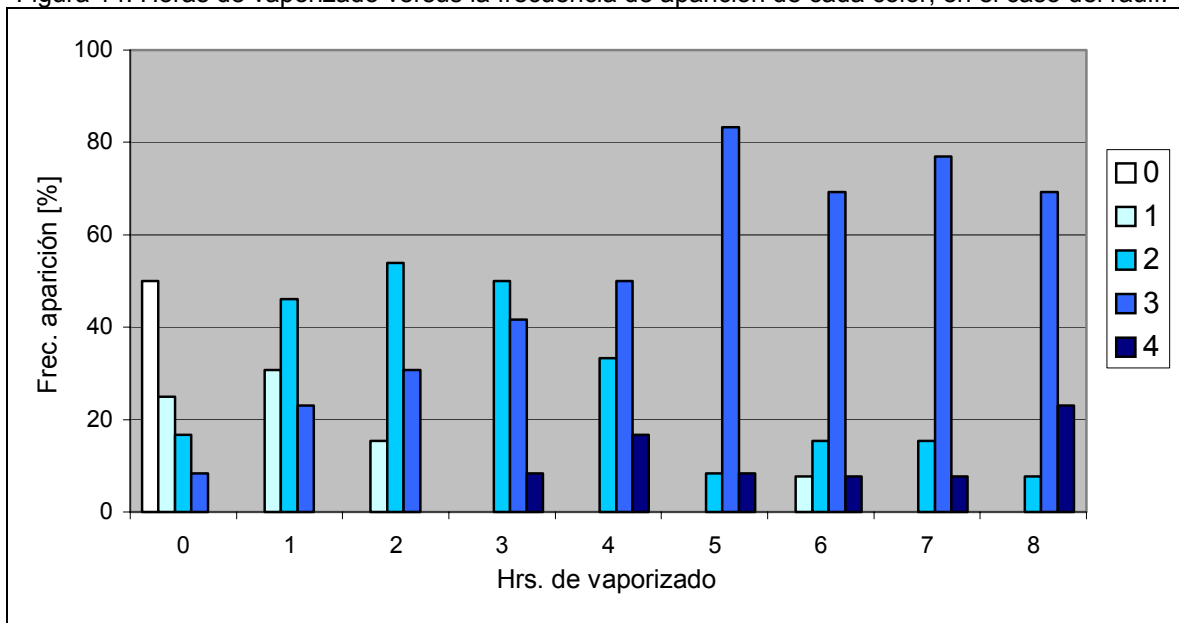
Cuadro 15. Características del tratamiento C.

Presión [Kg/cm ²]	Temperatura [° C]	t total [h]	Δ tiempo [h]	N ° mediciones	N ° piezas	N° repeticiones	Total piezas a ensayar
1,5	127	8	1	8	12	4	48

Los resultados obtenidos del análisis estadístico para el tratamiento C con respecto a las intensidades de color obtenidas durante el transcurso del vaporizado a los distintos tiempos, se presentan en el apéndice 8.2.3 para los renovales de raulí y roble.

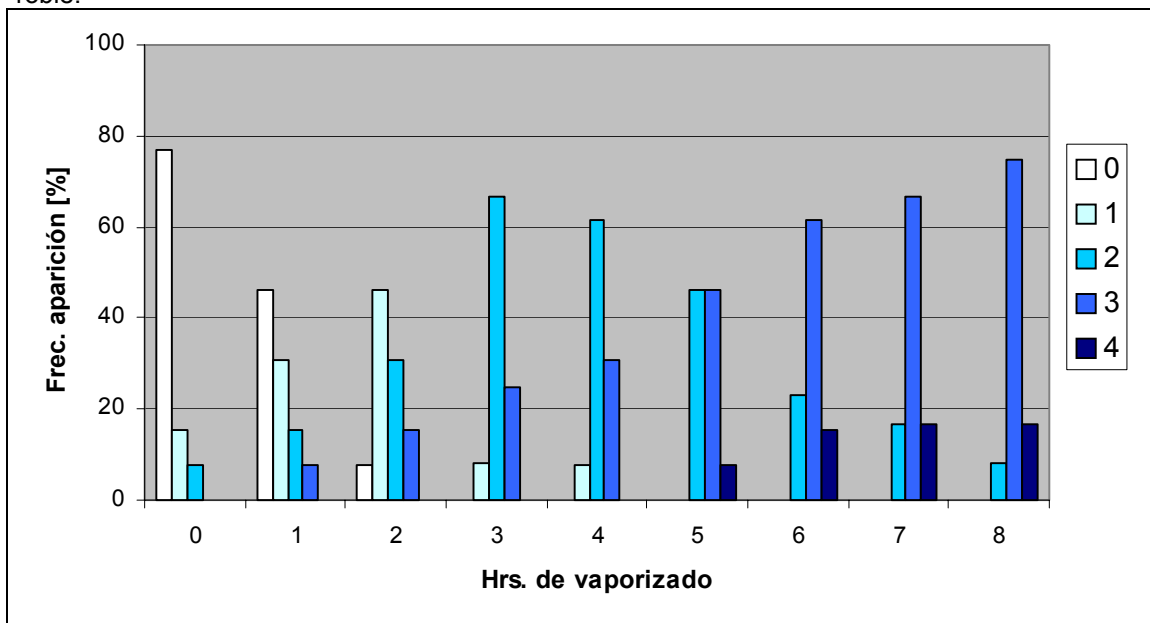
En la figura 14 se puede observar el comportamiento de la madera de raulí en el transcurso del tiempo al someterlo a 1,5 [Kg/cm²] de presión sobre la atmosférica y en el caso del roble, en la figura 15.

Figura 14. Horas de vaporizado versus la frecuencia de aparición de cada color, en el caso del raulí.



En la figura 14 se aprecia como la madera al someterla a vaporizado se va oscureciendo, y al aumentar los tiempos de exposición se alcanza la intensidad de color extrema (índice 4) con una mayor frecuencia. A las 3 horas de vaporizado se obtienen el 91,7% de las piezas con las intensidades de color moderada y exigente. La intensidad de color extrema aparece a las 3 horas de vaporizado en un 8,3%, aumentando paulatinamente hasta las 8 horas de vaporizado donde alcanza un 23,1% de frecuencia de aparición de ésta.

Figura 15. Horas de vaporizado versus la frecuencia de aparición de cada color, en el caso del roble.



En la figura 15 se observa como la madera al someterla a vapor saturado se va oscureciendo, y al aumentar los tiempos de exposición se alcanza la intensidad de color extrema (índice 4) con una mayor frecuencia. A las 4 horas de vaporizado se obtienen el 92,3% de las piezas con las intensidades de color moderada y exigente. La intensidad de color extrema aparece a las 5 horas de vaporizado en un 7,7%, aumentando paulatinamente hasta las 8 horas de vaporizado donde alcanza un 16,7% de frecuencia de aparición.

5.1.5 Color con respecto al Tratamiento D

En el cuadro 16 se presentan las características del tratamiento D. Esto es igual para las dos especies ensayadas.

Cuadro 16. Características del tratamiento D.

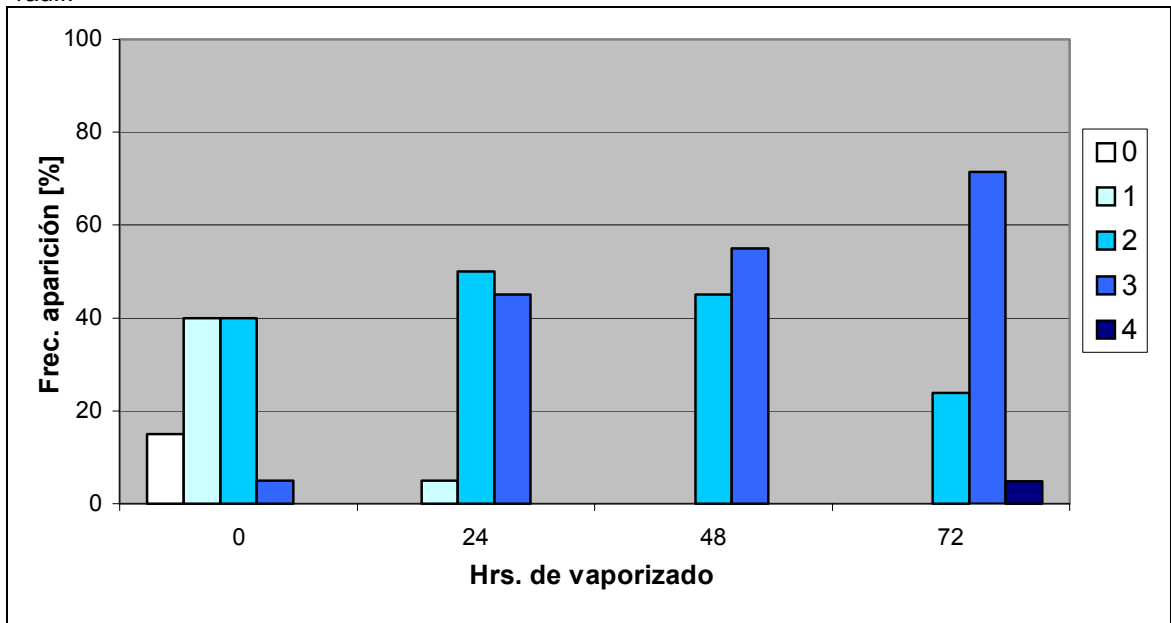
Presión	Temperatura [° C]	t total [h]	Δ tiempo [h]	N ° mediciones	N ° piezas	N° repeticiones	Total piezas a ensayar
Pa	≈100	72	24	3	20	4	80

Los resultados obtenidos del análisis estadístico para el tratamiento D con respecto a las intensidades de color obtenidas durante el transcurso del vaporizado a los distintos

tiempos, se presentan en el apéndice 8.2.4 par el caso de la madera de raulí y roble.

En la figura 16 se puede observar el comportamiento de la madera de raulí en el transcurso del tiempo al someterlo a presión atmosférica y en el caso del roble, en la figura 17.

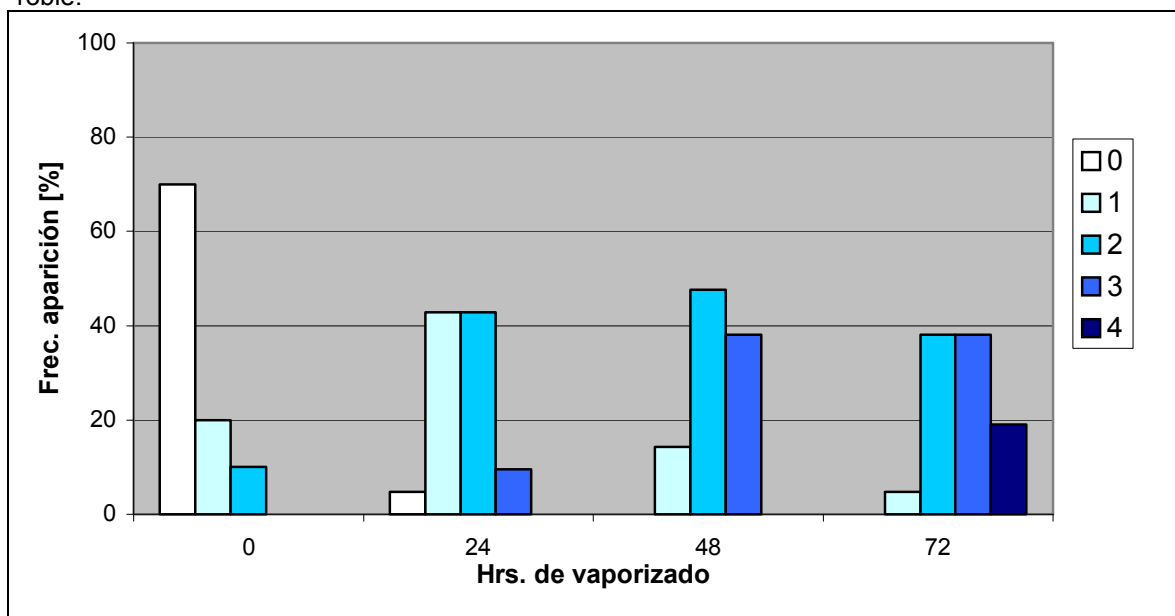
Figura 16. Horas de vaporizado versus la frecuencia de aparición de cada color, en el caso del raulí.



Como se aprecia en la figura 16 el color en la madera en la medida que el tiempo de vaporizado transcurre se va oscureciendo y aumentando la frecuencia de aparición del índice 3. A las 48 horas de vaporizado el 100% de las piezas presentan el índice 2 (intensidad de color moderada) y 3 (intensidad de color exigente). El índice 4 (intensidad de color extrema) presenta un pequeño porcentaje, alrededor del 5%, a las 72 horas del vaporizado.

El hecho que marca la independencia estadística entre las clasificaciones intensidad de color y horas de vaporizado está en el bajo porcentaje (15%) de la intensidad de color mínimo (índice 0), bajo el 50%, presente en las piezas a vaporizar (0 horas de vaporizado). Aún así, existe coloración de la madera al aumentar las horas en exposición de ésta al vaporizado que no es significativamente importante en términos estadísticos.

