



Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco

Sede Esquel

Facultad de Ingeniería

**Propiedades físicas, mecánicas y trabajabilidad de la madera
de Ñire (*Nothofagus antarctica*) de un bosque Post-Incendio de la
Provincia del Chubut**

Requisito parcial para el otorgamiento del título de Ingeniero Forestal

Autor: Rios, Carlos Edgardo

Director: M.Sc. Ing. Ftal. Jovanovski, Alejandro

Co-Directores: M.Sc. Ing. Ftal. Salvador, Gustavo, Dr. M.Sc. Ing. Ftal.

Troncoso, Oscar e Ing. en Maderas Zapata, Claudia

Esquel, 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PATAGONIA SAN JUAN BOSCO

Ingeniería Forestal

Trabajo Final

Presentado el 03 de febrero del 2025

“Propiedades físicas, mecánicas y trabajabilidad de la madera de
Ñire (*Nothofagus antarctica*) de un bosque Post-Incendio de la Provincia
del Chubut”

Aprobado por el Profesor Guía:

M.Cs.Ing. Alejandro Jovanovski _____

Acepto que mi trabajo final sea parte de la colección de la biblioteca de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, y que esta universidad permita consultar mi trabajo final a cualquier lector. También, afirmo que el contenido es de mi autoría.

Carlos Edgardo Rios _____

Agradecimientos

A mis padres por el esfuerzo, la motivación y el apoyo incondicional para que pudiera estudiar y recibirme como profesional de esta hermosa carrera.

En especial a los M.Sc. Ing. Ftal. Alejandro Jovanovski, M.Sc. Ing. Ftal. Gustavo Salvador, Ing. en Maderas Claudia Zapata y al Dr. M.Sc. Ing. Ftal. Oscar Troncoso por su gran apoyo, las correcciones al trabajo, disposición y acompañamiento en mi proceso de elaboración del trabajo final.

A la Ing. Ftal. Jessica Arre, M. Sc. Ing. Ftal. Natalia Martinez, el Profesor Hernán Díaz Varela por la revisión ortográfica del trabajo.

A las instituciones INTA y CEIFAP por dejarme utilizar material y las maquinarias necesarias para realizar todos los ensayos.

Al personal de carpintería de CIEFAP, Andrés Costas y Mario Tiznado, quienes me ayudaron con la elaboración de las probetas.

A todos los profesores de la Facultad de Ingeniería que fueron esenciales en mi formación profesional.

Resumen

El presente estudio se llevó a cabo con el objetivo de conocer las características macroscópicas, las propiedades físico mecánicas, y la trabajabilidad de la madera de *Nothofagus antarctica* (G. Forster) Oerst, proveniente de un bosque post-incendio ubicado en el Campo Agroforestal Trevelin (CEAT) de la Estación Experimental INTA Esquel. Para el estudio se utilizaron 15 árboles con una edad promedio de 35 años y los ensayos se efectuaron bajo normas COPANT 458, ISO y ASTM. Las características macroscópicas resultaron ser similares a las tres especies del género *Nothofagus* (*N. pumilio*, *N. nervosa*, *N. obliqua*), siendo la única diferencia el color del duramen. En cuanto a las propiedades físicas, la densidad obtenida ($0,633 \text{ g/cm}^3$) fue levemente mayor que la de *N. pumilio*, pero inferior a la de *N. nervosa* y *N. obliqua*. Además, los valores de contracción tangencial (9,7 %) y volumétrica del ñire (14,3 %) fueron superiores, al igual que el índice de retractibilidad, que alcanzó el valor de 2,6. Según el ensayo de dureza, la madera de ñire se clasifica como semidura, similar a otras especies del mismo género. Respecto a la trabajabilidad, se observó que el mecanizado por cepillado es regular, mientras que los procesos de lijado y taladrado presentaron resultados muy buenos. A pesar de estos resultados positivos, el uso de la madera de *N. antarctica*, se ve limitado por el bajo rendimiento de aserrado de la madera, debido al estado sanitario de los árboles, el diámetro y la forma de los rollizos que se pueden extraer del bosque en las condiciones estudiadas.

Índice de contenido

Agradecimientos	i
Resumen.....	ii
Índice de contenido	iii
Índice de Figuras	vi
Índice de Tablas	ix
1. Introducción	1
1.1. Objetivos.....	2
1.1.1. Objetivo General	2
1.1.2. Objetivos Específicos	3
1.2. Antecedentes Generales de <i>N. antarctica</i>	3
1.3. Características Macroscópicas de la Madera	4
1.4. Propiedades Físicas de la Madera.....	6
1.4.1. Densidad Básica, Anhidra y Normal.....	7
1.4.2. Contracción Radial, Tangencial y Volumétrica	7
1.4.3. Estabilidad Dimensional.....	8
1.5. Propiedades Mecánicas.....	9
1.5.1. Dureza	9
1.6. Trabajabilidad	11
Lijado	14
Taladrado.....	14

1.7.	Propiedades físico-mecánicas, la trabajabilidad y aplicaciones de la madera de las principales especies de <i>Nothofagus</i> de uso comercial.....	15
1.7.1.	Lenga (<i>Nothofagus pumilio</i>)	15
1.7.2.	Roble pellin (<i>Nothofagus obliqua</i>)	16
1.7.3.	Raulí, roble, ruilí (<i>Nothofagus alpina</i>)	17
2.	Materiales y Métodos	18
2.1.	Material para los ensayos.....	18
2.1.1.	Selección y Corta de los árboles.....	19
2.2.	Aserrío y secado.....	20
2.3.	Características Macroscópicas	24
2.4.	Propiedades Físicas	25
2.4.1.	Densidad básica, anhidra y normal en albura y duramen	25
2.4.2.	Índice de Contracción	29
2.5.	Determinación de la dureza Janka	31
2.6.	Determinación de las propiedades de trabajabilidad	34
2.6.1.	Cepillado	34
2.6.2.	Lijado.....	38
2.6.3.	Taladrado	39
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
3.1.	Aserrío y secado.....	42
3.2.	Características Macroscópicas	43
3.2.1.	Albura	43

3.2.2.	Duramen	44
3.3.	Propiedades físicas.....	46
3.4.	Dureza	48
3.5.	Propiedades de trabajabilidad	49
3.5.1.	Cepillado	49
3.5.2.	Lijado.....	52
3.5.3.	Taladro:	53
4.	Conclusiones	56
5.	Bibliografía	58
6.	Anexo I.....	62

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación del rodal con bosque de ñire alto, “Veranada Trevor” (Latitud: 43°04’57.72”S; Longitud: 71°33’27”O).....	19
Figura 2 . Esquema de corte tipo sandwich, 2 piezas de 33 mm y 1 pieza de 63 mm de espesor.....	21
Figura 3. A) Tablas recién aserradas. B) Estiba de secado natural del material aserrado con separadores de maderas de 1 pulgada.	21
Figura 4. A) Xilohigrómetro FMC, utilizado para el monitoreo del CH. B) Material seco dispuesto en la carpintería del CIEFAP ante de la elaboración de probeta para ensayos.....	22
Figura 5. Probetas utilizadas en los ensayos de densidad separadas por albura (DA) y duramen (DD).	25
Figura 6. Probeta marcada en sus ejes de simetrías y rotulado con número para indicar la secuencia de medición.....	26
Figura 7. A) Probetas sumergidas en agua. B) Campana y bomba de vacío.	27
Figura 8. Probetas separadas en albura y duramen con sus rótulos de identificación.	30
Figura 9. Micrómetro marca Mitutoyo, precisión de 0,001 mm.....	30
Figura 10. Máquina universal de Servo Control Universal Testin Machine SM de 5 toneladas.....	32
Figura 11. Software que controla el mecanismo de la presa y registra la fuerza en kilogramos.....	32
Figura 12. Determinación de la dureza del duramen de la cara transversal de una probeta mediante el ensayo de penetración de una bola de acero.....	33
Figura 13. Cepilladora regruesadora Martin T44 de la carpintería del CIEFAP	35

Figura 14. Lijadora eléctrica de banda profesional.....	38
Figura 15. Taladro de banco marca barbero con un motor de ½ HP de potencia.....	39
Figura 16. Broca Forstner de punta de carburo de tungsteno; dos filos de corte: principal y periférico	40
Figura 17. A) Taladro de mesa con el molde sujetador de probeta. B) Vista lateral del taladro con el molde sujetado con prensa C.....	40
Figura 18. Ubicación de las perforaciones por brocas.	41
Figura 19. Material aserrado de espesor.	43
Figura 20. Muestras macroscópicas de albura de <i>N. antarctica</i> . A) Sección tangencial tamaño natural. Se aprecia un diseño floreado dado por la compresión del leño tardío (lt). B) Sección radial tamaño natural. Se observa un diseño rayado por la compresión del leño tardío. C) Sección transversal 50 x. Anillo de crecimiento demarcado por la compresión del leño tardío (lt), porosidad difusa solitarios a múltiples (pd) y radios angostos (rd).	44
Figura 21. Muestra macroscópica de duramen de <i>N. antarctica</i> . A) Sección tangencial tamaño natural. Se aprecia un diseño floreado dado por la compresión del leño tardío (lt). B) Sección radial tamaño natural. Se observa un diseño rayado por la compresión del leño tardío. ac = anillo de crecimiento; lt = leño tardío. C) Sección transversal 50 x. Anillo de crecimiento demarcado por la compresión del leño tardío (lt), porosidad difusa solitarios a múltiples (pd) y radios angostos (rd).....	45
Figura 22. A) Probeta de ñire con defecto denominado marca de chip, calificada su severidad de grado 2. B) Probeta de ñire con defecto de grano desgarrado calificada con la severidad de grado 3. C) Probeta de ñire con defecto de grano vellosa calificada con la severidad de grado 2.	51
Figura 23. A) probeta mecanizada con lija de grano 80 con defecto de rayado. B)	

misma probeta mecanizada con lija grano 120 sin defecto.....	53
Figura 24. A) Perforación con borde sin defecto de astillado realizado a 430 RPM. B)	
Perforación con borde sin defecto de astillado realizado a 2100 RPM.....	55

Índice de Tablas

Tabla 1. Datos de las trozas obtenidas de los quince árboles de ñire.	20
Tabla 2. Cantidad y dimensiones de probetas por ensayo y posición del leño.	23
Tabla 3. Cantidad de probeta obtenida por ensayos.	24
Tabla 4. Calificación de la severidad de los defectos.	35
Tabla 5. Clasificación de la trabajabilidad de la madera. Porcentaje de pieza excelente (E); Porcentaje de pieza buena (B).	36
Tabla 6. Número de marcas de cuchillas por cm (NMC), velocidad de giro del cabezal, número de cuchillas, ángulo de corte, velocidad de avance y dirección de la fibra por combinación de ensayo.	37
Tabla 7. Resultados de la media, desvío estándar (D. std.), coeficiente de variación (Cf. Var.) y Cantidad de probetas (N) por densidad básica, densidad anhidra y densidad normal.	46
Tabla 8. Resultado de la contracción media, desvío estándar (D. std.), coeficiente de variación (Cf. Var.) y Cantidad de probetas (N) por Contracción radial (CR), Contracción tangencial (CT) y Contracción volumétrica (CV).	47
Tabla 9. Dureza media, desvío estándar (D. std.), coeficiente de variación (Cf. Var.) y cantidad de probetas (N) por secciones (radial, tangencial y transversal) y general.	49
Tabla 10. Calificación de la trabajabilidad del cepillado, suma de porcentaje de probetas (E+B), cantidad de probetas E+B: excelente (E) y buena (B), cantidad total de probeta (N), número de marcas de cuchillas por cm (NMC), dirección de la fibra en función de las 4 combinaciones de ensayo.	50
Tabla 11. Calificación de la trabajabilidad del lijado, severidad, defecto, tipo de	

defecto, grano de lija por combinación de ensayo. Excelente (B), buena (B).	52
Tabla 12. Calificación de la trabajabilidad de ensayo de taladrado, suma de porcentajes de excelente y bueno (E+B), cantidad de probeta libre de defecto (CPLD), tiempo de avance por velocidad de rotación. Excelente (E), buena (B).	54
Tabla 13. Características de la madera de ñire comparadas con lenga, raulí y roble pellin: propiedades macroscópicas, físico-mecánicas y de trabajabilidad.	62

1. Introducción

La madera está constituida por células de diversas formas y funciones, con paredes de espesores variados y dispuestas de manera diferente según la especie (Coronel, 1995). Estas células están siempre orientadas en las direcciones ortogonales principales (longitudinal, radial y tangencial). La pared celular, constituida por cadenas moleculares de compuestos de carbono de diferente grado de polimerización, forman la estructura singular de la madera y explican su heterogeneidad y anisotropía (Coronel, 1995).

El conocimiento de las propiedades físicas básicas facilita el procesamiento, utilización óptima, comparación y selección entre diferentes maderas para un producto final específico (Kollmann y Côté, 1968). Por otro lado, la determinación de las propiedades mecánicas se realiza mediante la ejecución de ensayos destructivos planificados, conforme a métodos normalizados. La finalidad práctica de los mismos es obtener valores que permitan clasificar a las maderas desde el punto de vista de su resistencia (Coronel, 1995). En este sentido, las propiedades mecánicas son, generalmente, las características más importantes de la madera (Bowyer et al., 2007).

De esta manera, se destaca que tanto las propiedades físicas como las mecánicas son indispensables para el diseño de productos con maderas y para su análisis estructural. Además, la industria de productos forestales y el sector de la construcción con madera requieren datos experimentales confiables y especies con características tecnológicas que permitan un empleo adecuado para un uso específico (Sotomayor et al, 2014).

Los bosques de ñire (*Nothofagus antarctica* (G. Forster) Oerst) han sido

fundamentalmente utilizados para ganadería, y extracción de leña y postes de alambrados (Pastur y Soler, 2015). Históricamente, esta especie no ha sido aprovechada en la industria del aserrío debido a la tortuosidad del tronco. No obstante, las propiedades de su madera la pueden hacer interesante para aplicaciones específicas, como pisos, pequeños utensilios o artículos decorativos. Pastur y Soler (2015), señala que la madera de ñire presenta mayor densidad y vetas más marcadas que el resto de los *Nothofagus* destacándose su potencial para la confección de muebles y artesanías, pero actualmente ha sido sólo destinada a un uso menor.

Por otra parte, conocer la trabajabilidad de la madera de una especie determinada, permite definir su uso óptimo desde el punto de vista técnico. En este sentido, las características de maquinado se refieren al comportamiento de la madera al ser procesada con máquinas o herramientas cortantes en las operaciones de cepillado, torneado, moldurado, taladrado y lijado, y se evalúan en función de la tersura de la superficie labrada (Zabala y Vázquez, 2001).

El presente trabajo brinda información sobre los valores de las propiedades organolépticas, físicas, mecánicas y trabajabilidad que posee la madera de ñire proveniente del rebrote de cepa producto de un incendio ocurrido hace aproximadamente 30 años. Los valores obtenidos permitieron proyectar los posibles usos que la madera de esta especie podría tener, considerando un valor agregado adicional al que actualmente se le da a su utilización como leña y postes.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Estudiar las propiedades físicas, mecánicas y de trabajabilidad de la madera de ñire de un bosque post-incendios de la Provincia del Chubut.

1.1.2. Objetivos Específicos

1. Realizar una descripción macroscópica de la madera de ñire (albura y duramen), teniendo en cuenta el color, olor, veteado, brillo, textura y grano.
2. Determinar la densidad básica, densidad anhidra, densidad normal e índices de contracciones radiales y tangenciales de la madera de ñire, mediante ensayos normalizados:
3. Determinar la dureza de la madera de ñire, mediante el método Janka.
4. Determinar las propiedades de trabajabilidad de la madera de ñire, mediante los procesos de cepillado, lijado y taladrado en sus cortes radial y tangencial, mediante ensayos no normalizados.
5. Proponer posibles usos de la madera en función de los resultados obtenidos.

1.2. Antecedentes Generales de *N. antarctica*

La especie *Nothofagus antarctica* (Foster F.) Oersted 1871, pertenece al género *Nothofagus*, único dentro de la familia *Nothofagaceae*. El nombre común más difundido en su amplia área geográfica es "ñire", aunque también se le llama raramente "ñirre" (Tortorelli, 2009). En Argentina, esta especie crece en casi toda la extensión de los bosques subantárticos. Se trata de una especie decidua, es decir, pierde todas sus hojas en invierno, y que puede reconocerse por sus hojas de forma elíptica, que miden entre 1 y 3 cm de largo y presentan bordes aserrados irregulares.

El ñire se caracteriza por ser un árbol de porte tortuoso, con corteza gris agrietada de manera irregular. Es una especie endémica de los bosques patagónicos, lo que significa que es exclusiva de esta región y no se encuentra de forma natural en

ninguna otra parte del mundo. Su distribución se extiende desde los bosques de pehuén (*Araucaria araucana*) en el norte de la Patagonia (36°30'S) hasta los últimos vestigios de bosques en el Cabo de Hornos (56°00'S).

El ñire puede alcanzar alturas de hasta 15 m y 15 a 40 cm de diámetros en los valles y costas de los ríos y lagos (Tortorelli, 2009). Además, crece de forma achaparrada en sectores expuestos a fuertes vientos, en suelos turbosos o en áreas de elevada altitud, en el límite arbóreo (Pastur y Soler, 2015).

1.3. Características Macroscópicas de la Madera

Las características macroscópicas de la madera incluyen a los elementos prominentes que puedan ser observados a ojo desnudo o con ayuda de una lupa de 8x. Las superficies a observar corresponden a tres direcciones: transversal, tangencial y radial (Tortorelli, 2009).

Las características organolépticas de la madera incluyen los aspectos que aportan propiedades estéticas positivas como color, brillo y veteado. Además, incluyen, limitaciones de uso como el olor desagradable, o que afecten los procesos industriales como la textura y el grano, ya sea facilitando o creando problemas sobre los elementos cortantes y de laboreo. En algunas maderas, la combinación de tipo de grano y color incrementa el valor ornamental del material destinado a fines decorativos (Tinto, 1997).

El color de la madera es originado por sustancias colorantes xilócromas, depositadas en el interior de las células constitutivas de los tejidos, que impregnan al mismo tiempo las paredes celulares. En general, la albura es de coloración más clara que el duramen.

El olor es producido por sustancias volátiles, especialmente resinas y aceites

esenciales, las que al volatilizarse son percibidas por nuestro olfato.

El vetado es el diseño o dibujo que se produce en las superficies longitudinales bien pulidas del leño, la disposición de sus elementos constitutivos, radios y parénquimas leñosos, o también el tamaño y abundancia de los mismos, se observan en especial en las vasculares (Tortorelli, 2009).

El brillo es la propiedad que poseen algunas maderas de reflejar la luz en las superficies longitudinales.

La textura se refiere al tamaño de los elementos que constituyen el leño; los elementos que más contribuyen a determinar la textura son, por un lado, los parenquimáticos y vasculares, y por el otro los correspondiente al tejido fibroso.

El grano es la dirección o alineamiento que toman en el plano leñoso sus elementos constitutivos, en especial los alargados verticalmente, como son las fibras y vasos en las latifoliadas.

Barañaño et al (2008) detallan que el tipo de poro, el tamaño y la cantidad es una parte del reconocimiento que se debe hacer en las maderas, y hay que agregar cómo se ubican en el anillo de crecimiento, cómo se distribuyen, si hay algún orden para ello. De esta manera aparecen otros dilemas: la porosidad y la disposición. Se pueden identificar 6 tipos de porosidad:

Porosidad circular: En la zona inicial del anillo se concentran poros de gran tamaño, de paredes delgadas, en gran cantidad, en franco contraste con el resto del anillo.

Porosidad difusa: Es la contraposición al caso anterior. Los poros, de tamaño semejante, se distribuyen de manera uniforme en el anillo; no es fácil distinguir leño temprano de leño tardío por estos caracteres.

Porosidad semicircular: Es cuando tanto el diámetro, como el número de los

poros, disminuye en forma gradual hacia el leño tardío. Es una condición intermedia entre porosidad circular y difusa.

Disposición dendroide o dendrítica: Generalmente complementa la porosidad circular y consiste en que los poros del leño tardío se distribuyen a partir de la zona temprana en líneas más o menos paralelas a los radios, con divisiones o ramificaciones que son las que lo asemejan a ramas de un árbol y de allí la denominación.

Disposición ulmoide: En este caso los poros, acompañados por parénquima, se distribuyen en bandas tangenciales, como si fueran anillos de crecimiento.

Disposición oblicua: Los poros se distribuyen en líneas oblicuas con respecto a los radios.

1.4. Propiedades Físicas de la Madera

Las propiedades físicas comprenden las diferentes características derivadas de la estructura leñosa porcentuales de materiales celulósicos, disposición de los elementos vasculares y contenido de agua.

Tinto (1997) indica que el peso específico a 15% de contenido de humedad es la propiedad física que mejor correlaciona con otras características relevantes de la madera, como su dureza, porosidad, comportamiento frente a esfuerzos mecánicos y probables condiciones de trabajabilidad.

Los índices de contracción y los correspondientes coeficientes de retractibilidad son indicadores de la respuesta de cada madera a la pérdida de agua durante el estacionamiento y el secado artificial (Tinto, 1997).

1.4.1. Densidad Básica, Anhidra y Normal

La densidad, definida como masa por unidad de volumen, es una de las propiedades de la madera más importantes, ya que existe una estrecha relación entre ésta y las características físico-mecánicas de la madera. Una mayor densidad implica un aumento en la resistencia mecánica, un mayor rendimiento en la elaboración de la pulpa para papel y mayor valor calorífico al utilizar madera como combustible (Kollmann y Côté, 1968). Además, se destaca que esta propiedad es relativamente fácil de determinar.

El método más simple para determinar la densidad de una pieza de madera es pesarla y luego medir su volumen (Kollmann y Côté, 1968).

La densidad básica de la madera es el cociente entre el peso anhidro de una muestra y su volumen verde o saturado. El valor de esta propiedad depende de numerosos factores, muchos de ellos propios de cada especie y otros relacionados con el medio ambiente (Prado y Barros, 1989; citado en Espina Lizana, 2006).

Al igual que otros tipos de densidad, la densidad anhidra de la madera varía significativamente entre una especie y otra, y es definida como el cociente entre el peso anhidro de una muestra y su volumen en la misma condición (Forest Products Laboratory, 2010).

La densidad normal es definida como la relación entre el peso de la muestra estacionada y su volumen al 12% de contenido de humedad.

1.4.2. Contracción Radial, Tangencial y Volumétrica

La madera es un material higroscópico y anisotrópico. Debido a la orientación de las fibras de madera y la disposición de las mismas en el sentido radial, las propiedades varían a lo largo de tres ejes mutuamente perpendiculares:

longitudinal, radial y tangencial (Winandy, 1994). La higroscopicidad es la propiedad de ganar o perder humedad para equilibrarse con el medio que la rodea (Kollman y Côté, 1968), en combinación con la anisotropía, resulta en alteraciones dimensionales y variaciones de volumen debido a los procesos de adsorción y desorción de agua entre el estado anhidro y el punto de saturación de las fibras (PFS), lo que limita considerablemente el uso industrial de las maderas (Suirezs y Gilson, 2009). El aumento de volumen (hinchamiento) se debe a la inclusión de moléculas de agua en los espacios intermicelares de la pared celular. En oposición, la contracción se debe a la eliminación de las moléculas de agua de estos espacios por debajo del PFS. Esto ocasiona las aproximaciones de las micelas originando la reducción de las dimensiones de la pieza de madera. Estas variaciones en volumen influyen en los procesos industriales de secado y curvado de la madera entre otros, como así también en su uso final (Tinto, 1997).