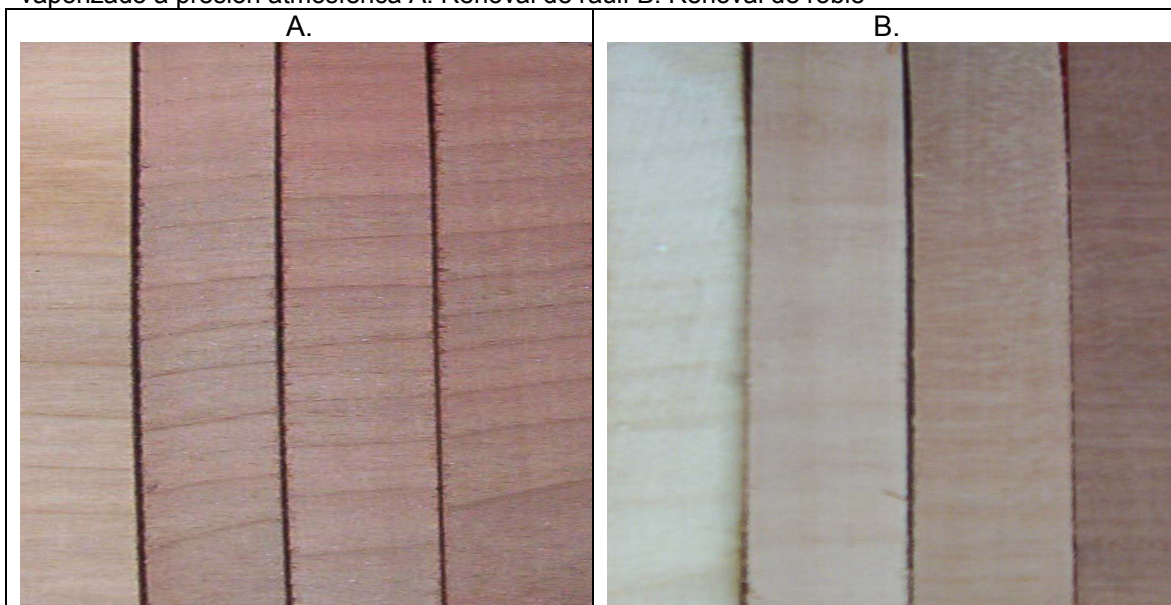
Figura 17. Horas de vaporizado versus la frecuencia de aparición de cada color, en el caso del roble.



Como se aprecia en la figura 17 el color en la madera de roble se va oscureciendo en la medida que el tiempo de vaporizado transcurre y al aumentar el tiempo de exposición al vaporizado la frecuencia de aparición del índice 3 incrementa, apareciendo en las últimas horas la intensidad de color más oscura. A las 48 horas de vaporizado el 86% de las piezas presentan el índice 2 (intensidad de color moderada) y 3 (intensidad de color exigente). El índice 4 (intensidad de color extrema) aparece a las 72 horas de vaporizado con un porcentaje cercano al 20%.

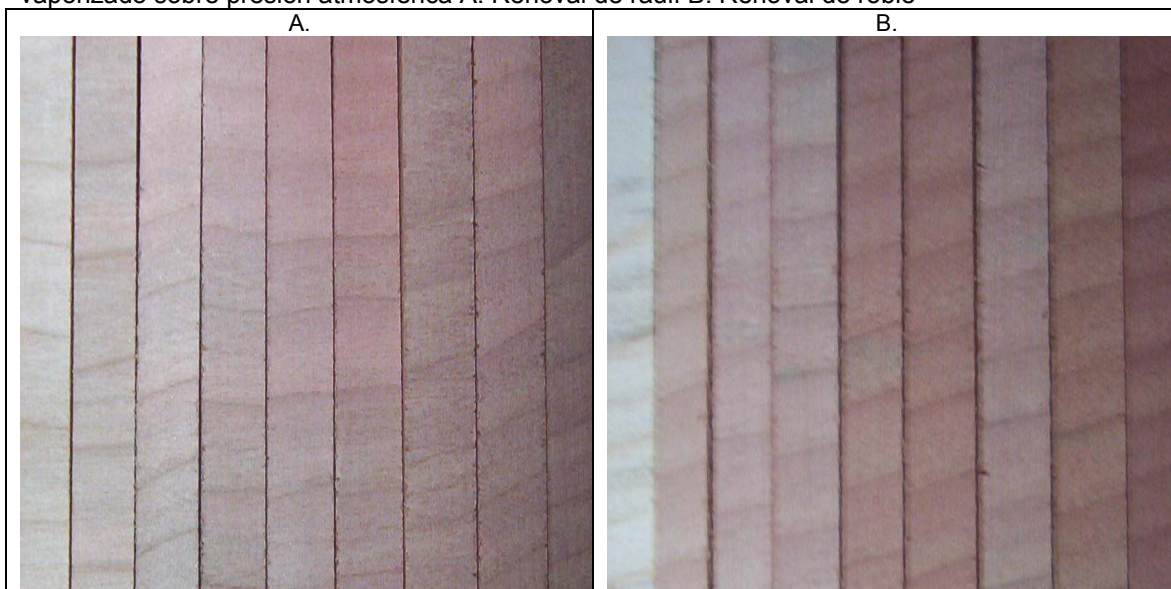
En la figura 18 se puede observar un ejemplo de la evolución del color en el transcurso del vaporizado al aumentar el tiempo de exposición para el raulí y el roble, cuando estas especies son sometidas al tratamiento de vaporizado a presión atmosférica (D).

Figura 18. Evolución del color desde la probeta testigo hasta finalizado el tratamiento de vaporizado a presión atmosférica A. Renoval de raulí B. Renoval de roble



En la figura 19 se puede observar un ejemplo de la evolución del color en el transcurso del vaporizado al aumentar el tiempo de exposición para el raulí y el roble, cuando estas especies son sometidas a tratamientos de vaporizado sobre presión atmosférica.

Figura 19. Evolución del color desde la probeta testigo hasta finalizado el tratamiento de vaporizado sobre presión atmosférica A. Renoval de raulí B. Renoval de roble



En los cuatro tratamientos analizados anteriormente se observa un comportamiento similar, de esta manera al aumentar los tiempos de exposición al vaporizado el grado de coloración se incrementa y su vez la frecuencia. Las diferencias entre los tratamientos se presentan en los tiempos que tardan en alcanzar las intensidades de color definidas.

Por ejemplo, cuando más del 90% de las piezas de raulí alcanzan las intensidades de color 2 y 3, los tiempos van disminuyendo cuando aumenta la presión; es así que el tiempo que demora en alcanzar estas intensidades para la presión de 1,5 [Kg/cm²] es 2 veces menor que el de 1,0 [Kg/cm²], 6 veces menos que el de la presión de 0,5 [Kg/cm²] y 8 veces menor que el tratamiento a presión atmosférica. El caso del roble es similar, cuando más del 90% de las piezas alcanzan las intensidades de color 2 y 3 los tiempos de vaporizado van disminuyendo a medida que la presión aumenta, es así como el tiempo de la presión de 1,5 [Kg/cm²] es 2 veces menos que el de 1,0 [Kg/cm²], 3 veces menor que el de la presión de 0,5 [Kg/cm²] y 12 veces menos que el tratamiento a presión atmosférica. Por lo tanto, se puede afirmar que la velocidad de coloración aumenta al incrementar la presión.

En todos los tratamientos aplicados en este estudio se observa una correspondencia entre el comportamiento del color y el vaporizado con los descritos en la bibliografía. En las dos especies estudiadas la coloración de las maderas aumenta al incrementarse los tiempos de vaporizado, esto concuerda con Davis y Thompson (1964) que afirman que el grado de coloración aumenta cuando se incrementa el periodo de exposición, pero no siempre las diferencias de color son notables a simple vista. En general, en las maderas de raulí y roble el tiempo de exposición al vaporizado es un factor preponderante en el cambio de color de estas maderas, esto concuerda con la bibliografía consultada (Brauner y Conway, 1964; Davis y Thompson, 1964; Hildebrand, 1970; Chen y Workman, 1980; McGinnes y Rosen, 1984 y Bekhta y Niemz, 2003 y Sehlsted, 2003).

Una de las posibles causas para el cambio de color en todos los tratamientos de vaporizado aplicados a las maderas de raulí y roble podrían atribuirse al tipo de extraíbles que presentan estas especies (taninos condensados) y, además, que al aumentar las horas de exposición existe por un mayor período de tiempo, las condiciones para que se produzcan las reacciones químicas de oxidación asociadas al cambio de color.

5.1.6 Tiempos a los cuales se obtienen las tonalidades de color predefinidas

Las intensidades de color moderada y exigente, índices 2 y 3, respectivamente; son los colores de mayor interés para la empresa. Con los datos obtenidos en el estudio se determinaron, para cada tratamiento, los tiempos a los que estas intensidades de color se lograron en un mayor porcentaje y el contenido de humedad promedio que presentaban las piezas en esos tiempos de vaporizado. En el cuadro 17 se muestran los tiempos a los que se obtuvieron los índices 2 y 3.

Cuadro 17. Tiempos a los que se obtuvieron los índices 2 y 3 para cada tratamiento y el contenido de humedad asociado a estos tiempos.

Tratamiento	Especie	Índice	Tiempos [hrs]	CH [%]	% probetas
A	Raulí	2 y 3	18	34,9	100
	Roble	2 y 3	12	48,4	91,7
B	Raulí	2 y 3	6	52,8	91,7
	Roble	2 y 3	8	53,9	100
C	Raulí	2 y 3	3	51,1	91,7
	Roble	2 y 3	4	54,2	92,3
D	Raulí	2 y 3	24	55,4	95
			48	50,7	100
	Roble	2 y 3	48	65,1	86

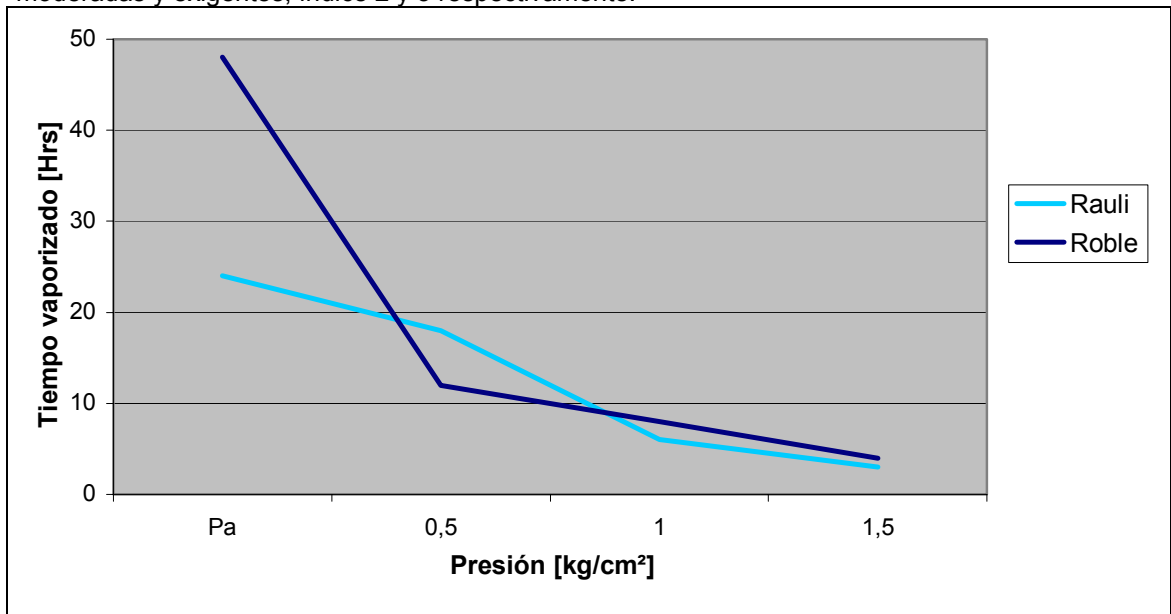
En el caso del raulí (cuadro 17) en el tratamiento D (a presión atmosférica) se incluyeron los porcentajes de probetas en los índices 2 y 3 tanto para 24 horas (95%) como para 48 horas (100%). Esto porque podría resultar más conveniente, en términos económicos, obtener un 95% de las piezas con índices 2 y 3 en tratamientos de 24 horas, que obtener un 100% con tratamientos del doble de duración (48 horas), en consideración al ahorro de energía y tiempo, con el tratamiento más breve.

Respecto al contenido de humedad (cuadro 17) que presentaban las probetas al alcanzar las intensidades de color moderado y exigente, se puede afirmar que en los tratamientos sobre la presión atmosférica la disminución del contenido de humedad en promedio (respecto al contenido de humedad inicial) de la madera de raulí fue de un 27,2% y la disminución del contenido de humedad en promedio para la madera de roble fue de un 27,9%; para el caso de los tratamientos a presión atmosférica, la disminución de la humedad (respecto al contenido de humedad inicial) es para el caso del raulí de un 18,5% y para el caso del roble de un 43,2%. Estos datos de contenido de humedad de la madera al alcanzar las intensidades de color moderada y exigente son relevantes al influir

directamente en los tiempos de secado, disminuyendo éstos considerablemente.

En el cuadro 17 se puede observar como al aumentar la presión del vaporizado los tiempos para obtener las intensidades de color predefinidas disminuyen. Este hecho puede verse claramente en la figura 20.