Según Coronel (1994), de la relación entre la contracción tangencial y la contracción radial de una especie resulta un índice conocido como coeficiente de anisotropía. Si el mismo se encuentra comprendido entre 1,2 y 1,5 la especie puede considerarse de excelente estabilidad dimensional, en tanto que si se ubica entre 1,6 y 1,9 se destaca como normal. Las maderas con coeficientes de anisotropía superiores a 2 presentan dificultades de estabilidad dimensional y limitan los usos de las mismas.

1.4.3. Estabilidad Dimensional

Las maderas reaccionan en forma diferente frente a cambios de humedad del medio en que se hayan expuesto. Cuando menores sean los valores de contracción y los coeficientes de retractibilidad, mejor será el comportamiento de las piezas en una

estructura sujeta a cambios ambientales. Las maderas que se destacan por su gran estabilidad física son: algarrobo, caldén, alerce, ciprés de la cordillera y araucaria, entre las principales.

Estas maderas y otras con valores medios, serán las indicadas para los usos en que el material debe ser menos sensible a los cambios dimensionales: pisos, aberturas, muebles, revestimientos (Tinto, 1997).

1.5. Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas son las características de un material en respuesta a fuerzas aplicadas externas. Los valores de las propiedades mecánicas se dan en términos de tensión (fuerza por unidad de área). Estas se obtienen a partir de pruebas de laboratorio de muestras de madera libre de defectos (Winandy, 1994).

1.5.1. Dureza

La dureza es la propiedad que hace a la madera difícil de rayar, marcar o cortar. Generalmente, la mayor dureza indica una alta resistencia al desgaste, un mejor comportamiento al pulido y menor tendencia a romperse o aplastarse bajo la acción de una carga (Tinto, 1997). Se caracteriza por la resistencia que otorga la madera a la penetración de cuerpos extraños.

Según Coronel, 1995, la dureza es un concepto relativo, ya que no es posible indicar que una madera es más dura que otra por no existir un patrón único para definir cuantitativamente la dureza, sino que ella se determina a través de estipulaciones preestablecidas.

La dureza tiene importancia dentro de la técnica de aplicación de la madera, por estar estrechamente relacionada con el trabajo de ésta, tanto a mano como

mecánico. Existe una relación directa entre la dureza y la dificultad del trabajo y una relación de carácter general entre dureza y la densidad aparente, ya que las maderas más duras son, normalmente, también más pesadas (Coronel, 1995).

En general, la dureza se determina mediante los llamados “Ensayos estáticos de penetración”. La mayoría de estos métodos se fundamenta en la resistencia que brinda una madera para deformar un cuerpo más duro. En consecuencia, se ejerce una presión de tal magnitud que genera una deformación de características únicamente plásticas en la madera. La magnitud de esa deformación, realizada en las condiciones establecidas por las normas técnicas, indica el índice de la dureza de la madera ensayada (Coronel, 1995).

El método Janka fue propuesto por el investigador austriaco G. Janka en 1906, en su trabajo “La dureza de la madera”, está incluido dentro de los denominados métodos estáticos de penetración (Coronel, 1995).

Este método consiste en comprimir una bolilla de acero de diámetro 11,284 mm sobre una muestra de madera hasta el ecuador; de esta forma se obtiene plano de proyección de la bolilla de 1 cm². En resumen, en este método se determina la carga necesaria para penetrar una esfera de acero a una profundidad igual a la mitad del diámetro. Se obtiene una impronta de 1 cm². Por lo tanto; la carga necesaria es la medida de la dureza expresada en kg/cm².

Mediante este ensayo se puede determinar la dureza en las caras longitudinal, radial y tangencial de la probeta de madera.

En el método Janka se aplica una carga P lenta y creciente, con una velocidad de avance de 6 mm/min, hasta que alcanza la mitad de la esfera; mediante este valor y la fórmula correspondiente, se obtiene el valor de la dureza Janka, o es decir:

$$\text{Dureza Janka} = H_j = \frac{P}{A} = \frac{P}{1 \text{ cm}^2} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

donde:

P: la carga bajo la que el penetrador ha efectuado se recorrido máximo (kg).

A: área de la proyección horizontal de la semiesfera (cm²)

Tortorelli (2009) utilizó la escala de clasificación de dureza establecida por los ingenieros Agrónomos K García y J.J. Gracia. Según estos profesionales, en función de las pruebas de dureza de Janka clasifican la madera de la siguiente manera: se considera madera blanda aquella que presenta valores de hasta 300 kg/cm²; madera semidura la que se encuentra entre 351 y 600 kg/cm²; y madera dura la que presenta valores superiores a 600 kg/cm².

1.6. Trabajabilidad

La trabajabilidad se refiere al comportamiento de la madera en el momento de ser trabajada mediante máquina y herramientas de carpintería (Martínez Castillo y Martínez-Pinillos, 1996). Los mismos autores sostienen que, si se tiene conocimiento de las características de las superficies maquinadas de cada especie que se desee maquinar, es factible inferir la calidad de superficie obtenida durante cada operación de maquinado.

Para Davies (1962), una buena terminación mediante operaciones de cepillado, moldeado, torneado, barrenado, mortajado y lijado, está sujeta a las siguientes características de la madera:

- Densidad
- Orientación del grano
- Textura
- Presencia de cristales, en especial sílice

- Contenido de humedad

Una madera con elevada densidad, grano entrecruzado, textura gruesa, alto contenido de sílice y muy seca, presentará mayores dificultades en el maquinado que otra de baja densidad, con grano derecho, textura fina, sin contenido cristalino y mediana humedad (Tinto, 1997).

Este mismo autor, señala, que la madera es un material fácil de cortar, rebajar y asegurar con herramientas comunes. Para algunos propósitos, la diferencia entre maderas por su facilidad de maquinado es despreciable, pero para otros usos dicha facilidad afectará la calidad y el costo del producto elaborado. La calificación de las maderas más corrientes, en relación con sus aptitudes de maquinado, está basada en una combinación de dureza, textura y características de las superficies obtenidas. Las maderas calificadas con comportamiento “Bueno”, son generalmente blandas a semiduras, con textura uniforme y con acabado superficial pulido. La madera mencionada como de comportamiento “Deficiente”, son duras, con textura heterogénea y con presencia de grano oblicuo, revirado o entrecruzado, que provoca el astillamiento del material. El grupo calificado como “Regular” acusa características intermedias (Tinto, 1997).

Cepillado

Después del aserrado, el cepillado es la operación de mecanizado más importante. Sin embargo, casi todas las maderas aserradas se cepillan en alguna etapa de su fabricación para convertirla en un producto terminado (Davis, 1962).

Una cepilladora es una máquina diseñada para alisar y aplanar superficie de madera. Su funcionamiento se basa en un conjunto de cuchillas afiladas que rotan a alta velocidad y arrancan finas capas de material de la pieza (virutas) de trabajo a medida que esta se desplaza sobre una mesa (Davies, 1962).

Las partes principales de una cepilladora son las siguientes:

- Mesa de alimentación: sobre la cual se desplaza la pieza de madera.
- Cuchillas: conjuntos de cuchillas afiladas que rotan a alta velocidad y realizan el corte.
- Rodillo de alimentación: empuja la pieza de madera contra las cuchillas.
- Mesa de salida: soporta la pieza de madera una vez procesada.

Davis (1962) define los cuatro tipos de defectos más frecuentes ocasionados por una cepilladora:

Grano levantado: El grano levantado es una condición rugosa de la superficie de la madera en la que parte del anillo anual se eleva por encima de la superficie general, pero no se desprende de ella.

Grano difuso: El grano difuso consiste en pequeñas partículas o grupos de partículas pequeñas o grupos de fibras que no se cortan limpiamente en el mecanizado, sino que se elevan por encima del nivel general de la superficie. En general, el grano difuso se debe a la presencia de madera anormal.

Grano rasgado: El grano rasgado es una superficie donde se rompen partículas muy cortas por debajo de la línea de corte. Por lo general, el grano rasgado se asocia con la madera de grano cruzado y ocurre en los lugares en donde las cuchillas cortan a contragrano.

Marcas de astillas o chip: Las marcas de chip son abolladuras poco profundas en la superficie causadas por virutas que se han adherido a las cuchillas.

Asimismo, (Davies, 1962) propone una metodología para evaluar la severidad de los defectos a través de la observación a ojo desnudo de la superficie de la madera, teniendo en cuenta libre de defectos, como una calidad excelente. Mientras

que las severidades leves, medias y avanzadas, corresponden a calidad buena, regular y pobre. La severidad extrema de los defectos es de una calidad muy pobre.

Lijado

El lijado utiliza como principal herramienta de desgaste de la madera un abrasivo. En el trabajo con madera el abrasivo cubierto más conocido es el denominado “papel de lija” fabricado con óxido de aluminio (Davies, 1962).

El objetivo principal del lijado es eliminar las marcas de cuchillas y los defectos menores del mecanizado y así preparar la superficie para la aplicación de pintura, laca u otro acabado.

Hay varios tipos de lijadoras disponibles, algunas de las cuales están altamente especializadas para torneados, molduras, contornos y bordes. Sin embargo, la mayor parte del lijado se realiza para los llamados “trabajos planos”. La principal máquina que se utiliza para esto es la lijadora de banda, y es la que se utiliza normalmente para este tipo de ensayo (Davis, 1962).

Taladrado

El taladrado desempeña un papel fundamental en la calidad del trabajo final, la precisión en el tamaño del orificio y la suavidad del corte son importantes para lograr una unión óptima con el pegamento (Davis, 1962)

Según Martínez Castillo y Martínez-Pinillos (1996), “taladrar es un proceso muy frecuentemente usado en la manufactura de artículos de madera; es común utilizar los taladros para la colocación de tornillos, pernos de madera y herrajes o elementos de unión”.

El taladro de banco es una máquina donde se mecanizan los agujeros en dos movimientos: el de rotación de la broca, que le imprime el motor eléctrico de la

máquina y avance, que se mueve verticalmente por medio de una palanca (Puertas et al., 2013). En el taladrado, la herramienta de corte que se utiliza es una broca que se coloca en una parte del taladro llamada mandril.

Cuando se evalúa la calidad de terminación de un orificio, debe verse un corte limpio y liso, con mínimo de aplastamiento o desgarro en la superficie de corte (Davis, 1962).

1.7. Propiedades Físico-Mecánicas, la Trabajabilidad y Aplicaciones de la Madera de las Principales Especies de *Nothofagus* de Uso Comercial

1.7.1. Lengua (*Nothofagus pumilio*)

La madera de lengua tiene un duramen de color blanco-rosáceo, con diferencia con la albura, que es de un color blanquecina (Tortorelli, 2009). Los anillos de crecimiento son escasamente definidos y poco delimitados. El veteado de la madera es liso y de textura fina y homogénea (Díaz-Vaz et al., 2002).

La madera tiene una densidad de 550kg/m^3 , por lo tanto, se encuentra en la clase semipesada. En cuanto que la contracción volumétrica es del 12%, lo cual tiene un impacto en el colapso de mediana intensidad (Díaz-Vaz et al., 2002). La dureza es de 407 kg/cm^2 , por lo tanto, está dentro de las maderas de resistencias mecánicas medianas (Tortorelli, 2009)

El uso más común por su facilidad de trabajo y las excelentes terminaciones que se pueden lograr con la madera, es en la construcción, especialmente como revestimiento para interiores y exteriores, puertas, ventanas y pisos.

También se obtienen productos para elaborar chapas de excelente propiedad, que junto a sus características organolépticas de color y veteado agregan valor comercial a la especie.

Por otra parte, su madera es muy utilizada en la carpintería por su facilidad de maquinado y la calidad de las terminaciones, donde se utiliza para la fabricación de muebles, embalajes, cajones, envases y palos de escoba (Díaz-Vaz et al., 2002).

1.7.2. Roble pellin (*Nothofagus obliqua*)

El roble pellín es una madera altamente valorada por su albura de color amarillo rosado y su duramen, que varía de rosado a castaño rojizo. Se caracteriza por un brillo suave y una textura fina y homogénea. En el corte tangencial, presenta un diseño floreado, mientras que en el corte radial muestra un patrón vetado y jaspeado.