Figura 20. Presión de vaporizado respecto el tiempo en que se obtuvieron las intensidades de color moderadas y exigentes, índice 2 y 3 respectivamente.



En la figura 20 se puede observar que el raulí alcanza las intensidades de color moderada y exigente en un menor tiempo que el roble para la presión de trabajo más baja, mientras que para las presiones mayores, estos tiempos son similares y para la presión de 0,5 [Kg/cm²] el raulí se demora 6 horas más que el roble. Esta diferencia en el tiempo de vaporizado entre ambas especies puede atribuirse a la diferencia en el contenido de extraíbles en ellas, que en el caso del raulí es de un 4,3% y de un 1,9% en el caso del roble (Poblete y Zárate, 1986).

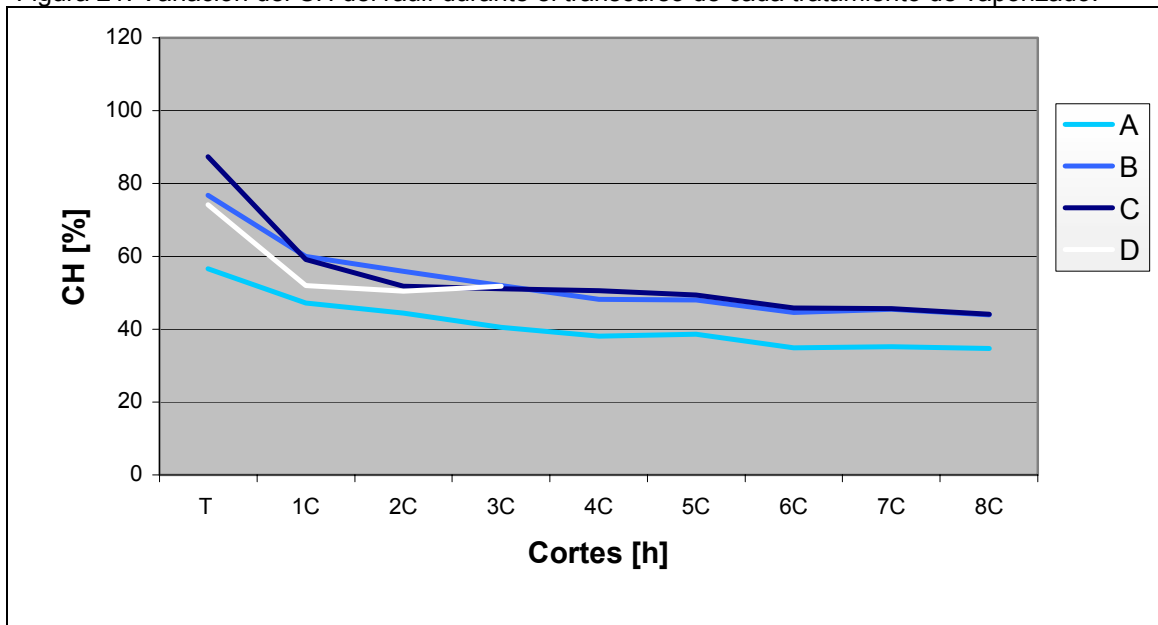
Las diferencias observadas en el tiempo necesario para alcanzar las intensidades de color moderada y exigente entre las maderas vaporizadas a presión atmosférica y las sometidas a niveles de presión sobre ésta se pueden deber a que al aumentar la presión, la temperatura necesaria para que se produzcan las condiciones necesarias para el cambio de color ocurra en un tiempo menor.

5.2 Contenido de humedad

Según Brauner y Conway (1964) el contenido de humedad inicial de la madera sometida a vaporizado es un factor preponderante para que el color obtenido en ella sea homogéneo en sus caras y a través del espesor. Esto se debe al hecho de que el agua ayuda en la conducción del calor a través de los tejidos de la madera y además, a que la humedad en la madera juega un rol importante en los procesos químicos que causan el cambio de color en ésta. Esta dependencia indicada por Brauner y Conway (1964) concuerda con lo expresado por otros autores, como Chen y Workman (1980); Gorisek *et al.* (2003) y Sehlsted (2003); quienes plantean que el contenido de humedad inicial al momento del vaporizado es importante para obtener una mayor calidad (homogeneidad) en la decoloración.

A continuación se presentan las variaciones en el contenido de humedad del raulí (figura 21) y del roble (figura 22) durante el vaporizado.

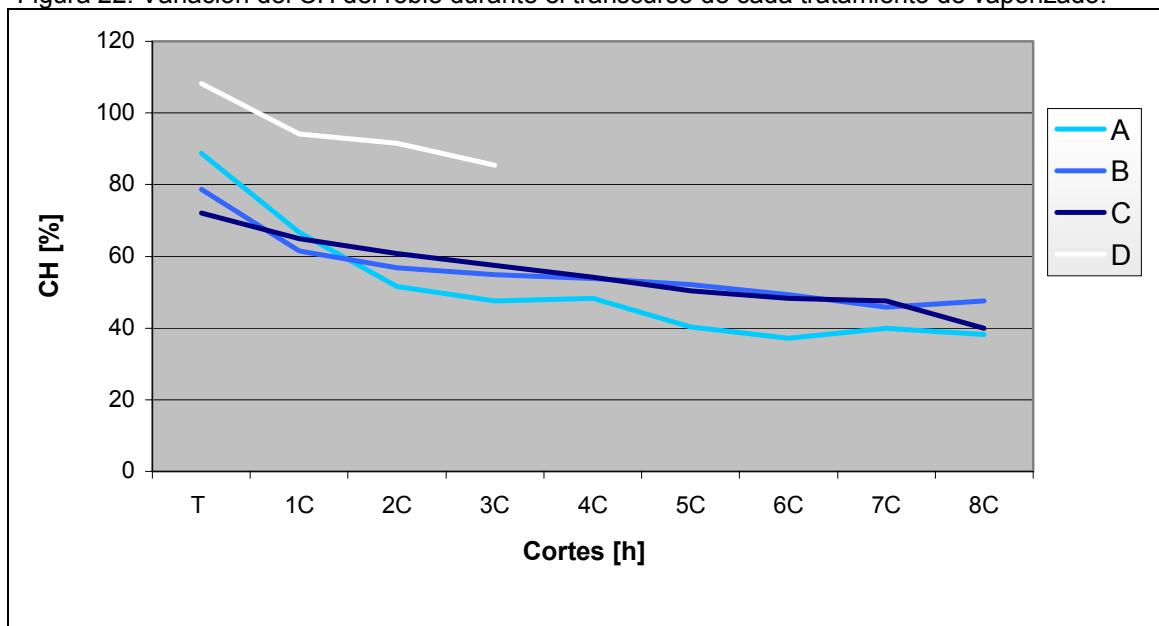
Figura 21. Variación del CH del raulí durante el transcurso de cada tratamiento de vaporizado.



Como se observa en la figura 21 la pérdida de humedad es similar en todos los tratamientos, verificándose en las primeras horas de vaporizado una pendiente abrupta, la que se suaviza al transcurrir el tiempo. Los contenidos de humedad finales están

alrededor del 40%, excepto en el vaporizado a presión atmosférica (D), en donde el CH es aproximadamente un 50%. Con respecto a las variaciones totales de CH, en similares condiciones de humedad inicial, el tratamiento D es el que presenta las menores disminuciones de ésta a mayores tiempos de exposición al vapor.

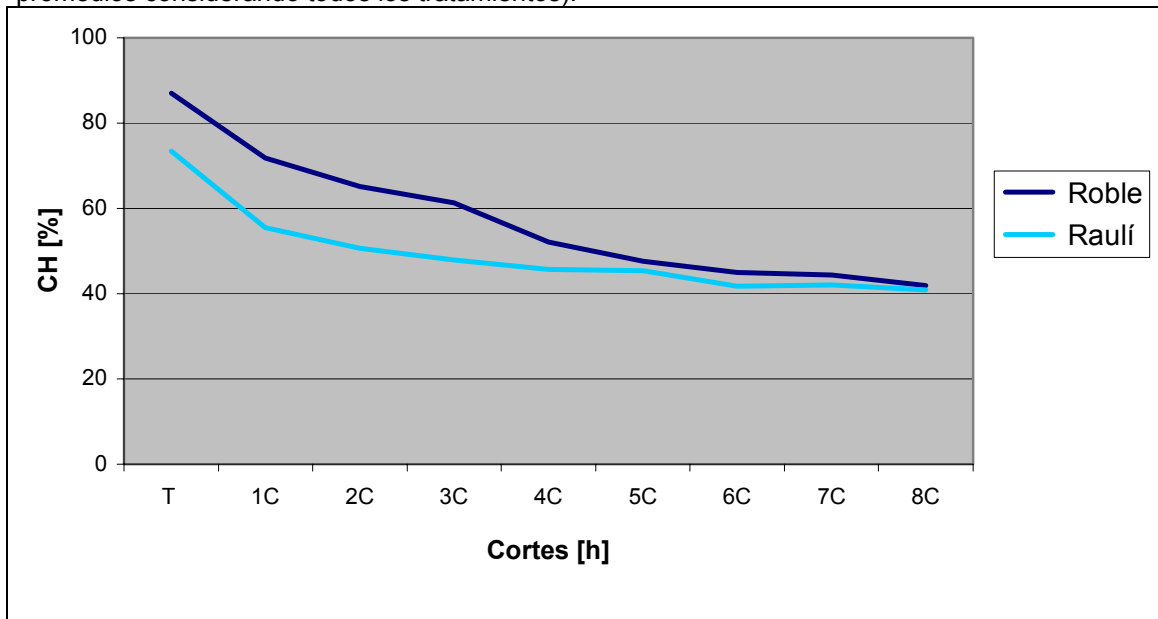
Figura 22. Variación del CH del roble durante el transcurso de cada tratamiento de vaporizado.



En la figura 22 se aprecia que en todos los tratamientos el comportamiento de la humedad es similar, con una pendiente fuerte al comienzo del vaporizado para luego ser más suave. Los contenidos de humedad finales varían entre un 40 y un 50% para los tratamientos sobre presión atmosférica, en donde los contenidos de humedad iniciales estaban entre un 72 y 88% y para el tratamiento a presión atmosférica la humedad final es cercana al 80%, pero su contenido de humedad inicial estaba sobre el 100% (CH=108%).

En la figura 23 se presenta la variación del contenido de humedad del raulí y del roble como un promedio de los valores obtenidos en todos los tratamientos de vaporizado.

Figura 23. Variación del CH del roble y raulí durante el transcurso del vaporizado (valores promedios considerando todos los tratamientos).



A partir de la figura 23 se puede afirmar que la pérdida de humedad en el raulí es mucho más rápida que la pérdida que ocurre en el roble en las primeras horas de vaporizado, semejándose en las últimas horas. Es así como en las dos especies el contenido de humedad final es similar y cercano al 40%. Esto puede deberse a que el contenido de humedad promedio del roble (86,9%) al comienzo del vaporizado fue mayor que el del raulí (73,5%), y a que el roble presenta una mayor densidad que el raulí, por lo que el movimiento del agua y del vapor en las primeras horas de vaporizado es más lento.

5.3 Defectos

De acuerdo a lo indicado en el capítulo de Materiales y Método, a continuación se entregan los resultados obtenidos del análisis estadístico realizado a cada uno de los defectos estudiados, sobre los que se aplicó un diseño completamente aleatorio.

Cabe señalar que existieron piezas que presentaban médula, característica que determina una mayor frecuencia de aparición de defectos al vaporizarlas, debido a sus distintas propiedades físicas comparada con la madera, como por ejemplo menor densidad, lo que produce diversas tensiones las que se traducen en grietas, rajaduras y alabeos.

5.3.1 Raulí

En el cuadro 18 se muestra una tabla con los resultados obtenidos en el análisis de varianza efectuado para las piezas de raulí para todos los defectos presentes en las maderas vaporizadas.

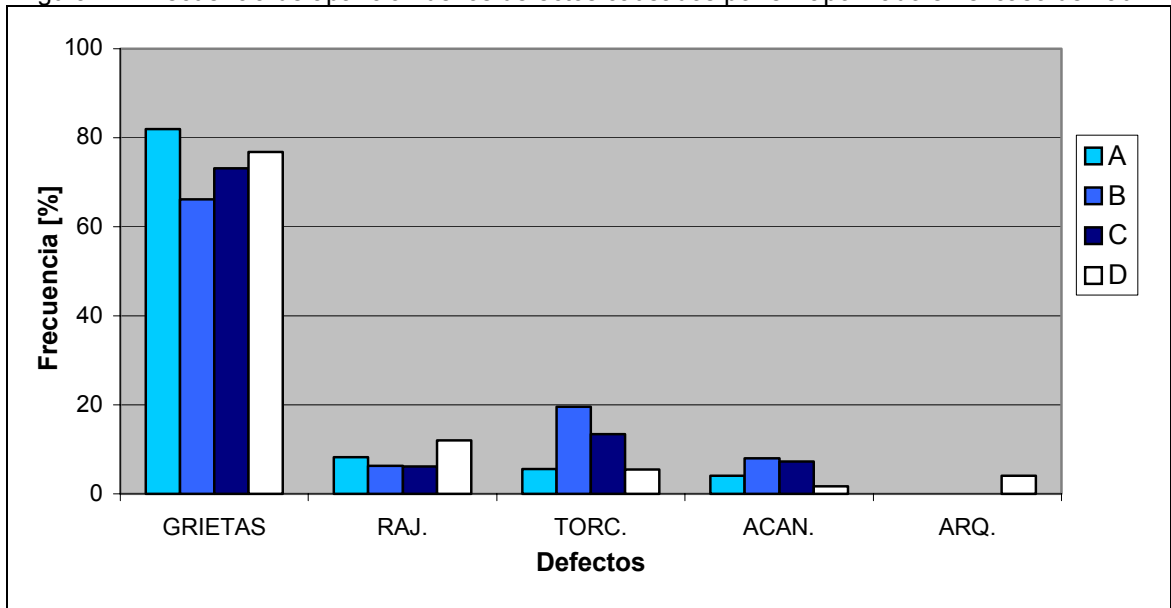
Cuadro 18. Tabla resumen con los análisis de varianza para un experimento con sólo un factor completamente aleatorio, independiente para cada defecto presente en las maderas vaporizadas.

Defectos	Fuente de Variación	gl ¹	SC ²	CM ³	F ⁴
Grietas	Tratamiento	3	19491,688	6497,2	3,6
	Error	12	21410,8	1784,2	
	Total	15	40902,4		
Rajaduras	Tratamiento	3	550,6875	183,6	3,0
	Error	12	733,8	61,1	
	Total	15	1284,4		
Torceduras	Tratamiento	3	20,5	6,8	0,9
	Error	12	89,5	7,5	
	Total	15	110,0		
Acanaladura	Tratamiento	3	10,25	3,4	1,0
	Error	12	41,5	3,5	
	Total	15	51,8		
Arqueadura	Tratamiento	3	151,1875	50,4	12,7
	Error	12	47,8	4,0	
	Total	15	198,9		

¹ Grados de libertad; ² Suma de cuadrados; ³ Cuadrado medio; ⁴ Distribución F

Para todos los defectos presentes en la madera de raulí vaporizada se acepta la hipótesis nula de que no existe ningún efecto debido a los tratamientos de vaporizado, dado que el F calculado es menor que el F de tabla ($f_{0,99; 3,12} = 5,95$). En relación con lo anterior, existe una razón para creer que parte de la aparición del promedio de los defectos en la madera de raulí son iguales para los cuatro niveles de presión. Excepto para el caso de las arqueaduras, donde el F calculado es mayor al de tabla ($f = 12,7$ (calculado) $> f_{0,99; 3,12} = 5,95$ (tabla)), por lo que se rechaza la hipótesis nula de que no existe ningún efecto debido a los tratamientos. Con respecto a lo anterior, existe una razón para creer que parte de la aparición promedio de arqueaduras en la madera son distintos para los cuatro niveles de presión. Este comportamiento se puede apreciar en la figura 24.

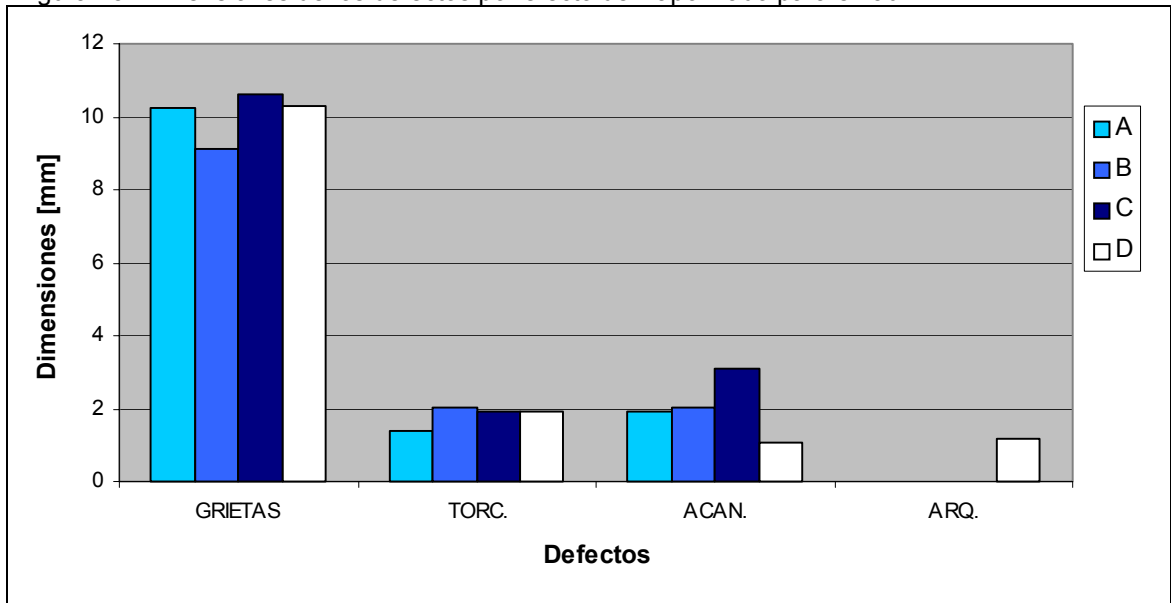
Figura 24. Frecuencia de aparición de los defectos causados por el vaporizado en el caso del raulí.



En la figura 24 se aprecia claramente que la mayoría de los defectos que presentan las maderas luego de vaporizadas no dependen de la presiones de trabajo, esto debido al comportamiento similar que existe entre la aparición del defecto y los tratamientos aplicados, excepto para el caso de la arqueadura. Esto se debe a que este defecto, en el único tratamiento que se presenta es en el tratamiento a presión atmosférica. Este comportamiento se podría atribuir a las características de la materia prima utilizada para los ensayos, como por ejemplo el tipo de corte (floreado y cuarteado).

Otro aspecto importante a considerar es la dimensión de los defectos producidos por el vaporizado. En la figura 25 se muestran las dimensiones de los defectos presentes en el raulí.

Figura 25. Dimensiones de los defectos por efecto del vaporizado para el raulí.



En la figura 25 se puede apreciar que las grietas son el defecto que presenta las mayores dimensiones (promedio de los cuatro tratamientos) con un valor de 10,05 mm, luego las acanaladuras con 2 mm y las torceduras con 1,82 mm. En el caso de las arqueaduras se presentan sólo en el tratamiento a presión atmosférica y tiene 1,2 mm de dimensión promedio.

5.3.2 Roble

En el cuadro 19 se muestra una tabla con los resultados obtenidos en el análisis de varianza efectuado para las piezas de roble para todos los defectos presentes en las maderas vaporizadas.

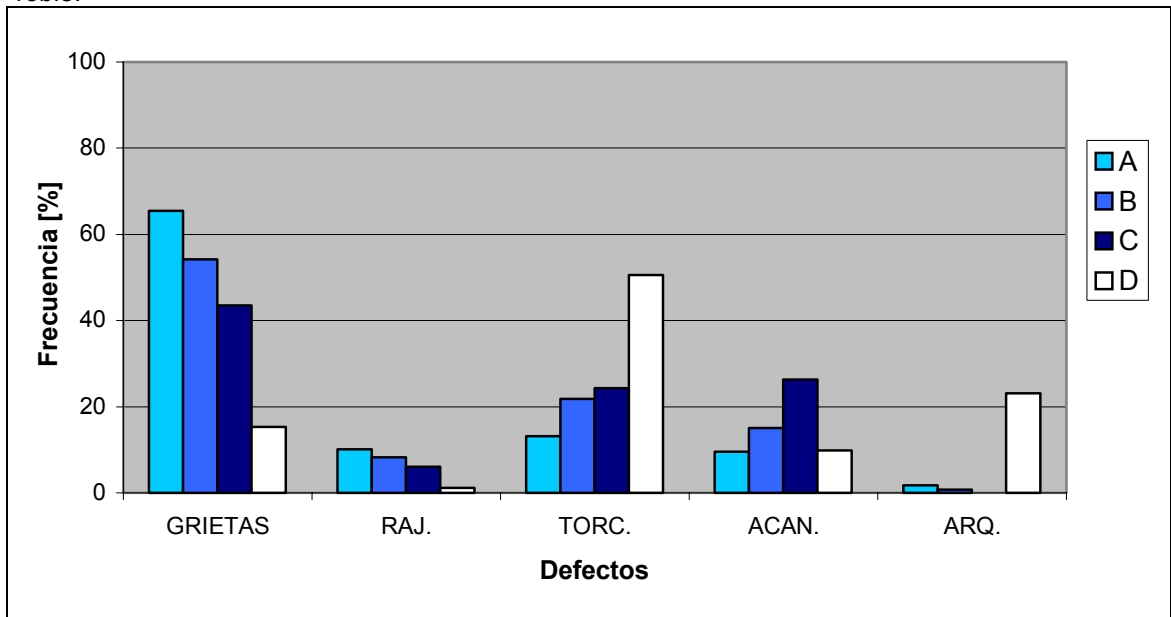
Cuadro 19. Tabla resumen con el análisis de varianza para un experimento con sólo un factor completamente aleatorio, para cada defecto presente en las maderas vaporizadas.

Defectos	Fuente de Variación	gl¹	SC²	CM³	F⁴
Grietas	Tratamiento	3	7420	2473,3	11,3
	Error	12	2623,9	218,7	
	Total	15	10043,9		$f_{0,99; 3,12} = 5,95$
Rajaduras	Tratamiento	3	172,4	57,5	3,7
	Error	12	185,5	15,5	
	Total	15	357,9		$f_{0,99; 3,12} = 5,95$
Torceduras	Tratamiento	3	39,6875	13,2	2,5
	Error	12	62,8	5,2	
	Total	15	102,4		$f_{0,99; 3,12} = 5,95$
Acanaladura	Tratamiento	3	39,6875	13,2	2,5
	Error	12	62,8	5,2	
	Total	15	102,4		$f_{0,99; 3,12} = 5,95$
Arqueadura	Tratamiento	3	104,25	34,8	119,1
	Error	12	3,5	0,3	
	Total	15	107,8		$f_{0,99; 3,12} = 5,95$

¹ Grados de libertad; ² Suma de cuadrados; ³ Cuadrado medio; ⁴ Distribución F

Para las rajaduras, torceduras y acanaladuras presentes en la madera de roble vaporizada se acepta la hipótesis nula de que no existe ningún efecto debido a los tratamientos de vaporizado, dado que el F calculado es menor que el F de tabla ($f_{0,99; 3,12} = 5,95$). En relación con lo anterior, existe una razón para creer que parte de la aparición del promedio de estos defectos en la madera de roble son iguales para los cuatro niveles de presión. Distinto es el caso para las grietas y arqueaduras, donde el F calculado es mayor al de tabla ($f_{0,99; 3,12} = 5,95$), por lo que se rechaza la hipótesis nula de que no existe ningún efecto debido a los tratamientos. Con respecto a esto, existe una razón para creer que parte de la aparición promedio de las grietas y arqueaduras en la madera son distintos para los cuatro niveles de presión. Este comportamiento se puede apreciar en la figura 26.

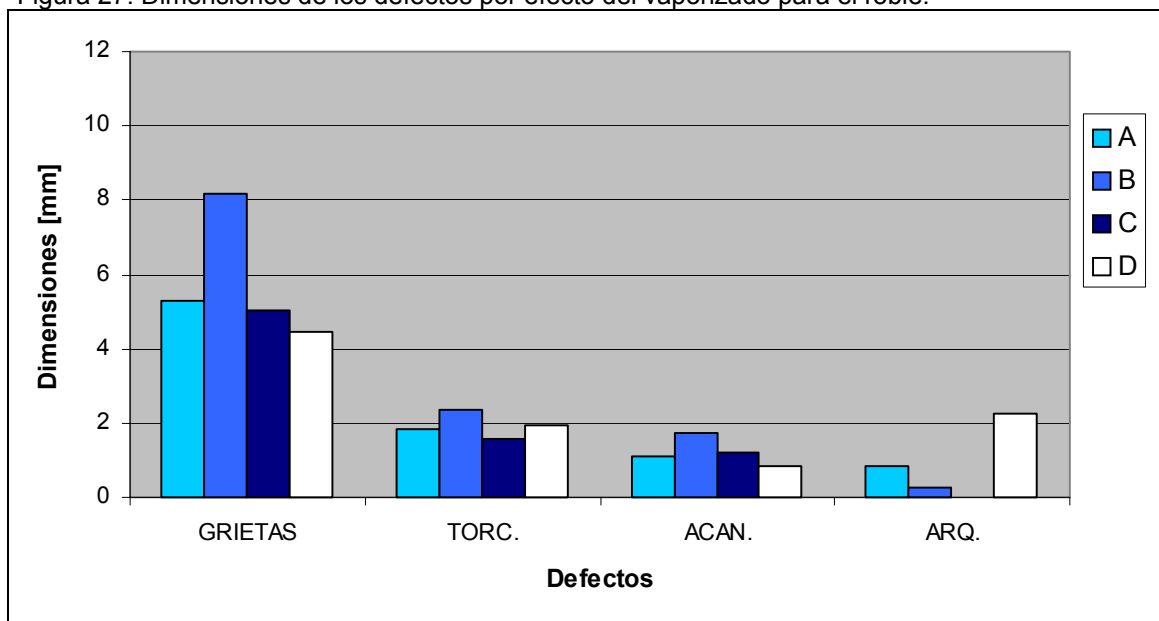
Figura 26. Frecuencia de aparición de los defectos causados por el vaporizado en el caso del roble.