Con una densidad aparente al 15% de humedad de 720 kg/m³, esta madera se clasifica como semipesada (Martinuzzi, 2007). Su contracción volumétrica es del 12,9%, con contracciones lineales y volumétricas medias, lo que la hace poco estable. El coeficiente de retractibilidad, con un índice T/R de 2,02%, es considerado alto, lo que limita ciertos usos.

En cuanto a su dureza se clasifica como una madera semidura, cuyo valor es de 505 kg/cm² (Tortorelli, 2009). Respecto al proceso de maquinado, la madera responde bien, produciendo superficies lisas y pulidas sin problemas.

La madera de roble pellin es resistente a la descomposición gracias a las sustancias tánicas presentes en sus células. Se utiliza en la construcción naval para estructuras de lanchas, obras hidráulicas, pilares de puentes, durmientes y postes en general. En carpintería, tiene diversas aplicaciones, como en marcos de puertas y ventanas, molduras, tacones de calzado femenino, carrocerías y muebles en general (Tortorelli, 2009).

1.7.3. Raulí, roble, raulí (*Nothofagus alpina*)

La madera de esta especie presenta un duramen de color castaño-rosado, mientras que la albura se caracteriza por un color amarillo-rosado. Los anillos de crecimiento son medianamente definido y bien definidos. Esta madera exhibe un vetado muy suave, así como una textura fina y homogénea (Tortorelli, 2009). Su peso es moderado, con una densidad de 550 kg/m³ a un contenido de humedad del 12%. Además, presenta una contracción volumétrica del 12% y no se ve afectada por colapsos (Díaz-Vaz et al., 2002). El raulí tiene una dureza de 610 kg/cm² y muestra resistencias mecánicas medianas (Tortorelli, 2009).

El uso más común de la madera de esta especie en la construcción incluye revestimientos de interiores y exteriores, pisos, parquets, cielorrasos, puertas, ventanas y tejuelas. También se utiliza en la producción de chapas finas. En el ámbito de la carpintería, se emplea en trabajos de ebanistería, fabricación de muebles, tornería, tonelería (para vinos, licores y cervezas), escaleras, construcción de embarcaciones, tallados y en la elaboración de cajas para puros (Díaz-Vaz et al., 2002).

2. Materiales y Métodos

2.1. Material para los Ensayos

La recolección de ejemplares para el estudio se llevó a cabo en el Campo Experimental Agroforestal del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Trevelín, situado en el Valle 16 de octubre, en el departamento de Futaleufú, en el noroeste de la Provincia de Chubut (Figura 1). Desde una perspectiva fitogeográfica, el área se encuentra dentro del dominio Subantártico, en la provincia Subantártica, que corresponde a la unidad de bosque caducifolio de *Nothofagus spp.* (Tortorelli, 2009). El clima de la región es templado-frío húmedo cordillerano, con una temperatura media de 18 °C en enero, el mes más cálido, y de 3 °C en julio, el mes más frío. Las precipitaciones anuales oscilan entre 600 y 1000 mm, ya sea en forma de lluvia o nieve, y se concentran en otoño e invierno (Martínez, 2024)

El rodal, parte de la unidad experimental de Manejo de Bosque con Ganadería Integrada del INTA, conocida como “Veranada Trevoer”, estaba compuesto por árboles que superaban los 8 metros de altura. Estos individuos, originados por rebrote después de un incendio ocurrido en 1987 que impactó severamente sobre el bosque, tenían una edad promedio de 35 años (Martínez, 2024).

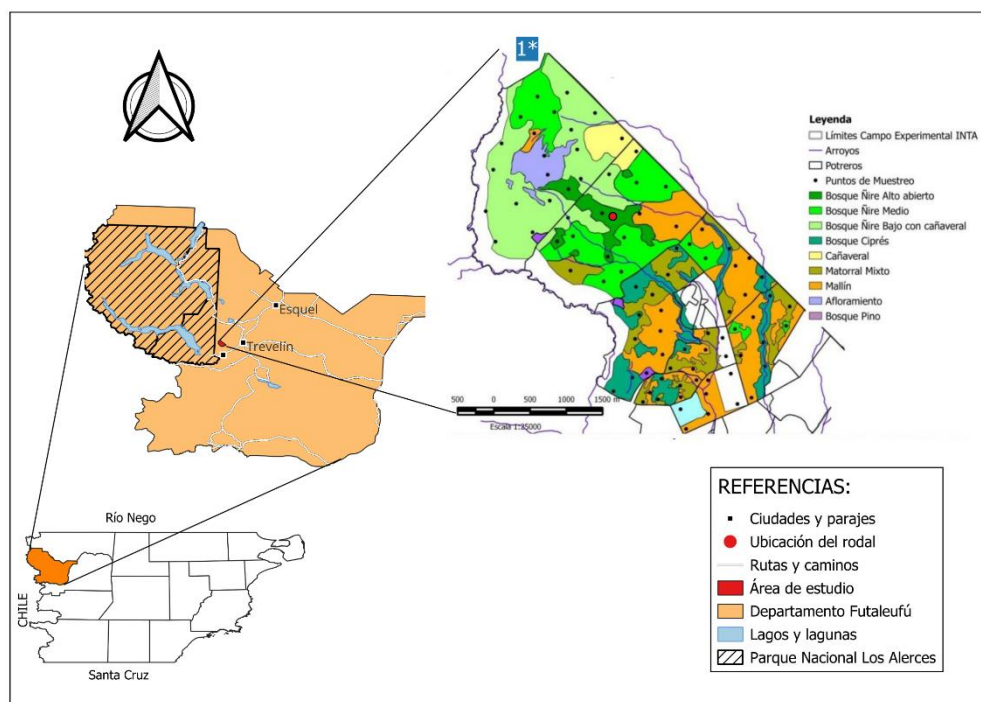


Figura 1. Ubicación del rodal con bosque de ñire alto, “Veranada Trevor” (Latitud: 43°04’57.72”S; Longitud: 71°33’27”O).

Fuente: ^{1*} Figura tomada de la Tesis de Doctorado de Martínez, M.N. (2024).

2.1.1. Selección y Corta de los Árboles

Se cortaron un total de 15 árboles dominantes y codominantes pertenecientes a un rodal clasificado como 'Bosque Ñire Alto Abierto', cuyos DAP se encontraban entre los 16,5 cm y 23 cm. Luego, se trozaron a 2,50 m de longitud, generando 20 trozas, que fueron trasladadas al aserradero. La Tabla 1 muestra las características del material obtenido.

Tabla 1. Datos de las trozas obtenidas de los quince árboles de ñire.

	Valores
Cantidad de trozas	20
DAP medio (cm)	18,5
Diámetro mínimo (cm)	12,0
Diámetro máximo (cm)	28,5
Largo (m)	2,5
Volumen promedio (m ³)	0,025
Volumen total (m ³)	0,500

2.2. Aserrío y Secado

El proceso de aserrado se efectuó mediante una sierra principal marca Polongy, con un diámetro de 1,20 m. La máquina contaba con un carro neumático de tres columnas y era alimentada por una mesa de entrada traccionada de tres líneas y 8 m de longitud.

Las 20 trozas se aserrearón siguiendo un esquema de corte tipo sandwich (Figura 2). De esta operación se obtuvieron 19 tablonés de 63 mm de grosor por 2,50 m de largos (corte radial), 33 tablas de 33 mm de espesor por 2,50 m de longitud (corte tangencial), así como 14 cantoneras (Figura 3.A)

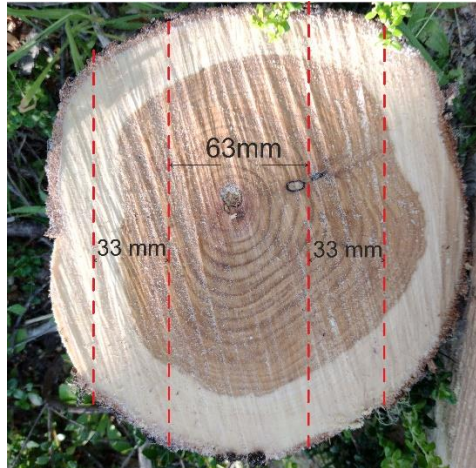


Figura 2 . Esquema de corte tipo sandwich, 2 piezas de 33 mm y 1 pieza de 63 mm de espesor.

Una vez aserradas, las piezas marcadas con el número de troza, fueron estibadas bajo techo para su secado (Figura 3.B).



Figura 3. A) Tablas recién aserradas. B) Estiba de secado natural del material aserrado con separadores de maderas de 1 pulgada.

A fin de monitorear el proceso de secado, se instalaron electrodos a diferentes alturas de la estiba, los cuales permitieron medir el contenido de humedad utilizando un xilohigrómetro digital marca FMC (Figura 4.A). Este seguimiento continuo se prolongó hasta alcanzar un contenido inferior al 18%. Una vez estabilizada la humedad, el material fue trasladado al laboratorio de tecnología para equilibrar su

contenido con las condiciones ambientales del laboratorio (Figura 4.B). Previo a este proceso y para garantizar la calidad de las probetas, se llevó a cabo un minucioso descarte de material que presentaba defectos.

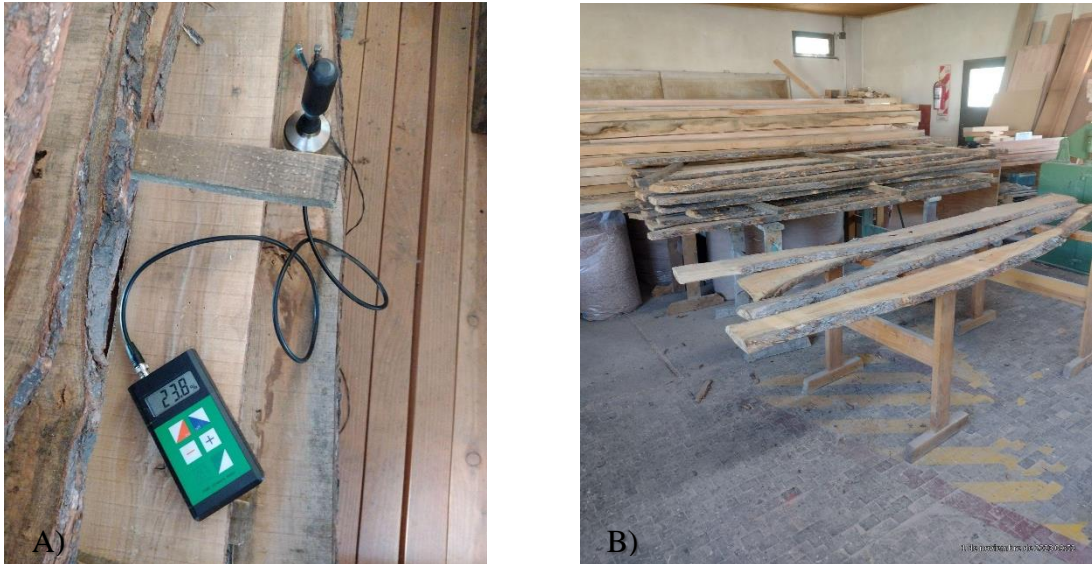


Figura 4. A) Xilohigrómetro FMC, utilizado para el monitoreo del CH. B) Material seco dispuesto en la carpintería del CIEFAP ante de la elaboración de probeta para ensayos.

La Tabla 2 se describe la cantidad de probeta que se esperaba construir con sus dimensiones finales por de las mismas.

Tabla 2. Cantidad y dimensiones de probetas por ensayo y posición del leño.