En el caso del roble, los defectos que dependen de los niveles de presión son las grietas y arqueaduras, como se puede apreciar en la figura 26, donde el comportamiento entre la frecuencia de aparición del defecto y los tratamientos aplicados es singular, para cada presión aplicada. En el caso de las grietas, en los tratamientos con presiones sobre la atmosférica al aumentar el nivel de presión, la frecuencia de aparición de este defecto disminuye y para el caso de las arqueaduras el tratamiento a presión atmosférica es el que presenta mayor frecuencia de aparición. En cambio los otros defectos (rajaduras, torceduras y acanaladuras) tienen un comportamiento similar en los distintos niveles de presión.

Otro aspecto importante a considerar es la dimensión de los defectos producidos por el vaporizado. En la figura 27 se muestran las dimensiones de los defectos presentes en el roble.

Figura 27. Dimensiones de los defectos por efecto del vaporizado para el roble.



En la figura 27 se puede apreciar que las torceduras son el defecto que presenta las mayores dimensiones (promedio de los cuatro tratamientos) con un valor de 1,93 mm, luego las acanaladuras con 1,2 mm. En el caso de las grietas, la dimensión promedio de los tratamientos A, C y D es de 4,96 mm y para el tratamiento B es de 8,2 mm. y para el caso de las arqueaduras en el tratamiento a presión atmosférica tiene una dimensión promedio de 2,2 mm y para los tratamientos A y B tienen en promedio 0,6 mm de dimensión.

Con respecto a las dimensiones de los defectos presentes en las piezas vaporizadas, éstas no son relevantes en ninguna de las dos especies estudiadas, siendo mayores las dimensiones de los defectos presentes en la madera vaporizada de raulí.

Para el caso de las rajaduras y considerando la importancia de este defecto que desclasifica (rechaza) las piezas que la presentan, se realizó un cuadro independiente con las dimensiones presentes de este defecto en los distintos tratamientos, para las especies estudiadas (cuadro 20).

Cuadro 20. Dimensiones de las rajaduras para el raulí y roble.

Especie	Tratamiento	Dimensiones [mm]
Raulí	A	e=16,16 L=34,93
	B	e=21,83 L=58,23
	C	e=21,73 L=22,7
	D	e=19,77 L=27,3
Roble	A	e=16,15 L=16,36
	B	e=13,37 L=36,6
	C	e=124,5 L=78,6
	D	e=4 L=12

Como se puede apreciar en el cuadro 20 las dimensiones de las rajaduras para las dos especies estudiadas tienen un comportamiento singular, no se observa una clara relación entre el aumento de los niveles de presión y el aumento de las dimensiones de las rajaduras. No siendo muy importante las dimensiones presentes en las piezas, debido a que todas las piezas con rajaduras son consideradas como material de rechazo.

El único defecto presente en la madera vaporizada que es problemático a cualquier dimensión es la rajadura, debido a que las piezas que lo presentan se rechazan como materia prima para productos de madera de cualquier calidad. Por lo tanto, las piezas con rajaduras corresponden a material defectuoso. Por esta razón, se presenta en el cuadro 21 el porcentaje de madera sin rajaduras.

Cuadro 21. Porcentaje de madera sin rajaduras para raulí y roble, después de ser vaporizadas.

Especies	% sin rajaduras	% sin rajaduras considerando sólo la madera sin médula
Raulí	51,8	60,4
Roble	85,3	91,8

Del cuadro 21 se puede afirmar que el 48,2 % del total de las piezas de raulí representan a las pérdidas del proceso de vaporizado y las pérdidas del proceso para el caso del roble corresponderían a sólo un 14,7 %. Estos porcentajes disminuyen al considerar para el calculo de las piezas sólo piezas sin médula, para el caso del raulí la disminución es cercana al 10 % y para el caso del roble la disminución es alrededor del 5 %. Conectando esto con el análisis estadístico, se puede afirmar que los niveles de presión por sí solos no determinan la aparición de las rajaduras, sino que es el vaporizado en conjunto con las características de la madera (corte, presencia de médula, nudos, etc.) las que son responsables de los defectos presentes en la madera vaporizada como también la inadecuada manipulación de las piezas después del tratamiento.

En este estudio, y por razones de tiempo, no se tomaron los necesarios resguardos para evitar la aparición de defectos después del vaporizado, entre los que se cuentan el esperar que la temperatura de las piezas de madera disminuya paulatinamente antes de manipularlas. Esta puede ser una de las causas de los defectos detectados en la madera vaporizada, y de que sus dimensiones o frecuencias de aparición estén sobreestimadas.

Respecto a este tema, Brauner y Conway (1964) recomiendan dejar la madera dentro de la cámara de vaporizado para que se enfríe suavemente o, si se descarga, debería ser cubierta inmediatamente con lona para guardar el calor y bajar suavemente el índice de secado. Un rápido enfriamiento de la madera caliente puede causar grietas, rajaduras y alabeos.

6. CONCLUSIONES

- El grado de cambio de color de la madera está sujeto a las condiciones de vaporizado, presión y tiempo de exposición.
- Las intensidades de color predefinidas como moderada y exigente se obtienen a menores tiempos de vaporizado a medida que la presión de trabajo aumenta. Para el raulí los tiempos son menores que para el roble.
- La velocidad de coloración se incrementa al aumentar la presión. El comportamiento de esta velocidad es brusco entre el tratamiento sin presión (Pa) y los tratamientos con presión sobre la atmosférica. Entre éstos últimos, la diferencia de comportamiento sobre 1,0 [kg/cm²] de presión no es significativo.
- Con la exposición de la madera al vaporizado a cualquier nivel de presión, la velocidad de la coloración es rápida y brusca en las primeras horas de tratamiento. Este comportamiento es similar para las dos especies de renovals estudiadas.
- Al vaporizar la madera el contenido de humedad disminuye paulatinamente en el tiempo, alcanzando contenidos de humedad finales cercanos a los 45%, con un promedio de contenido de humedad inicial de un 80,2%, para todos los tratamientos y en ambas especies estudiadas. Esta reducción del contenido de humedad de la madera contribuye a disminuir drásticamente los tiempos de secado.
- Los defectos son producto de las características de la madera y del vaporizado en conjunto, y su aparición no depende del nivel de presión aplicado. En el caso del raulí, considerando sólo madera sin médula, las pérdidas por rajaduras son cercanas al 40%, y para el roble son cercanas a un 10%. Un rápido enfriamiento de la madera caliente causa grietas, rajaduras y alabeos.
- El oscurecimiento de la madera de renoval de raulí y roble en su espesor, ancho y largo es homogéneo a cualquier presión de trabajo y a cualquier tiempo de exposición.

7. RECOMENDACIONES

- Para disminuir los defectos se aconseja que la carga vaporizada se enfríe suavemente dentro de la cámara de vaporizado o autoclave, y si es descargada, sea cubierta inmediatamente con una lona para guardar el calor y disminuir suavemente el índice de secado.
- Es conveniente hacer determinaciones químicas de la madera de renoval de raulí y roble previo al vaporizado para conocer los porcentajes de extraíbles y el tipo de éstos, debido a la influencia que tiene en el cambio de color.

8. 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.
- ALESSANDRINI, M. y VARGAS, J. 2002. Biopreservantes de maderas basados en taninos y otros extractivos de la corteza de pino y su acción antioxidante: antecedentes y perspectivas [en línea].
<<http://www.monografias.com/trabajos15/preserv-madera/preserv-maderas.html>> [consulta: 12 julio 2004].
- ANANÍAS, R; HALUK, J. y MOUGEL, E. 2001. Discoloration du hêtre *Fagus sylvatica* lors d'un séchage convectif basse température. *Les Cahiers Scientifiques du Bois* 2 : pp 15 –30.
- ARRIAGADA, I; ERICES, E. y RODRÍGUEZ, E. 2000. Caracterización química de los compuestos presentes en madera y corteza de *Nothofagus dombeyi*. *Gayana botánica* 57: pp 43.
- BAEZA, M. 1999. Pulpa kraft en madera de renoval y desechos de aserradero de raulí *Nothofagus alpina* (Poepp. et Endl.) Oerst., crecida en la zona de Neltume, Xª región – Chile. Tesis Ing. Forestal. Universidad Austral. Valdivia, Chile. 66 p.
- BARRÍA, C. 2000. Efecto del vaporizado en el secado artificial de madera de Coigüe de Magallanes. Tesis Ing. Forestal. Universidad Austral. Valdivia, Chile. 59 p.
- BASES CONCEPTUALES PARA EL MANEJO SUSTENTABLE DE BOSQUE NATIVO. 1998. [en línea].
<http://www.acepweb.org.ar/_documentos/Bases%20conceptuales%20Ley%20B N.doc> [consulta: 12 julio 2004].
- BRAZIER, J. y FRANKLIN, G. 1961. Identification of hardwoods a microscope key. *Forest products research* 46: pp 36.
- BEKHTA, P. y NIEMZ, P. 2003. Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood. *Holzforchung* 57(5): pp 539–546.
- BIRD, B; STEWART, W. y LIGHTFOOT, E. 1975. Fenómenos de transporte. Reverté.
- BRAUNER, A. y CONWAY, E. 1964. Steaming walnut for color. *Forest products journal* 14(11): pp 525–527.
- BURTIN, P; CHARPENTIER, J. y JAY – ALLEMAND, C. 1998. Hydrojuglone – β – D – glucopyranoside (HJG): a major precursor of walnut wood colour. 2nd International electric conference on synthetic organic chemistry [en línea].
<<http://www.mdpi.org/ecsoc/>> [consulta: 28 junio 2004].

- CAMPOS, A; CUBILLOS G; MORALES, F. y PASTENE, A. 1990. Propiedades y usos de especies madereras de corta rotación. Informe técnico n° 122. INFOR/CORFO. Santiago, Chile. 104 p.
- CAMELIO, M; FREITTE, G; LOEWE, V; LÓPEZ, C; MERY, M; TORAL, M. y URQUIETA, E. 1998. Monografía del Raulí. CONAF – FIA - INFOR. Santiago, Chile. 91 p.
- CAMELIO, M; LÓPEZ, C; LOEWE, V; MERY, M; TORAL, M. y URQUIETA, E. 1998. Monografía del Roble. CONAF - FIA - INFOR. Santiago, Chile. 90 p.
- CANAVOS, G. 1995. Probabilidad y estadística. M^C Graw Hill. 651 p.
- CARABIAS, R. y KARSULOVIC, J. 1978. Densidad y propiedades mecánicas de madera de renovales de raulí. Boletín Técnico n° 51. Fac. de Cs. Forestales. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 36 p.
- CHEN, P. y 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. y TROUGHTON, G. 1973. Heat – induced color – intensity change in coastal Douglas – Fir and White Spruce. Wood and fiber 4: pp 259–263.
- CORFO – FONTEC – FORESTAL RUSSFIN LTDA. 1999. Investigación para el desarrollo de una planta prototipo que permita homogeneizar el color de la madera nativa de Lenga. Chile.
- DAVIS, W. y THOMPSON, W. 1964. Influence of thermal treatments of short duration on the toughness and chemical composition of wood. Forest products journal 14(7): pp 350–356.
- DIAZ – VAZ, E. 1987. Anatomía de la madera de *Nothofagus alpina* (P. et. E) Oerst. Bosque 8 (2): pp 143–145.
- DIAZ – VAZ, E. 2003. Anatomía de maderas. Universidad Austral. Valdivia, Chile. 151 p.
- DONOSO, C. 1972. Análisis taxonómico y de distribución de las especies caducifolias del género *Nothofagus* en la zona central de Chile. Tesis Ing. Forestal. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 179 p.
- DONOSO, C. 1978. La silvicultura del género *Nothofagus* en Chile. Depto. de Silvicultura y Conservación. Universidad de California. Berkeley. Col. USA. 102 p.
- DONOSO, C. 1981. Tipos forestales de los bosques nativos de Chile. Documento de trabajo n°38. CONAF/PNUD/FAO. Santiago, Chile. 70 p.
- DONOSO, C. 1988. Los renovales de Chile. Corma 205(2): pp 15.
- DONOSO, C. y LANDRUM, L. 1973. Manual de identificación de especies leñosas del bosque húmedo de Chile. CONAF. Santiago, Chile. 168 p.

- FORESTAL MININCO – FORESTAL RÍO VERGARA – CORFO. 1994. Aprovechamiento industrial de la madera proveniente del manejo de renovales. Valdivia, Chile. 215p.
- GORISEK, Z; OVEN, P; STRAZE, A. y ZUPANCIC, M. 2003. Colour changes of Ash – wood (*Fraxinus excelsior* L.) during conventional drying. 8th International IUFRO Wood drying conference. 465–469 p.
- GROSSE, H. 1989. Antecedentes para el manejo de renovales de raulí. *Corma* 206: pp 16–19.
- HASLETT, A; KREBER, B. y M^C DONALD, A. 1999. Kiln brown stain in radiata pine: A short review on cause and methods for prevention. *Forest products journal* 49(1): pp 57–62.
- HASLETT, A; KREBER, B. y M^C DONALD, A. 1999. Use of sodium dithionite for controlling kiln brown stain development in radiata pine sapwood. *Forest products journal* 49(4): pp. 66 – 70.
- HILDEBRAND, R. 1970. Kiln drying of sawn timber. Robert Hildebrand. 200 p.
- HOFFMANN, A. 1982. Flora silvestre de Chile. Zona Austral. Una guía ilustrada para la identificación de las plantas leñosas del sur de Chile. Santiago, Chile. Fundación Claudio Gay. 258 p.
- INFOR. 2003. Estadísticas 2002 – 2003 [en línea]. <<http://www.infor.cl/>> [consulta: 12 julio 2004].
- INN. NCh 992. Madera. Defectos a considerar en la clasificación, terminología y métodos de medición.
- KLOCK, U. 2004. Componentes acidentais da madeira [en línea]. <[http://www.madeira.ufpr.br/UmbertoKlock/quimica/notasdeaula/COMPONENTE S%20ACIDENTAIS%20DA%20MADEIRA.htm](http://www.madeira.ufpr.br/UmbertoKlock/quimica/notasdeaula/COMPONENTE%20ACIDENTAIS%20DA%20MADEIRA.htm)> [consulta: 12 julio 2004].
- KREBER, B. y BYRNE, A. 1994. Discolorations of hem – fir wood: a review of the mechanisms. *Forest products journal* 44 (5): pp 35–41.
- KOLLMANN, F. 1959. Tecnología de la madera y sus aplicaciones, Tomo I. Gráficas reunidas S.A. 675 p.
- MANSILLA, H; GARCÍA, R; TAPIA, J; DURÁN, H. y URZÚA, S. 1991. Chemical characterization of Chilean hardwoods. *Wood Science and Technology* 25: pp145–149.
- M^C DONALD, A; FERNANDEZ M; KREBER B. y LAYTNER F. 2000. The chemical nature of kiln brown stain in radiata pine. *Holzforschung* 54 (1): pp 12–22.
- M^C GINNES, E. y 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.

- ORTIZ, P. 1999. Árboles nativos chilenos y la madera de sus renovales. Tesis Ing. Forestal. Universidad de Concepción. Concepción, Chile. 252 p.
- PEREZ, V. 1983. Manual de propiedades físicas y mecánicas de maderas chilenas. Documento de trabajo n° 47. CONAF/PNUD/FAO. Santiago, Chile. 451 p.
- POBLETE, H. y ZÁRATE, M. 1986. Influencia de los extraíbles sobre las propiedades de la madera y su utilización como materia prima. Publicación docente n° 20. Valdivia, Chile.
- RODRÍGUEZ, J. 2002. Intercambio de calor por conducción [en línea].
<<http://www.modeladoingenieria.edu.ar/libros/termodinamica/capitulos/t14.pdf>> [consulta: 9 junio 2004].
- RODRÍGUEZ, R; MATTHEI, O. y QUEZADA, M. 1983. Flora arbórea de Chile. Ediciones de la Universidad de Concepción. Concepción, Chile. 404 p.
- 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.
- SILVA, R. 2002. Obtención de enzimas ligninolíticas producidas por hongos basidiomicetos. Evaluación de su aplicación al blanqueo de pastas de madera. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. 211 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.
- SJÖSTRÖM, E. 1981. Wood chemistry. Academic Press, Inc. 223 p.
- TAJAN, P. 1989. Crecimiento y resistencia a la sequía de 8 procedencias de Raulí, durante el segundo período vegetativo en Valdivia. Tesis Ing. Forestal. Universidad Austral. Valdivia, Chile. 52 p.
- TORRES, H. 1971. Maderas. Corporación Chilena de la madera. Santiago, Chile. 261 p.
- URIBE, C. 1996. Silvicultura de roble (*Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst.) y raulí (*Nothofagus alpina* (Poepp. Et Endl.) Oerst.): Una revisión bibliográfica con énfasis en los renovales formados por estas especies. Tesis Ing. Forestal. Universidad de Concepción. Concepción, Chile. 121 p.
- VON DESSAUER, G. 1972. Desarrollo cronológico de las proporciones de albura y duramen en raulí. Tesis Ing. Forestal. Universidad Austral. Valdivia, Chile. 61 p.
- WÄDSON, LARS. 1994. Unsteady – state water adsorption in wood: an experimental study. Wood and fiber science 26 (1): pp 36–49.

9. APÉNDICES

9.1 Tablas de contingencia

9.1.1 Color respecto a los tratamientos para el roble.

Tabla de contingencia con las frecuencias observadas, esperadas y el valor de la estadística de los colores obtenidos en el transcurso de cada tratamiento.

		Tratamientos de vaporizado				TOTAL					
		Roble	A (0,5 [Kg/cm ²])	B (1,0 [Kg/cm ²])	C (1,5 [Kg/cm ²])			D (Pa)			
C o l o r	1	20 ¹	17,44 ²	13	16,90	14	17,44	17	12,22	64	64,0
			0,38 ³		0,90		0,68		1,87		3,82
	2	40	39,51	41	38,29	35	39,51	29	27,70	145	145
			0,11		0,19		0,51		0,06		0,77
	3	34	35,97	39	34,85	41	35,97	18	25,21	132	132
			0,11		0,49		0,70		2,06		3,37
	4	3	4,09	1	3,96	7	4,09	4	2,87	15	15,0
			0,29		2,21		2,08		0,45		5,03
	TOTAL	97	97	94	94	97	97	68	68	356	356
			0,78		3,80		3,97		4,44		12,99

¹ Frecuencia observada; ² Frecuencia esperada; ³ Valor de la estadística

En el caso del roble se acepta la hipótesis nula con un grado de confianza de un 95% y un valor crítico de $X_{0,95; 9} = 16,93$ (valor tabla), éste valor es mayor que el calculado, $X = 12,99$. De acuerdo con esto, existe una razón para pensar que los tratamientos aplicados a las maderas y las intensidades de color obtenidas durante el tratamiento, son independientes.

9.2 Color versus el tiempo de vaporizado

9.2.1 Vaporizado A

Tabla de contingencia con las frecuencias observadas, esperadas y el valor de la estadística de los colores obtenidos en el transcurso del tratamiento A, para el roble.

		Color				TOTAL		
		1	2	3	4			
Δ T i e m p o	Roble							
	3 h (1C)	5 ¹	1,65 ² 3,75	3,87 0,0	0,75 2,34	3,68 0,29	0 0,0	9 11,0
	6 h (2C)	3	1,74 4,75	4,07 0,11	2,25 0,68	3,88 0,34	0 0,0	11,75 5,71
	9 h (3C)	1,75	1,92 6	4,48 0,52	3,25 0,24	4,26 0,0	0 0,0	12 2,60
	12 h (4C)	1,25	2,05 6,5	4,79 0,61	4 0,07	4,55 0,36	0 0,0	12 0,78
	15 h (5C)	1,25	2,05 6	4,79 0,31	3,75 0,14	4,55 0,41	0,75 0,36	10,75 1,60
	18 h (6C)	1	1,96 5	4,58 0,04	5,25 0,18	4,36 0,35	0 0,35	12 3,55
	21 h (7C)	1,25	2,05 2	4,79 1,62	7,25 1,59	4,55 2,17	1,25 0,37	12 2,37
	24 h (8C)	1	2,09 2,25	4,89 1,42	8 2,41	4,65 0,39	0,75 0,39	12 7,35
	TOTAL	15,5	15,50 9,66	36,25 4,64	34,50 7,65	34,50 2,75	2,75 3,31	89 25,26

¹ Frecuencia observada; ² Frecuencia esperada; ³ Valor de la estadística

En el caso del roble se acepta la hipótesis nula con un grado de confianza de un 95% y un valor crítico de $X_{0,95; 21} = 32,68$ (valor tabla), éste valor es mayor que el obtenido, $X = 25,26$. De acuerdo a lo anterior, existe una razón para creer que las intensidades de color obtenidas con respecto al tratamiento y a los tiempos en que se realizaron los cortes en el transcurso del vaporizado, son independientes. En la figura 11 se grafican las frecuencias de aparición de los colores versus los tiempos en que se realizaron los cortes durante el vaporizado.

9.2.2 Vaporizado B

Tabla de contingencia con las frecuencias observadas, esperadas y el valor de la estadística de los colores obtenidos en el transcurso del tratamiento B, para el raulí.

		Color					
Raulí		1	2	3	4	TOTAL	
Δ T i e m p o	2 h (1 C)	6 ¹ 0,96 ² 26,48 ³	4 3,37 0,12	0 4,52 4,52	0 1,15 0,0	10 10,0 31,04	
	4 h (2 C)	2 0,87 1,49	4 3,03 0,31	3 4,07 0,28	0 1,04 0,0	9 9,0 2,08	
	6 h (3 C)	1 1,15 0,02	6 4,04 0,95	5 5,42 0,03	0 1,38 0,0	12 12,0 1,01	
	8 h (4 C)	1 1,44 0,14	7 5,05 0,75	6 6,78 0,09	1 1,73 0,0	15 15,0 0,98	
	10 h (5 C)	0 1,35 1,35	5 4,71 0,02	8 6,33 0,44	1 1,62 0,0	14 14,0 1,81	
	12 h (6 C)	0 1,44 1,44	3 5,05 0,83	9 6,78 0,73	3 1,73 0,0	15 15,0 3,0	
	14 h (7 C)	0 1,44 1,44	4 5,05 0,22	8 6,78 0,22	3 1,73 0,0	15 15,0 1,88	
	16 h (8 C)	0 1,35 1,35	2 4,71 1,56	8 6,33 0,44	4 1,62 0,0	14 14,0 3,35	
	TOTAL	10 10,0 33,62	35 35 4,77	47 47 6,75	12 12,0 0,0	104 104 45,14	

¹ Frecuencia observada; ² Frecuencia esperada; ³ Valor de la estadística

En el tratamiento B para el raulí (cuadro 17) se rechaza la hipótesis nula con un grado de confianza de un 95% y un valor crítico de $X_{0,95; 21} = 32,68$ (valor tabla), éste valor es menor que el obtenido, $X = 45,14$. De acuerdo a lo anterior, existe una razón para creer que las intensidades de color obtenidas con respecto al tratamiento y a los tiempos en que se realizaron los cortes en el transcurso del vaporizado, no son independientes. Esta dependencia se puede apreciar en la figura 12 para el raulí.

Tabla de contingencia con las frecuencias observadas, esperadas y el valor de la estadística de los colores obtenidos en el transcurso del tratamiento B, para el roble.

		Color				TOTAL					
		1	2	3	4						
Δ T i e m p o	Roble										
	2 h (1C)	3 ¹	0,73 ² 7,13 ³	3	2,64 0,05	0	2,57 2,57	0	0,07 0,0	6,0	6,0 9,76
	4 h (2C)	6	1,45 14,27	5	5,27 0,01	1	5,14 3,34	0	0,13 0,0	12	12,0 17,62
	6 h (3C)	2	1,45 0,21	8	5,27 1,41	2	5,14 1,92	0	0,13 0,0	12	12,0 3,54
	8 h (4C)	0	1,45 1,45	9	5,27 2,63	3	5,14 0,89	1	0,13 0,0	12	12,0 4,97
	10 h (5C)	0	1,45 1,45	6	5,27 0,10	6	5,14 0,14	0	0,63 0,13	12	12,0 1,83
	12 h (6C)	0	1,45 1,45	4	5,27 0,31	8	5,14 1,59	0	0,13 0,13	12	12,0 3,48
	14 h (7C)	0	1,57 1,57	4	5,71 0,51	9	5,57 2,11	0	0,14 0,14	13	13,0 4,34
	16 h (8C)	0	1,45 1,45	1	5,27 3,46	10	5,14 4,59	1	0,13 5,72	12	12,0 15,22
	TOTAL	11	11,0 28,98	40	40 8,49	39	39 17,15	1	1,0 6,12	91	91 60,75

¹ Frecuencia observada; ² Frecuencia esperada; ³ Valor de la estadística

En el tratamiento B para el roble (cuadro 18) se rechaza la hipótesis nula con un grado de confianza de un 95% y un valor crítico de $X_{0,95; 21} = 32,68$ (valor tabla), éste valor es menor que el obtenido, $X = 60,75$. De acuerdo a lo anterior, existe una razón para creer que las intensidades de color obtenidas con respecto al tratamiento y a los tiempos en que se realizaron los cortes en el transcurso del vaporizado, no son independientes. Esta dependencia se puede apreciar en la figura 13 para el roble.

9.2.3 Vaporizado C

Tabla de contingencia con las frecuencias observadas, esperadas y el valor de la estadística de los colores obtenidos en el transcurso del tratamiento C, para el raulí.