Ensayo	Cantidad	Dimensiones (cm)	Posición del leño
Densidad	20	2,5 x 2,5 x 2,5	Duramen
Densidad	20	2,5 x 2,5 x 2,5	Albura
Contracción	20	2,0 x 2,0 x 1,5	Duramen
Contracción	20	2,0 x 2,0 x 1,5	Albura
Dureza	20	5,0 x 5,0 x 15,0	Duramen
Dureza	20	5,0 x 5,0 x 15,0	Albura
Caracterización macroscópica	20	1,0 x 8,0 x 15,0	Duramen
Caracterización macroscópica	20	1,0 x 8,0 x 15,0	Albura
Cepillado	20	5,0 x 10,0 x 80,0	
Lijado	20	4,2 x 10,0 x 30,2	
Taladrado	20	4,2 x 10,0 x 30,2	

Durante la elaboración de las probetas, fue necesario modificar la cantidad prevista en el plan de corta original, especialmente en lo que respecta a las piezas grandes (dureza, caracterización macroscópica y trabajabilidad), ya que estas no estaban libres de defectos (Tabla 3). A pesar de haber cambiado el número de

probeta, no se observaron cambios significativos en los resultados de los ensayos.

Tabla 3. Cantidad de probeta obtenida por ensayos.

Ensayos	Cantidad obtenida
Densidad	20
Contracción	20
Dureza	17
Caracterización macroscópica	15
Trabajabilidad	16

2.3. Características Macroscópicas

A partir de las maderas seleccionadas conforme a la norma COPANT 458 (Comisión Panamericana de Normas Técnicas, 1972), se confeccionaron probetas prismáticas rectangulares de 1 cm x 8 cm de sección transversal y 10 cm de longitud para su posterior análisis macroscópico. Las piezas se clasificaron en secciones radiales y tangenciales.

La caracterización macroscópica del diseño, porosidad, brillo y textura se realizó a ojo desnudo y con ayuda de lente de mano 10x. Se determinó el color a partir de la comparación con la tabla Munsell Soil Color Charts (Munsell Color, 1990).

2.4. Propiedades Físicas

La investigación sobre las propiedades físicas de la madera de ñire se enfocó en determinar la densidad básica, anhidra y normal, así como las contracciones radiales y tangenciales.

2.4.1. Densidad Básica, Anhidra y Normal en Albura y Duramen

La determinación de la densidad básica (P), anhidra (P_0) y normal (P_{12}), se realizó siguiendo la norma ISO 3131 (International Organization for Standardization, 1975). Para ello, se emplearon probetas cúbicas de tamaño de 2,5 cm x 2,5 cm x 2,5 cm, libres de defectos, obtenidos de 15 árboles. Se seleccionó una muestra aleatoria de 40 probetas para asegurar la representatividad del material. Estas se dividieron en dos grupos de 20 cada uno: albura y duramen (Figura 5). Cada probeta fue identificada con una letra y un número, y se marcó con una equis (X) el centro de cada sección para indicar el punto de medición. Las tres secciones de cada probeta se numeraron (1, 2, 3) para garantizar la repetitividad de las mediciones en el mismo orden (Figura 6).

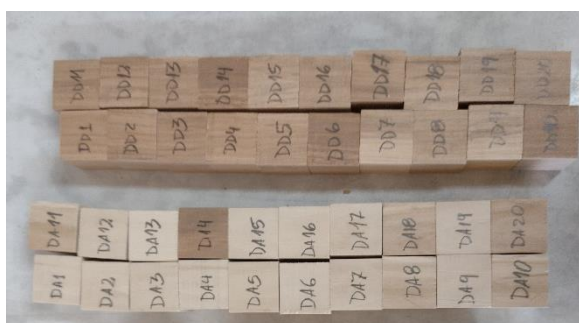


Figura 5. Probetas utilizadas en los ensayos de densidad separadas por albura (DA) y duramen (DD).

Seguidamente, las probetas se depositaron en el laboratorio de ensayos físico y mecánicos del CIEFAP para equilibrar su contenido de humedad con el ambiente.

Alcanzado este último proceso, se procedió a pesirlas, utilizando una balanza de precisión 0.01g marca Ohaus. A continuación, se registraron las dimensiones de cada probeta mediante un micrómetro marca Mitutoyo de precisión de 0,001 mm.

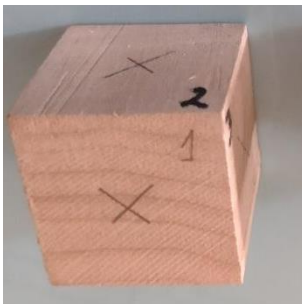


Figura 6. Probeta marcada en sus ejes de simetrías y rotulado con número para indicar la secuencia de medición.

Posteriormente, las probetas se secaron en una estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ hasta alcanzar un peso constante. Una vez que alcanzaron el estado anhidro, se enfriaron en un recipiente hermético con material desecante, y se determinó nuevamente su peso y la longitud de cada una de sus secciones.

Por último, las probetas fueron sumergidas en agua en una campana de vacío para saturarlas. Este proceso consistió en ciclos de vacío y no vacío para favorecer la entrada de agua al interior de la madera y lograr el estado de saturación total. Los dispositivos utilizados fueron una campana de vidrio una bomba de vacío (Figura 7).

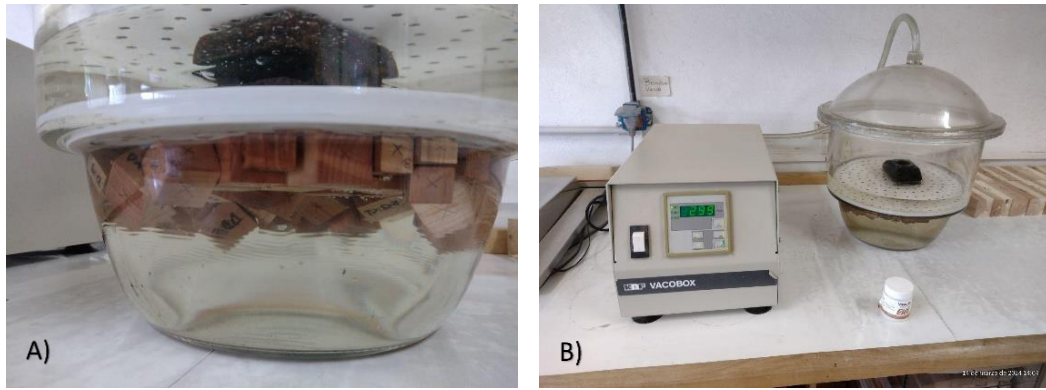


Figura 7. A) Probetas sumergidas en agua. B) Campana y bomba de vacío.

Las probetas fueron pesadas y medidas de manera rápida y meticulosa, registrándose los resultados en planillas.

El contenido de humedad (CH) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$CH (\%) = \frac{Ph - Pa}{Pa} \times 100$$

Dónde:

CH : Contenido de Humedad, en porcentaje.

Ph: Peso húmedo, en gramo.

Pa: Peso anhidro, en gramos.

Para el cálculo de la densidad básica (ρ_y) se utilizó la siguiente fórmula:

$$\rho_y = \frac{m_0}{a_s \times b_s \times l_s} = \frac{m_0}{V_s}$$

Donde:

m_0 : es la masa, en gramos, de la probeta en condiciones anhidra.

a_s , b_s y l_s : son las dimensiones, en centímetros, de la probeta en condición saturada.

V_s : es el volumen, en centímetros cúbicos, de la probeta en condición saturada.

La densidad anhidra (ρ_0) de cada probeta en estado absolutamente seco viene dada en gramos por centímetro cúbico, calculada mediante la fórmula:

$$\rho_0 = \frac{m_0}{a_0 \times b_0 \times l_0} = \frac{m_0}{V_0}$$

Donde:

m_0 : es la masa, en gramos, de la probeta en condición anhidra;

a_0 , b_0 y l_0 : son las dimensiones, en centímetros, de la probeta en condición anhidra;

V_0 : es el volumen, en centímetros cúbicos, de la probeta en condición anhidra.

La densidad normal (ρ_w) de cada probeta se calculó por la fórmula:

$$\rho_w = \frac{m_w}{a_w \times b_w \times l_w} = \frac{m_w}{V_w}$$

Donde:

m_w : es la masa, en gramos, de la probeta con un contenido de humedad W .

a_w , b_w y l_w : son las dimensiones, en centímetros, de la probeta con un contenido de humedad W .

V_w : es el volumen, en centímetros cúbicos, de la probeta con el contenido de humedad W .

W : es el contenido de humedad de la probeta al momento del ensayo en porcentaje (%).

Dado que el contenido de humedad de las probetas en equilibrio en el laboratorio fue de 8,5 %, la densidad normal (ρ_w) se ajustó mediante la siguiente fórmula, válida para un contenido de humedad del 7 al 17%:

$$\rho_{12} = \rho_w \times \left[1 - \frac{(1 - K)(W - 12)}{100} \right]$$

Donde:

K : es el coeficiente de contracción volumétrica para un cambio en el contenido de humedad del 1%. El valor de K que se toma es 0,85.

W : el contenido de humedad al momento del ensayo en porcentaje (%).

2.4.2. Índice de Contracción

Las contracciones se determinaron de acuerdo con la norma ISO 4469 (International Organization for Standardization, 1981). Para ello, se utilizaron probetas prismas rectangulares de 2,0 cm x 2,0 cm y una longitud de 1,5 cm a lo largo de la fibra. Se seleccionó una muestra aleatoria de 40 probetas para garantizar la representatividad de la muestra. Cada probeta fue identificada con un número y una letra, diferenciando la albura del duramen con una letra. Se marcó una equis (X) en cada cara de la probeta para asegurar que las mediciones se realizaran siempre en el mismo punto (Figura 8).

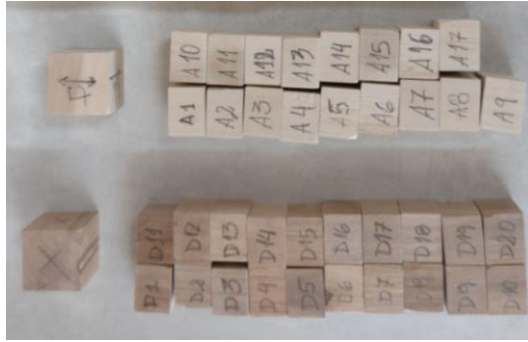


Figura 8. Probetas separadas en albura y duramen con sus rótulos de identificación.

Una vez elaboradas, las probetas fueron acondicionadas en el laboratorio. Posteriormente, se midieron en la parte central de las caras radial, tangencial y longitudinal utilizando un micrómetro digital con una precisión de 0,001 mm (Figura 9).



Figura 9. Micrómetro marca Mitutoyo, precisión de 0,001 mm.

Seguidamente, el material fue colocado en horno a una temperatura de 103 \pm 2°C hasta alcanzar un peso constante. Una vez que alcanzaron el estado anhidro, se enfriaron en un recipiente hermético con material desecante, y se determinó

nuevamente su peso y la longitud de cada una de sus secciones.

Para concluir este ensayo, se llevó a cabo el proceso de saturación de la fibra en todas las probetas, procedimiento que fue detallado en el ensayo de densidad.

Para la determinación de las contracciones se utilizaron las siguientes fórmulas:

a) Para el sentido radial:

$$CR = \frac{l_{r \max} - l_{r \min}}{l_{r \max}} \times 100$$

b) Para el sentido tangencial:

$$CT = \frac{l_{t \max} - l_{t \min}}{l_{t \max}} \times 100$$

l_r : sección radial.

l_t : sección tangencial.

$l_{r \max}$ y $l_{t \max}$: son las dimensiones en milímetros de las probetas en estado saturado con un contenido de humedad por encima del punto de saturación de la fibra, medición de la sección radial y tangencial respectivamente.

$l_{r \min}$ y $l_{t \min}$: son las dimensiones en milímetros de las probetas en estado anhidro, medición de la sección radial y tangencial respectivamente (l_r : radial; l_t : tangencial).

2.5. Determinación de la Dureza Janka

Para llevar a cabo los ensayos de dureza se adoptó la metodología establecida por la Norma ASTM D143-09 (American Society for Testing and Materials, 2010). Para ello se utilizaron probetas de dimensiones de 5,0 cm x 5,0 cm de sección tangencial y 15,0 cm de longitud siguiendo el sentido del grano

El ensayo se realizó en el Laboratorio del Área de Tecnología de la Madera del Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico (CIEFAP), utilizando una máquina universal de ensayo *Servo Control Universal Testing Machine SM* de 5 toneladas, con una precisión de 0,1 kg (Figura 10).

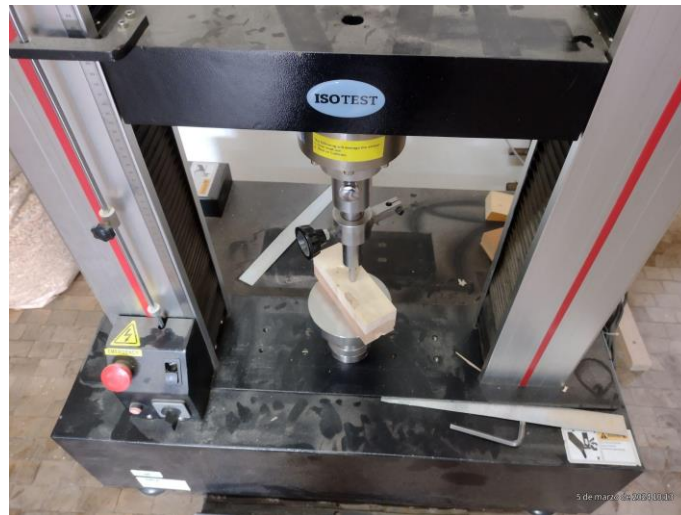


Figura 10. Máquina universal de Servo Control Universal Testin Machine SM de 5 toneladas.

Para el control de la presa Servo Control Universal y el registro de datos, se utilizó el software Any Test Standard, versión 2.19.46.104 (Figura 11).



Figura 11. Software que controla el mecanismo de la presa y registra la fuerza en kilogramos.

El ensayo consistió en hundir sobre la probeta la mitad de una bola de acero de 1 cm² de superficie, dos veces en cada una de las caras radiales y tangenciales, y una en cada extremo de la probeta (Figura 12).



Figura 12. Determinación de la dureza del duramen de la cara transversal de una probeta mediante el ensayo de penetración de una bola de acero.

Previamente, se identificó cada muestra con un número, y al finalizar la prueba, se determinó su contenido de humedad mediante secado a estado anhidro, valor que fue utilizado para ajustar los resultados del ensayo a un CH de 12%, según lo establece el Laboratorio de Productos Forestales de los EE.UU., citado por Coronel, 1996, que estima que por cada 1% de aumento en la humedad, se produce una disminución del 4% en el valor de la dureza paralela a las fibras y una reducción del 2,5% en los valores de la dureza transversal a las fibras.

El resultado de la dureza en cada caso se expresó como la carga en kilogramos obtenida durante el ensayo.

2.6. Determinación de las Propiedades de Trabajabilidad

Los ensayos para la determinación de las propiedades de trabajabilidad fueron llevados a cabo de acuerdo con la norma ASTM D1666 (American Society for Testing and Materials, 2004). Para tal fin, se llevaron a cabo ensayos de cepillado, lijado y taladrado. Estas pruebas se realizaron empleando máquinas y herramientas de corte disponibles en la carpintería del CIEFAP.

2.6.1. Cepillado

Siguiendo las especificaciones de la norma antes mencionada, se elaboraron probetas cúbicas rectangulares de tamaño 50 mm x 100 mm x 800 mm. Posteriormente, fueron identificadas con un número y estacionadas dentro del laboratorio hasta alcanzar un contenido de humedad promedio del 10,2%, momento en el cual se efectuó el ensayo.

Para el ensayo se empleó una cepilladora regruesadora Martin T44 (Figura 13). Esta máquina contaba con un motor de 7,5 kW, un ancho de cepillo de 63 cm, eje porta cuchilla de 125 mm y una velocidad de giro de 5000 RPM. La mesa de entrada ajustable hasta una altura de 0,1 mm, sistema de alimentación mecánica con rodillos, con dos velocidades de avance: 6 y 12 m/min.



Figura 13. Cepilladora regruesadora Martin T44 de la carpintería del CIEFAP

El proceso de cepillado consistió en la ubicación de las 16 probetas en la boca de entrada de la cepilladora, las cuales fueron introducidas de manera ordenada y consecutiva. El cepillado se llevó a cabo dos velocidades de avance: la primera de 6 m/min y la segunda a 12 m/min. Ambas caras de las piezas fueron cepilladas en cada una de estas velocidades

La evaluación de la severidad de los defectos resultantes del cepillado, se llevó a cabo siguiendo los criterios establecidos en la norma ASTM D1666 (American Society for Testing and Materials, 2004), expuesta en la Tabla 4. Tabla extraída de Machuca-Velasco et al (2012).

Tabla 4. Calificación de la severidad de los defectos.

Grado	Condición	Descripción
1	Excelente	Libres de defectos
2	Buena	Con defectos superficiales que pueden ser eliminados con lija del número 100.
3	Regular	Con defectos marcados que pueden ser eliminados

		utilizando una lija gruesa del número 60 y después una lija fina del número 100.
4	Pobre	Con defectos muy severos que para ser eliminados se requiere trabajar de nuevo la pieza de madera.
5	Muy pobre	Con defectos muy severos que para ser eliminado es necesario sanear la pieza de madera.

*Fuente: ASTM D 1966-1987 (ASTM, 1992, como se cita en Machuca-Velasco, 2012)

La trabajabilidad de la madera se calculó mediante la suma total de piezas calificadas como excelentes (E) y buenas (B), ubicando el resultado dentro la clasificación establecida en la Tabla 5.

Tabla 5. Clasificación de la trabajabilidad de la madera. Porcentaje de pieza excelente (E); Porcentaje de pieza buena (B).

E + B (%)	Clasificación
90 - 100	Excelente
80 - 89	Buena
60 - 79	Regular
40 - 59	Pobre
0 - 40	Muy pobre

*Fuente: ASTM D 1966-87 (ASTM, 1992, como se cita en Machuca-Velasco, 2012)

Por último, se calculó el número de marca de cuchillas por centímetro con la siguiente formula:

$$NMC = \frac{Vc * Nc}{Va * 100}$$

Donde:

NMC: Número de marcas de cuchillas por centímetro

Vc: Velocidad del cabezal porta cuchillas (RPM)

Nc: Número de cuchillas en el cabezal

Va: Velocidad de alimentación ($m \text{ min}^{-1}$)

Para el ensayo de cepillado, se llevaron a cabo cuatro combinaciones de ensayo de cepillado, que se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Número de marcas de cuchillas por cm (NMC), velocidad de giro del cabezal, número de cuchillas, ángulo de corte, velocidad de avance y dirección de la fibra por combinación de ensayo.

Combinación de ensayo	Dirección de la fibra	Velocidad de avance (m/min)	Ángulo	Número	Velocidad	NMC
			de corte (°)	de cuchillas	de giro del cabezal (RPM)	
1	A favor	6	15	4	5000	33,3
2	En contra	6	15	4	5000	33,3
3	A favor	12	15	4	5000	16,7
4	En contra	12	15	4	5000	16,7

2.6.2. Lijado

Este ensayo se realizó sobre probetas rectangulares de dimensión 42x10x302, conforme a la norma especificada. Se empleó lijadora eléctrica DeWalt DW433-AR tipo 1 de 800 watts y de 5,4 kg (Figura 14). La velocidad de la banda es variable, oscilando entre 259 y 427 m/min. Se utilizaron dos granulometrías de lija: 80 y 120.

Previo al ensayo, se determinó la cantidad de pasadas necesarias para eliminar 1 milímetro de espesor, utilizando únicamente el peso de la máquina. Con una lija de grano de 80. Se requirieron 5 pasadas para alcanzar el resultado deseado.

Posteriormente, se lijaron las 16 probetas y al finalizar se inspeccionó minuciosamente la superficie en busca de defectos, registrándose tanto la presencia como la severidad de cada defecto, considerando la escala de calificación establecida en la Tabla 3, utilizada en los ensayos de cepillado. Este procedimiento se hizo también empleando lija de grano 120.

La calidad del lijado fue evaluada mediante la suma de las piezas calificadas como excelentes (E) y buenas (B). El resultado obtenido se comparó con la clasificación de trabajabilidad presentada en la Tabla 5, permitiendo determinar la categoría correspondiente.



Figura 14. Lijadora eléctrica de banda profesional.

2.6.3. Taladrado

La determinación de la respuesta de la especie al taladrado se llevó a cabo con probetas de 40 mm x 100 mm x 302 mm, elaborada en base a la norma indicada. Para realizar este ensayo, se empleó un taladro de banco marca “Barbero”, de 1/2HP, de cuatros velocidades: 430, 830, 1340 y 2100 RPM, (Figura 15).



Figura 15. Taladro de banco marca barbero con un motor de ½ HP de potencia.

Como herramienta de corte se seleccionó una broca Forstner de 20 mm (Figura 16), que fue seleccionada en cumplimiento con las especificaciones técnicas básicas de la norma ASTM.

Previo a los ensayos, se determinó experimentalmente la tasa de avance de penetración de la broca a diferentes velocidades de giro utilizando un cronómetro digital. A 430 RPM se requirieron 30 segundo para perforar, mientras que a 2100 RPM, 15 segundos.



Figura 16. Broca Forstner de punta de carburo de tungsteno; dos filos de corte: principal y periférico

Durante los ensayos, las probetas se sujetaron a una plantilla en la mesa del taladro mediante una prensa tipo C, lo cual permitió realizar las perforaciones de manera limpia y precisa (Figura 17).

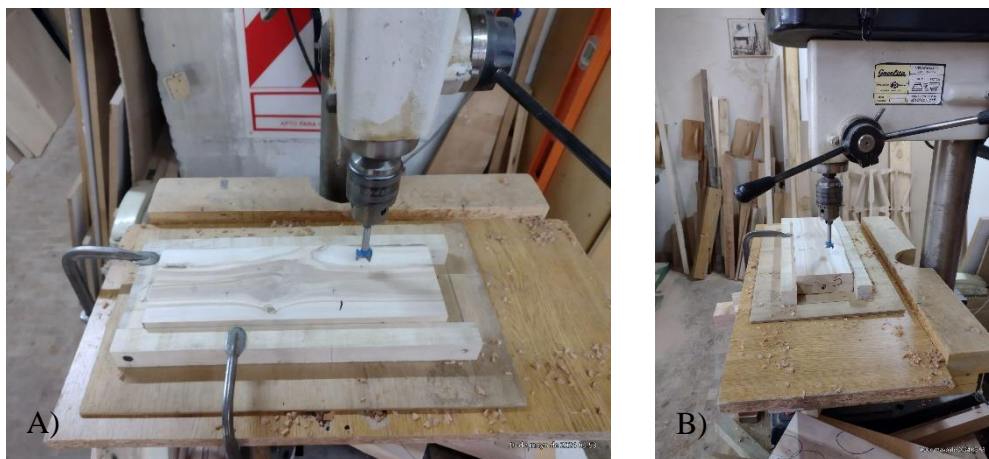


Figura 17. A) Taladro de mesa con el molde sujetador de probeta. B) Vista lateral del taladro con el molde sujetado con prensa C.

Se evaluaron dos velocidades de rotación de broca (430 y 2100 RPM), efectuando dos perforaciones por probetas (Figura 18).



Figura 18. Ubicación de las perforaciones por brocas.

Posteriormente, se evaluó y registró la calidad del taladrado de cada perforación teniendo en cuenta la Tabla 3 y 4.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Aserrío y Secado

Si bien este estudio no consideró dentro de los objetivos evaluar el proceso de aserrío ni la calidad general de la materia prima, la madera aserrada y el secado natural, se considera procedente hacer referencia al tema, en virtud de lo observado durante el desarrollo del trabajo.

El proceso de aserrado presentó limitaciones fundamentalmente debido a las características de la materia prima (diámetro, largo y forma de las trozas) y en menor medida a la tecnológica de aserrío disponible, ya que la misma está diseñada para procesar rollizos de diámetros y largos mayores.