		Color				TOTAL					
		1	2	3	4						
Δ T i e m p o	Raulí										
	1 h (1C)	4 ¹	0,9 ² 10,66 ³	6	3,73 1,38	3	7,21 2,46	0	1,16 0,0	13	13,0 14,49
	2 h (2C)	2	0,90 1,34	7	3,73 2,86	4	7,21 1,43	0	1,16 0,0	13	13,0 5,63
	3 h (3C)	0	0,83 0,83	6	3,45 1,89	5	6,65 0,41	1	1,07 0,0	12	12,0 0,99
	4 h (4C)	0	0,83 0,83	4	3,45 0,09	6	6,65 0,06	2	1,07 0,0	12	12,0 0,99
	5 h (5C)	0	0,83 0,83	1	3,45 1,74	10	6,65 1,68	1	1,07 0,0	14	14,0 4,25
	6 h (6C)	1	0,9 0,01	2	3,73 0,8	9	7,21 0,45	1	1,16 0,0	13	13,0 1,26
	7 h (7C)	0	0,9 0,9	2	3,73 0,8	10	7,21 1,08	1	1,16 0,0	13	13,0 3,35
	8 h (8C)	0	0,9 0,9	1	3,73 2,0	9	7,21 0,45	3	1,16 0,0	13	13,0 3,35
	TOTAL	7	7,0 16,31	29	29 11,57	56	56 8,02	9	9,0 0,0	101	101 35,89

¹ Frecuencia observada; ² Frecuencia esperada; ³ Valor de la estadística

En el tratamiento C para la especie raulí (cuadro 20) se rechaza la hipótesis nula con un grado de confianza de un 95% y un valor crítico de $X_{0,95; 21} = 32,68$ (valor tabla), éste valor es menor que el obtenido, $X = 35,89$. De acuerdo a lo anterior, existe una razón para creer que las intensidades de color obtenidas con respecto al tratamiento y a los tiempos en que se realizaron los cortes en el transcurso del vaporizado, son dependientes. Esto se puede apreciar en la figura 14 para el raulí.

Tabla de contingencia con las frecuencias observadas, esperadas y el valor de la estadística de los colores obtenidos en el transcurso del tratamiento C, para el roble.

		Color				TOTAL
	Roble	1	2	3	4	
Δ T i e m p o	1 h (1C)	4 ¹ 0,89 ² 10,80 ³	2 2,53 0,11	1 3,05 1,38	0 0,52 0,0	7 7,0 12,29
	2 h (2C)	6 1,53 13,03	4 4,34 0,03	2 5,23 2,0	0 0,89 0,0	12 12,0 15,06
	3 h (3C)	1 1,53 0,18	8 4,34 3,09	3 5,23 0,95	0 0,89 0,0	12 12,0 4,22
	4 h (4C)	1 1,66 0,26	8 4,7 2,31	4 5,67 0,49	0 0,97 0,0	13 13,0 3,07
	5 h (5C)	0 1,66 1,66	6 4,70 0,36	6 5,67 0,02	1 0,97 0,0	13 13,0 2,04
	6 h (6C)	0 1,66 1,66	3 4,70 0,62	8 5,67 0,96	2 0,97 1,10	13 13,0 4,33
	7 h (7 h)	0 1,53 1,53	2 4,34 1,26	8 5,23 1,46	2 0,89 1,37	12 12,0 5,63
	8 h (8 h)	0 1,53 1,53	1 4,34 2,57	9 5,23 2,71	2 0,89 1,37	12 12,0 8,18
	TOTAL	12 12,0 30,66	34 34 10,34	41 41 9,97	7 7,0 3,84	94 94 54,82

¹ Frecuencia observada; ² Frecuencia esperada; ³ Valor de la estadística

En el tratamiento C para el roble (cuadro 21) se rechaza la hipótesis nula con un grado de confianza de un 95% y un valor crítico de $X_{0,95; 21} = 32,68$ (valor tabla), éste valor es menor que el obtenido, $X = 54,82$. De acuerdo a lo anterior, existe una razón para creer que las intensidades de color obtenidas con respecto al tratamiento y a los tiempos en que se realizaron los cortes en el transcurso del vaporizado, son dependientes. Esto se puede apreciar en la figura 15 para el roble.

9.2.4 Vaporizado D

Tabla de contingencia con las frecuencias observadas, esperadas y el valor de la estadística de los colores obtenidos en el transcurso del tratamiento D, para el raulí.

		Color				
		1	2	3	4	TOTAL
Δ T i e m p o		0,33 ²	7,87	11,48	0,33	20
	24 h (1C)	1 ¹ 1,38 ³	10 0,58	9 0,53	0 0,33	20 2,82
	48 h (2C)	0 0,33	9 0,16	11 0,02	0 0,33	20 0,84
	72 h (3C)	0 0,34	5 8,26	15 12,05	1 0,34	21 1,9
	TOTAL	1 2,05	24 24,0	35 35	1 1,0	61 7,26

¹ Frecuencia observada; ² Frecuencia esperada; ³ Valor de la estadística

En el caso del raulí, dado que $X_{0,95; 6} = 12,6$ (valor tabla) $> X_{calculado} = 7,26$ se acepta la hipótesis nula con un grado de confianza de un 95 %. Con respecto a lo anterior, existe una razón para creer que las intensidades de color obtenidas con respecto al tratamiento y a los tiempos en que se realizaron los cortes en el transcurso del vaporizado, son independientes. En la figura 16 se grafica las intensidades de color versus las horas en las que se obtuvieron.

Tabla de contingencia con las frecuencias observadas, esperadas y el valor de la estadística de los colores obtenidos en el transcurso del tratamiento D, para el roble

		Color				
		1	2	3	4	TOTAL
Δ T i e m p o		4,19 ²	8,71	5,81	1,29	20
	24 h (1C)	9 ¹ 5,51 ³	9 0,01	2 2,5	0 1,29	20 9,30
	48 h (2C)	3 4,40	10 9,15	8 6,10	0 1,35	21 21,0
	72 h (3C)	1 4,40	8 9,15	8 6,10	4 1,35	21 21
	TOTAL	1 8,5	27 27,0	18 18	4 4,0	62 20,31

¹ Frecuencia observada; ² Frecuencia esperada; ³ Valor de la estadística

En el caso del roble se rechaza la hipótesis de independencia con un grado de confianza de un 95% y un valor crítico de $X_{0,95; 21} = 12,6$ (valor tabla). De acuerdo a lo anterior, existe una razón para creer que las intensidades de color obtenidas con respecto al tratamiento y a los tiempos en que se realizaron los cortes en el transcurso del vaporizado, no son independientes. Esta dependencia se puede apreciar en la figura 17.

9.3 Tablas resúmenes de frecuencia de coloración para cada tratamiento

9.3.1 Raulí

A - Raulí %	0 [h]	3 [h]	6 [h]	9 [h]	12 [h]	15 [h]	18 [h]	21 [h]	24 [h]
0	58,3	23,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	25,0	46,2	41,7	33,3	16,7	8,3	0,0	8,3	0,0
2	16,7	23,1	50,0	58,3	66,7	58,3	53,8	50,0	38,5
3	0,0	7,7	8,3	8,3	16,7	33,3	46,2	41,7	61,5
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

B – Raulí %	0 [h]	2 [h]	4 [h]	6 [h]	8 [h]	10 [h]	12 [h]	14 [h]	16 [h]
0	69,2	16,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	23,1	50,0	22,2	8,3	6,7	0,0	0,0	0,0	0,0
2	7,7	33,3	44,4	50,0	46,7	35,7	20,0	26,7	14,3
3	0,0	0,0	33,3	41,7	40,0	57,1	60,0	53,3	57,1
4	0,0	0,0	0,0	0,0	6,7	7,1	20,0	20,0	28,6

C - Raulí %	0 [h]	1 [h]	2 [h]	3 [h]	4 [h]	5 [h]	6 [h]	7 [h]	8 [h]
0	50,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	25,0	30,8	15,4	0,0	0,0	0,0	7,7	0,0	0,0
2	16,7	46,2	53,8	50,0	33,3	8,3	15,4	15,4	7,7
3	8,3	23,1	30,8	41,7	50,0	83,3	69,2	76,9	69,2
4	0,0	0,0	0,0	8,3	16,7	8,3	7,7	7,7	23,1

D-Raulí %	0 [h]	24 [h]	48 [h]	72 [h]
0	15	0	0	0
1	40	5	0	0
2	40	50	45	24
3	5	45	55	71
4	0	0	0	5

9.3.2 Roble

A - Roble %	0 [h]	3 [h]	6 [h]	9 [h]	12 [h]	15 [h]	18 [h]	21 [h]	24 [h]
0	33,3	23,1	16,7	8,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	41,7	38,5	25,0	16,7	8,3	8,3	9,1	9,1	8,3
2	25,0	30,8	41,7	50,0	58,3	50,0	45,5	18,2	16,7
3	0,0	7,7	16,7	25,0	33,3	33,3	45,5	63,6	66,7
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,3	0,0	9,1	8,3

B – Roble %	0 [h]	2 [h]	4 [h]	6 [h]	8 [h]	10 [h]	12 [h]	14 [h]	16 [h]
0	75,0	50,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	16,7	25,0	50,0	16,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	8,3	25,0	41,7	66,7	75,0	50,0	33,3	30,8	8,3
3	0,0	0,0	8,3	16,7	25,0	50,0	66,7	69,2	83,3
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,3

C - Roble %	0 [h]	1 [h]	2 [h]	3 [h]	4 [h]	5 [h]	6 [h]	7 [h]	8 [h]
0	76,9	46,2	7,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	15,4	30,8	46,2	8,3	7,7	0,0	0,0	0,0	0,0
2	7,7	15,4	30,8	66,7	61,5	46,2	23,1	16,7	8,3
3	0,0	7,7	15,4	25,0	30,8	46,2	61,5	66,7	75,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,7	15,4	16,7	16,7

D-Roble %	0 [h]	24 [h]	48 [h]	72 [h]
0	70	5	0	0
1	20	43	14	5
2	10	43	48	38
3	0	10	38	38
4	0	0	0	19

9.4 Tablas resúmenes de índice de decoloración (promedio de las cuatro repeticiones)

9.4.1 Raulí

Raulí	A	B	C	D
T	66,6	66,4	69,5	74,5
1C	72,2	74	77,6	80,2
2C	75,2	78,4	79,6	81,3
3C	76,5	79,4	81,3	82,4
4C	77,7	81,4	82,6	
5C	79,3	82,9	83,8	
6C	80,3	84,2	82,6	
7C	80,6	84,5	83,2	
8C	81,4	85,5	84,4	

9.4.2 Roble

Roble	A	B	C	D
T	71,2	61,3	61	65,4
1C	72,5	70,8	70,1	74,8
2C	75,4	75,4	75,3	79,4
3C	77,6	77,2	78,8	82,3
4C	79,3	79,4	79,8	
5C	80,2	80,9	81,9	
6C	82,5	82	82,8	
7C	81,7	82,5	83,6	
8C	82,3	84,2	84,4	

9.5 Tablas resúmenes de contenido de humedad para cada tratamiento y el promedio para cada especie

9.5.1 Raulí

Raulí	T	1C	2C	3C	4C	5C	6C	7C	8C
CH - A	56,5	47,1	44,4	40,5	38,1	38,6	34,9	35,2	34,78
CH - B	76,7	60,0	55,9	52,0	48,2	48,0	44,6	45,4	43,89
CH - C	87,3	59,2	51,8	51,1	50,7	49,4	45,8	45,7	44,04
CH - D	73,5	55,4	50,7	47,8					
PROM	73,50	55,41	50,69	47,85	45,65	45,34	41,76	42,11	40,90

9.5.2 Roble

Roble	T	1C	2C	3C	4C	5C	6C	7C	8C
CH - A	88,8	66,7	51,7	47,5	48,4	40,4	37,2	40,0	38,15
CH - B	78,7	61,5	56,7	55,0	53,9	52,1	49,4	45,8	47,56
CH - C	72,1	65,0	60,7	57,5	54,2	50,4	48,3	47,6	39,89
CH - D	108,2	94,1	91,5	85,4					
PROM	86,94	71,84	65,14	61,34	52,13	47,62	44,93	44,45	41,87

9.6 Tablas resúmenes de la frecuencia de aparición de los defectos producto del vaporizado

9.6.1 Raulí

Frecuencias "A"	GRIETAS	TORC.	ACAN.	ARQ.	RAJ.
1R	148	8	1	0	7
2R	131	6	5	0	22
3R	3	6	8	0	0
4R	96	6	5	0	9
TOTAL	378	26	19	0	38
Prom.	94,5	6,5	4,75	0	9,5

Frecuencias "B"	GRIETAS	TORC.	ACAN.	ARQ.	RAJ.
1R	24	10	2	0	3
2R	38	8	3	0	6
3R	34	10	6	0	3
4R	29	9	4	0	0
TOTAL	125	37	15	0	12
Prom.	31,25	9,25	3,75	0	3

Frecuencias "C"	GRIETAS	TORC.	ACAN.	ARQ.	RAJ.
1R	47	5	3	9	2
2R	30	8	5	6	8
3R	36	8	3	3	0
4R	29	5	3	8	2
TOTAL	142	26	14	26	12
Prom.	35,5	6,5	3,5	6,5	3

Frecuencias "D"	GRIETAS	TORC.	ACAN.	ARQ.	RAJ.
1R	159	8	2	9	29
2R	152	9	4	5	24
3R	54	1	1	2	2
4R	75	13	3	7	14
TOTAL	440	31	10	23	69
Prom.	110	7,75	2,5	5,75	17,25