En la



Figura 19 se puede observar el material aserrado obtenido para la determinación de las propiedades, pero es necesario resaltar la característica del mismo en término de forma, perforaciones causadas por insectos, así como nudos y signos de pudrición.



Figura 19. Material aserrado de espesor.

En cuanto al secado natural la madera de ñire requirió 12 meses para alcanzar un contenido de humedad inferior al 20%, seguido de 5 meses adicionales para que la humedad en el interior de la madera se estabilizara. Es importante señalar que las tablas conservaron la corteza durante el secado.

3.2. Características Macroscópicas

3.2.1. Albura

El color de la albura es blanco-rosáceo (10 YR 8/2) a color amarillo suave-rosáceo. En la sección transversal se observaron, con aumento de 10x, poros pequeños con un patrón de porosidad difusa. No fue posible distinguir el parénquima leñoso, incluso con la ayuda de aumento. La sección radial presentó un diseño rayado, conforme a la compresión del leño tardío. No se observó jaspeado. El brillo es suave dado por el contraste de los pequeños radios parenquimatosos, sólo observable con aumento de 8x. La sección tangencial presentó un suave floreado por

la compresión del leño tardío (Figura 20), textura fina y homogénea y grano de recto a ligeramente oblicuo.

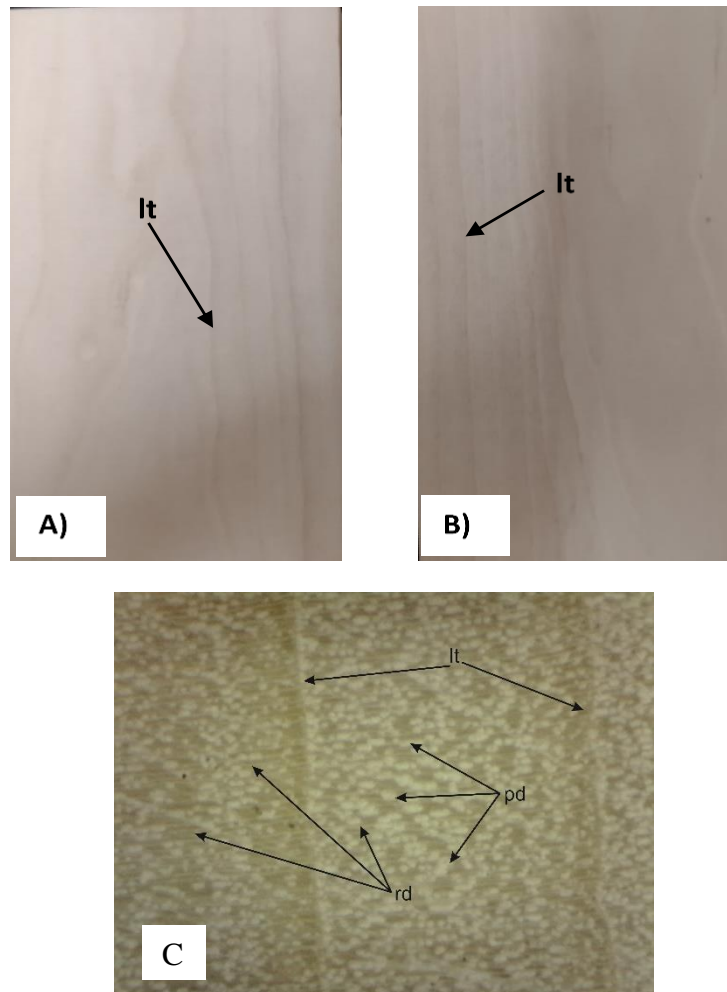


Figura 20. Muestras macroscópicas de albura de *N. antarctica*. A) Sección tangencial tamaño natural. Se aprecia un diseño floreado dado por la compresión del leño tardío (lt). B) Sección radial tamaño natural. Se observa un diseño rayado por la compresión del leño tardío. C) Sección transversal 50 x. Anillo de crecimiento demarcado por la compresión del leño tardío (lt), porosidad difusa solitarios a múltiples (pd) y radios angostos (rd).

3.2.2. Duramen

El duramen es de color marrón rojizo claro (7,5YR 6/4) que puede virar a un color rosado oscuro en función se exponga a la luz. En sección transversal se observó

porosidad difusa, sin presencia de parénquimas. En la cara radial presentó un diseño rayado producto de la compresión del leño tardío. También se observó un brillo suave generado por los radios parenquimáticos de tamaño pequeños, solo visible con aumento. En la cara tangencial se pudo observar un diseño floreado poco pronunciado, brindado por la compresión del leño tardío. Posee una textura fina y homogénea. El grano que presenta es derecho a algo oblicuo (Figura 21).

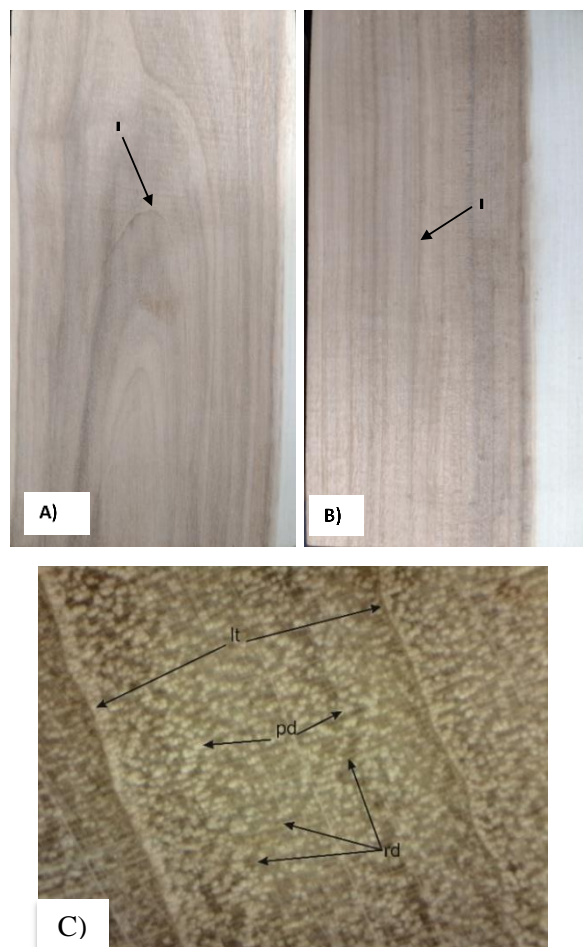


Figura 21. Muestra macroscópica de duramen de *N. antarctica*. A) Sección tangencial tamaño natural. Se aprecia un diseño floreado dado por la compresión del leño tardío (lt). B) Sección radial tamaño natural. Se observa un diseño rayado por la compresión del leño tardío. ac = anillo de crecimiento; lt = leño tardío. C) Sección transversal 50 x. Anillo de crecimiento demarcado por la compresión del leño tardío (lt), porosidad difusa solitarios a múltiples (pd) y radios angostos (rd).

3.3. Propiedades Físicas

3.3.1.1 Densidad Básica, Anhidra y Normal

La densidad básica promedio del duramen de ñire fue de 0,563 g/cm³ y de 0,558 g/cm³ en la albura, lo que representa una diferencia de 0,9% a favor del duramen. La densidad anhidra, por su parte, se registró un valor de 0,603 g/cm³ para el duramen y 0,599 g/cm³ en la albura, siendo un 0,7% superior en el duramen. En cuanto a la densidad normal (12% de humedad), se determinó un valor de 0,635 g/cm³ para el duramen y de 0,631 g/cm³ para la albura, evidenciando una superioridad del 2,98% en el duramen respecto a la albura (Tabla 7).

Tabla 7. Resultados de la media, desvió estándar (D. std.), coeficiente de variación (Cf. Var.) y Cantidad de probetas (N) por densidad básica, densidad anhidra y densidad normal.

	N	Media (g/cm ³)	D. std. (g/cm ³)	Cf. Var. (%)
Densidad básica (g/cm ³)	40	0,561	0,037	6,56
Densidad anhidra (g/cm ³)	40	0,601	0,033	5,54
Densidad normal (g/cm ³)	40	0,633	0,036	5,62

Los coeficientes de variación de las densidades básica, anhidra y normal fueron de 6,56 %, 5,54 %, 5,62 %, respectivamente. Estos valores se consideran bajos, indicando una baja variabilidad y, por lo tanto, una alta homogeneidad en los datos.

La ficha técnica del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (Martinuzzi, 2007) presentó los siguientes valores de densidad normal para especies del genero

Nothofagus: lenga con 0,580 g/cm³, raulí con 0,600 g/cm³ y roble pellín con 0,720 g/cm³. Al analizar los datos obtenidos en el ensayo de densidad normal, se determinó que el *ñire* posee una densidad que lo sitúa en la categoría de las maderas semipesadas, específicamente entre valores correspondientes al *raulí* y al *roble pellín*.

3.3.1.2 Índice de Contracción

Los índices de contracción resultantes de los ensayos realizados se presentan en la Tabla 8. Valores de contracción para *ñire* muestran que en sentido radial fue de 3,8%, en sentido tangencial 9,7%, y la contracción volumétrica 14,3%.

Tabla 8. Resultado de la contracción media, desvío estándar (D. std.), coeficiente de variación (Cf. Var.) y Cantidad de probetas (N) por Contracción radial (CR), Contracción tangencial (CT) y Contracción volumétrica (CV).

	N	Media (%)	D. std (%)	Cf. Var. (%)
CR	37	3,8	0,58	15,31
CT	37	9,7	1,60	16,56
CV	37	14,3	1,48	10,34

Los resultados obtenidos permitieron resaltar las variaciones existentes con los datos recopilados por diferentes autores para especies del mismo género. Según Martinuzzi (2007), presenta valores de contracciones radiales para el raulí de 3,3% y el roble pellín de 4,1%, revelando que la contracción del *ñire* se encuentra entre ambas especies.

En cuanto a la contracción tangencial, el mismo autor, presento valores para el roble pellín de 8,3%, la lenga de 8,0% y el raulí de 7,1%. La contracción del ñire resulto ser más alta que de las especies mencionadas. Finalmente, el ñire presento la mayor contracción volumétrica, superando a la lenga (14,2%), el roble pellín (12,9%) y el raulí (10,2%), de acuerdo con los datos reportados por Martinuzzi (2007) para estas tres últimas especies.

En cuanto al índice de contractibilidad, calculada por la relación CT/CR, resulto para el ñire de 2,55; comparando con los valores de otras especies estudiada por Martinuzzi (2007), como lenga de 1,66, el raulí de 1,86 y el roble pellin de 2,02, el ñire resulto ser superior. Por otra parte, según Coronel (1994), valores superiores al 2% implica una mayor tendencia de la madera a encogerse, lo que genera limitaciones para ciertos usos de la madera como aberturas y puertas.

3.4. Dureza

En la sección radial, la dureza promedio fue de 412,94 kg/cm², mientras que en la sección tangencial fue registrado un valor de 439,65 kg/cm². Por otro lado, en la sección transversal se registró el máximo valor promedio de 522,55 kg/cm², superior al resto de las secciones anteriormente mencionadas (Tabla 9).

De esta manera, al considerar el valor de dureza promedio de las tres secciones el ñire se clasifica como una madera semidura, según la escala de dureza propuesta por García y García, con un valor promedio de 446,76 kg/cm² (García y García, citado por Tortorelli, 2009).

Tabla 9. Dureza media, desvió estándar (D. std.), coeficiente de variación (Cf. Var.) y cantidad de probetas (N) por secciones (radial, tangencial y transversal) y general.

		Media	D. std.	Cf. Var.
Sección	N	(kg/cm²)	(kg/cm²)	(%)
Radial	32	412,94	61,90	14,99
Tangencial	29	439,65	61,90	14,08
Transversal	17	522,55	52,68	10,08
Promedio	78	446,76		

Al comparar el valor promedio de dureza obtenido con los datos proporcionados por Tortollerilli (2009) sobre especies del género *Nothofagus*, se puede apreciar que la madera de ñire (446,76 kg/cm²) se sitúa entre la lenga, que presenta un valor de 407 kg/cm², y el *roble pellin*, con un valor de 505 kg/cm².