9.6.2 Roble

Frecuencias "A"	GRIETAS	TORC.	ACAN.	ARQ.	RAJ.
1R	4	5	6	1	3
2R	98	5	6	0	20
3R	0	9	5	2	0
4R	48	11	5	1	0
TOTAL	150	30	22	4	23
Prom.	37,5	7,5	5,5	1	5,75

Frecuencias "B"	GRIETAS	TORC.	ACAN.	ARQ.	RAJ.
1R	21	9	3	1	2
2R	41	11	2	0	1
3R	2	4	9	0	3
4R	8	5	6	0	5
TOTAL	72	29	20	1	11
Prom.	18	7,25	5	0,25	2,75

Frecuencias "C"	GRIETAS	TORC.	ACAN.	ARQ.	RAJ.
1R	0	6	4	0	0
2R	10	5	9	0	3
3R	10	7	5	0	1
4R	23	6	8	0	2
TOTAL	43	24	26	0	6
Prom.	10,75	6	6,5	0	1,5

Frecuencias "D"	GRIETAS	TORC.	ACAN.	ARQ.	RAJ.
1R	2	11	1	7	0
2R	3	11	5	6	0
3R	2	9	0	6	0
4R	7	15	3	2	1
TOTAL	14	46	9	21	1
Prom.	3,5	11,5	2,25	5,25	0,25

9.7 Tablas resúmenes de las dimensiones de los defectos producto del vaporizado

9.7.1 Raulí

"A"[mm]	GRIETAS	TORC.	ACAN.	ARQ.	RAJ.
1R	8,0	1,3	2,0	0	e=15 L=27,8
2R	8,7	1,4	1,1	0	e=18,3 L=28,6
3R	11,3	1,1	1,6	0	0
4R	9,1	1,8	2,3	0	e=15,2 L=48,4
	10,2	1,4	1,9	0	e=16,16 L=34,93

"B" [mm]	GRIETAS	TORC.	ACAN.	ARQ.	RAJ.
1R	7,7	1,5	2,5	0	e=9,6 L=23,3
2R	10,7	2,1	1,6	0	e=29,3 L=58,1
3R	11,0	3,2	2,8	0	e=26,6 L=93,3
4R	7,1	1,5	1,1	0	0
		9,1	2,1	2,0	e=21,83 L=58,23

"C" [mm]	GRIETAS	TORC.	ACAN.	ARQ.	RAJ.
1R	7,7	1,6	1,4	0	e=27 L=21
2R	11,6	2,0	2,1	0	e=21,6 L=21,1
3R	10,4	1,8	2,3	0	0
4R	12,8	2,4	6,5	0	e=16,6 L=26
	11,6	1,9	3,1	0	e=21,73 L = 22,7

"D" [mm]	GRIETAS	TORC.	ACAN.	ARQ.	RAJ.
1R	8,5	1,4	0,8	0,9	e=14,1 L=28,3
2R	9,0	1,7	0,6	1,6	e=14,3 L=22,6
3R	13,1	2,2	2	0,6	e=33 L=36
4R	10,6	2,4	0,8	1,5	e=17,7 L=22,3
	10,3	1,9	1,0	1,2	e=19,77 L=27,3

9.7.2 Roble

"A" [mm]	GRIETAS	TORC.	ACAN.	ARQ.	RAJ.
1R	6,0	1,8	1,0	1,0	0
2R	8,9	2,0	1,2	0	e=16,15 L=16,36
3R	0	2,0	1,2	1,4	0
4R	6,3	1,4	1,0	1,0	0
	5,3	1,8	1,1	0,9	e=16,15 L=16,36

"B" [mm]	GRIETAS	TORC.	ACAN.	ARQ.	RAJ.
1R	5,9	2,3	1,2	1,0	e=6,5 L=14,3
2R	6,8	2,4	2,0	0	e=5 L=15
3R	8,5	2,25	1,9	0	e=7,6 L=36,3
4R	11,4	2,6	1,8	0	e=34,4 L=80,8
	8,2	2,4	1,7	0,3	e=13,37 L=36,6

"C" [mm]	GRIETAS	TORC.	ACAN.	ARQ.	RAJ.
1R	0	1,5	1	0	0
2R	6,1	2,2	1,4	0	e=56 L=97,3
3R	5,6	1,2	0,8	0	e=5 L=80
4R	8,5	1,3	1,6	0	e=12,5 L=58,6
	5,1	1,6	1,2	0	e=124,5 L=78,6

"D" [mm]	GRIETAS	TORC.	ACAN.	ARQ.	RAJ.
1R	5	2,1	1	3,0	0
2R	4	2,0	1,1	1,3	0
3R	1,1	2,1	0	3,2	0
4R	7,7	1,5	1,2	1,5	e=4 L=12
	4,5	1,9	0,8	2,2	e=4 L=12

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN SUMMARY

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	OBJETIVOS.....	2
2.1	Objetivo general.....	2
2.2	Objetivos específicos	2
3.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1	Antecedentes generales	3
3.2	Caracterización general de las especies.....	4
3.2.1	Características generales	4
3.2.2	Composición química.....	5
3.2.3	Propiedades físicas.....	5
3.2.4	Propiedades mecánicas.....	6
3.2.5	Usos de las maderas	7
3.3	Extraíbles	7
3.3.1	Clasificación de los extraíbles	8
3.3.2	Extraíbles en el duramen	11
3.3.3	Extraíbles del raulí y roble	12
3.4	Cambio de color o decoloración.....	13
3.4.1	Antecedentes generales de la decoloración de la madera en procesos de vaporizado.....	13
3.4.2	Origen de los cambios de color de tipo químico	15
3.4.3	Rol de los extraíbles	16
3.4.4	Cambio de color en el transcurso del secado de <i>Fagus sylvatica</i>	17
3.5	Vaporizado.....	17
3.5.1	Antecedentes generales	17
3.5.2	Calor y humedad en la madera	19
4.	MATERIAL Y MÉTODO.....	22
4.1	Material	22
4.1.1	Madera	22
4.1.2	Equipos y accesorios	23
4.2	Método	25
4.2.1	Selección de las muestras	25

4.2.2	Procesos de vaporizado y cambio de color.....	25
4.2.3	Contenido de humedad (CH) y defectos	28
4.2.4	Diseño estadístico.....	29
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	32
5.1	Color.....	32
5.1.1	Color respecto a los tratamientos aplicados.	32
5.1.2	Color con respecto al Tratamiento A.....	36
5.1.3	Color con respecto al Tratamiento B.....	40
5.1.4	Color con respecto al Tratamiento C.....	41
5.1.5	Color con respecto al Tratamiento D.....	43
5.1.6	Tiempos a los cuales se obtienen las tonalidades de color predefinidas.....	48
5.2	Contenido de humedad.....	50
5.3	Defectos.....	52
5.3.1	Raulí.....	53
5.3.2	Roble.....	55
6.	CONCLUSIONES.....	61
7.	RECOMENDACIONES.....	62
8.	BIBLIOGRAFIA.....	63
9.	APÉNDICES.....	67
9.1	Tablas de contingencia.....	67
9.1.1	Color respecto a los tratamientos (roble).	67
9.2	Color versus el tiempo de vaporizado.....	68
9.2.1	Vaporizado A.....	68
9.2.2	Vaporizado B.....	69
9.2.3	Vaporizado C.....	71
9.2.4	Vaporizado D.....	73
9.3	Tablas resúmenes de frecuencia de coloración para cada tratamiento.....	74
9.3.1	Raulí.....	74
9.3.2	Roble.....	75
9.4	Tablas resúmenes de índice de decoloración (promedio de las cuatro repeticiones).....	76
9.4.1	Raulí.....	76
9.4.2	Roble.....	76
9.5	Tablas resúmenes de contenido de humedad para cada tratamiento y el promedio para cada especie.....	76

9.5.1	Raulí	76
9.5.2	Roble	77
9.6	Tablas resúmenes de la frecuencia de aparición de los defectos producto del vaporizado	77
9.6.1	Raulí	77
9.6.2	Roble	78
9.7	Tablas resúmenes de las dimensiones de los defectos producto del vaporizado	79
9.7.1	Raulí	79
9.7.2	Roble	80

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Composición química de la madera de roble maduro y raulí maduro y de renoval.	5
Cuadro 2. Resumen de las densidades [gr/cm ³] del raulí y roble maduro y de renoval.	6
Cuadro 3. Resumen de propiedades mecánicas entre raulí de renovales, raulí y roble maduro.	6
Cuadro 4. Ejemplos de compuestos alifáticos.	9
Cuadro 5. Porcentaje total de extraíbles, porcentaje de taninos y la naturaleza de éste.	13
Cuadro 6. Mecanismo de decoloración para algunas especies estudiadas.....	16
Cuadro 7. Volúmenes requeridos por especie para los distintos procesos de vaporizado.....	23
Cuadro 8. Presiones experimentales.	26
Cuadro 9. Tabla de intensidad de color con su respectivo índice, rango de color y el color representante de cada una de éstas.	28
Cuadro 10. Cuadro resumen de los procesos de vaporizado.	28
Cuadro 11. Tabla de contingencia con las frecuencias observadas, esperadas y el valor de la estadística de los colores obtenidos en el transcurso de cada tratamiento, para el raulí.	32
Cuadro 12. Características del tratamiento A.	36
Cuadro 13. Tabla de contingencia con las frecuencias observadas, esperadas y el valor de la estadística de los colores obtenidos en el transcurso del tratamiento A, para el raulí.	37
Cuadro 14. Características del tratamiento B.	40
Cuadro 15. Características del tratamiento C.	42
Cuadro 16. Características del tratamiento D.	43
Cuadro 17. Tiempos a los que se obtuvieron los índices 2 y 3 para cada tratamiento y el contenido de humedad asociado a estos tiempos.	48

Cuadro 18. Tabla resumen con los análisis de varianza para un experimento con sólo un factor completamente aleatorio, independiente para cada defecto presente en las maderas vaporizadas.....	53
Cuadro 19. Tabla resumen con el análisis de varianza para un experimento con sólo un factor completamente aleatorio, para cada defecto presente en las maderas vaporizadas.	56
Cuadro 20. Dimensiones de las rajaduras para el raulí y roble.	59
Cuadro 21. Porcentaje de madera sin rajaduras para raulí y roble, después de ser vaporizadas.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplos de la estructura química de algunos compuestos pertenecientes a los grupos de terpenos y fenoles.	11
Figura 2. Temperatura en el centro de madera aserrada de 1 “ de espesor después de varios periodos de calor.....	21
Figura 3. Dimensiones de las tablas usadas en este estudio.	22
Figura 4. Equipos utilizados en este estudio A. Cámara de vaporizado experimental B. Lijadora de banda Invicta modelo 80.....	24
Figura 5. Equipos utilizados en este estudio A. Autoclave BAIND y TATLOCK B. Equipo medidor del color Handy – Brite modelo H3, Technidtyne Corporation	24
Figura 6. Sierra circular Guilliet BFB.....	25
Figura 7. Ejemplo de la obtención de las probetas para color y contenido de humedad al inicio y durante los tratamientos.	27
Figura 8. Variación del color con el tiempo de vaporizado para los cuatro tratamientos aplicados en la especie raulí.	34
Figura 9. Variación del color con el tiempo de vaporizado para los cuatro tratamientos aplicados en la especie roble.	35
Figura 10. Horas de vaporizado versus la frecuencia de aparición de cada color, para el raulí.	38
Figura 11. Horas de vaporizado versus la frecuencia de aparición de cada color, en el caso del roble.	39
Figura 12. Horas de vaporizado versus la frecuencia de aparición de cada color, en el caso del raulí.	40
Figura 13. Horas de vaporizado versus la frecuencia de aparición de cada color, en el caso del roble.	41
Figura 14. Horas de vaporizado versus la frecuencia de aparición de cada color, en el caso del raulí.	42
Figura 15. Horas de vaporizado versus la frecuencia de aparición de cada color, en el caso del roble.	43
Figura 16. Horas de vaporizado versus la frecuencia de aparición de cada color, en el caso del raulí.	44

Figura 17. Horas de vaporizado versus la frecuencia de aparición de cada color, en el caso del roble.	45
Figura 18. Evolución del color desde la probeta testigo hasta finalizado el tratamiento de vaporizado a presión atmosférica A. Renoval de raulí B. Renoval de roble	46
Figura 19. Evolución del color desde la probeta testigo hasta finalizado el tratamiento de vaporizado sobre presión atmosférica A. Renoval de raulí B. Renoval de roble	46
Figura 20. Presión de vaporizado respecto el tiempo en que se obtuvieron las intensidades de color moderadas y exigentes, índice 2 y 3 respectivamente.	49
Figura 21. Variación del CH del raulí durante el transcurso de cada tratamiento de vaporizado.....	50
Figura 22. Variación del CH del roble durante el transcurso de cada tratamiento de vaporizado.....	51
Figura 23. Variación del CH del roble y raulí durante el transcurso del vaporizado (valores promedios considerando todos los tratamientos).	52
Figura 24. Frecuencia de aparición de los defectos causados por el vaporizado en el caso del raulí.	54
Figura 25. Dimensiones de los defectos por efecto del vaporizado para el raulí. ...	55
Figura 26. Frecuencia de aparición de los defectos causados por el vaporizado en el caso del roble.	57
Figura 27. Dimensiones de los defectos por efecto del vaporizado para el roble. .	58