3.5. Propiedades de Trabajabilidad

3.5.1. Cepillado

La Tabla 6 muestra los resultados de calidad de trabajabilidad, porcentajes de E+B, cantidad de probetas E+B, cantidad de probetas ensayadas en función a cuatros combinaciones (dirección de la fibra y NMC)

El ensayo reveló que la combinación 1, a favor de la fibra y 33,3 NMC, logró el mejor resultado en términos de calidad de trabajabilidad, regular (62,5%). Este hallazgo contrasta notablemente con los resultados de las demás combinaciones, los cuales presentaron una calidad de trabajabilidad muy deficiente (Tabla 10).

Tabla 10. Calificación de la trabajabilidad del cepillado, suma de porcentaje de probetas (E+B), cantidad de probetas E+B: excelente (E) y buena (B), cantidad total de probeta (N), número de marcas de cuchillas por cm (NMC), dirección de la fibra en función de las 4 combinaciones de ensayo.

Combinación	Dirección de la fibra	NMC	N	Cantidad de probetas		Calificación de la trabajabilidad
				E+B	E+B (%)	
1	A favor	33,3	16	10	62,5	Regular
2	En contra	33,3	16	4	25,0	Muy pobre
3	A favor	16,7	16	3	18,8	Muy pobre
4	En contra	16,7	16	3	18,8	Muy pobre

Los defectos más comunes observados en las probetas con trabajabilidad regular fueron el grano rasgado y las marcas de chip, alcanzando un grado máximo de 2, el cual puede ser corregido mediante el uso de una lija de grano 100 (Figura 22). En los demás ensayos, no se encontraron diferencias significativas entre las probetas, las cuales presentaron los mismos defectos, aunque la mayoría obtuvo una clasificada de grado de 3. Para remediar estos defectos, sería necesario utilizar lijas de grano 60 y grano 100.

Es importante destacar que la mayoría de los defectos observados en las probetas están asociados con las imperfecciones naturales de la madera, tales como nudos, pudrición y perforaciones causadas por insectos, características inherentes a la especie bajo estudio.

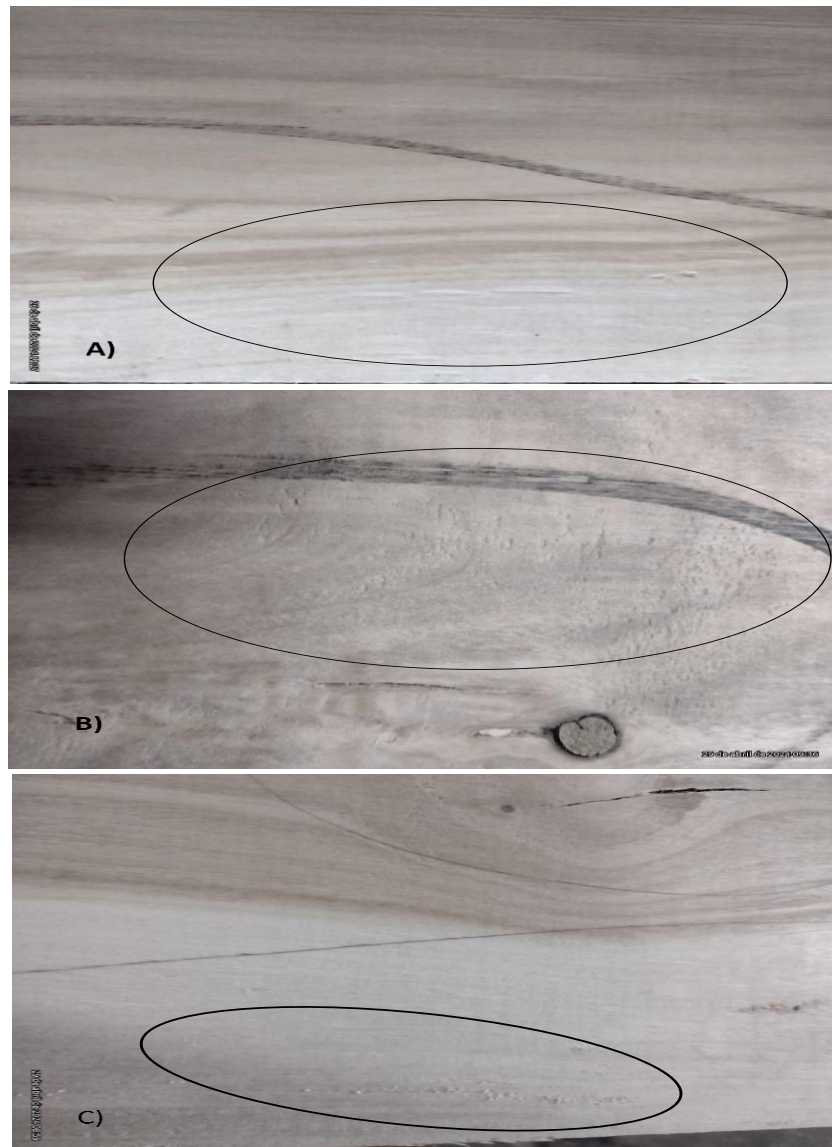


Figura 22. A) Probeta de *ñire* con defecto denominado marca de chip, calificada su severidad de grado 2. B) Probeta de *ñire* con defecto de grano desgarrado calificada con la severidad de grado 3. C) Probeta de *ñire* con defecto de grano velloso calificada con la severidad de grado 2.

3.5.2. Lijado

La tabla 11, muestran los resultados obtenidos al lijar la madera de ñire con dos tipos de granos.

Tabla 11. Calificación de la trabajabilidad del lijado, severidad, defecto, tipo de defecto, grano de lija por combinación de ensayo. Excelente (E), buena (B).

Combinación	Grano de lija	Tipo de Defecto	Defecto (%)	Severidad (Grado)	Calificación
					de la trabajabilidad (E+B)
1	80	Rayado	100	2	Excelente
	80	Pelusa	6,3	2	
2	120	Libre de defecto	100	1	Excelente

Los resultados del ensayo evidenciaron que el lijado ofreció una mejor calidad de trabajabilidad en comparación con el cepillado. Las probetas lijadas con grano 80 presentaron leves rayones (grado 2), indicando una calidad general buena (

Figura 23). Si bien se detectó un 6,3% de las probetas con un defecto de pelusa de grado 2, el 100% de las piezas estuvieron libres de otros defectos, indicando una excelente tabajabilidad general (Tabla 11).

Por otro lado, las probetas lijadas con grano 120 mostraron un acabado excelente, sin que se observaran defectos a simple vista, siendo calificadas con una trabajabilidad excelente.

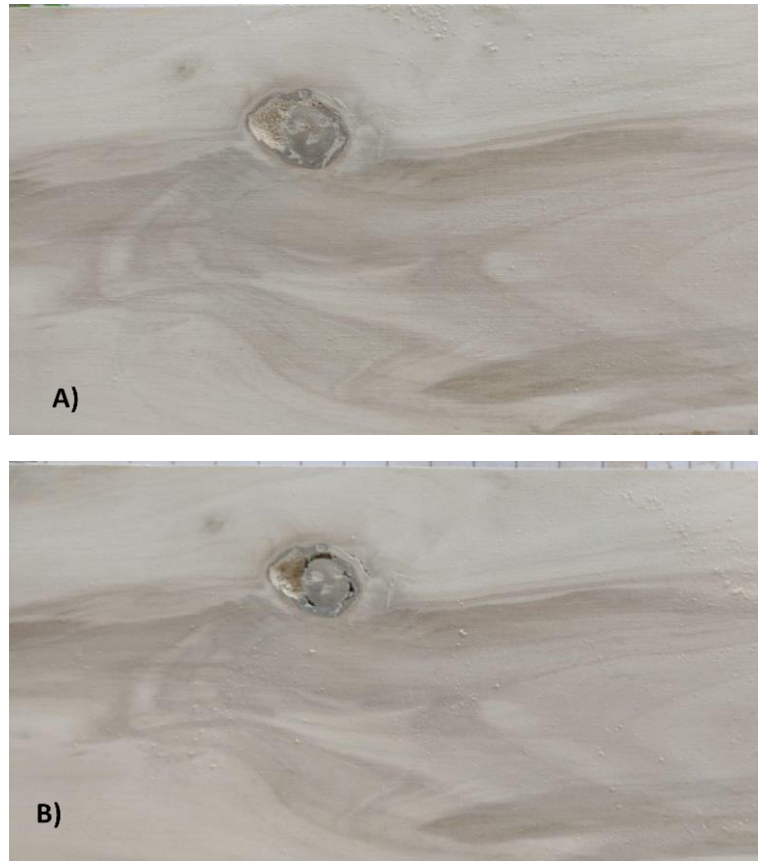


Figura 23. A) probeta mecanizada con lija de grano 80 con defecto de rayado. B) misma probeta mecanizada con lija grano 120 sin defecto.

3.5.3. Taladro:

A partir de los resultados presentados en la Tabla 12, se observó una excelente calidad de trabajabilidad en las pruebas de taladrado, pero existe una diferencia entre los ensayos realizados entre las velocidades de 2100 rpm y de 480 rpm.

Tabla 12. Calificación de la trabajabilidad de ensayo de taladrado, suma de porcentajes de excelente y bueno (E+B), cantidad de probeta libre de defecto (CPLD), tiempo de avance por velocidad de rotación. Excelente (E), buena (B).

Velocidad de rotación	Tiempo de avance		E+B (%)	Calificación de la Trabajabilidad
	(seg)	CPLD		
2100	15	29	100	Excelente
430	30	15	100	Excelente

A una velocidad de 2100 rpm, solo el 9,4% de las probetas presentó defectos clasificados como grano rasgado, con una severidad de grado 2. En contraste, al reducir la velocidad a 480 rpm, se observó un aumento significativo en la cantidad de defectos, como aspereza (40,6%) y grano rasgado (12,5), ambos con una severidad de grado 2. Estos resultados sugieren que los defectos podrían corregirse mediante un lijado posterior con lija de grano 100. Es importante destacar que la mayoría de los defectos identificados estaban asociados a nudos o perforaciones causadas por insectos. Además, en ambas pruebas, los bordes de los agujeros presentaron una terminación limpia, sin astillamiento (Figura 24).



Figura 24. A) Perforación con borde sin defecto de astillado realizado a 430 RPM. B) Perforación con borde sin defecto de astillado realizado a 2100 RPM.

El Anexo I presenta una tabla (Tabla 13) que compara los parámetros analizados para la madera ñire con los de las especies lenga, raulí y roble pellín.

4. Conclusiones

Las características macroscópicas de la madera de *Nothofagus antarctica* analizada son similares a las de otras especies del mismo género, con la excepción del color del duramen, que presentó un tono marrón rojizo oscuro, lo que la distingue.

Las propiedades físicas de la madera de ñire fueron comparables a las de las tres especies del género *Nothofagus* usadas como referencia, clasificándose como semipesada. Sin embargo, en lo que respecta a la contracción tangencial y volumétrica, mostró valores superiores a los de las demás especies de *Nothofagus*. Esto sugiere que, para aplicaciones que requieren cambios mínimos en las dimensiones, la madera de ñire no sería la opción más adecuada. Esto, se reafirma ya que el índice T/R supera a 2.

En cuanto a la dureza, la madera de ñire fue clasificada como semidura, siendo más elevada en la sección transversal en comparación con las secciones radial y tangencial. Sin embargo, su dureza no superó la del raulí ni el roble pellín.

En el cepillado, la madera presentó una trabajabilidad regular; no obstante, es importante señalar que fue difícil obtener probetas de gran tamaño y libres de defectos. Por lo tanto, los defectos de maquinado observados están relacionados, en su mayoría, con las imperfecciones naturales de la madera como nudos, entre los principales, aunque estos pueden ser eliminados mediante el uso de lija. En el lijado y el perforado los ensayos arrojaron resultados excelentes.

Aunque dentro de los objetivos planteados para este trabajo no se incluyeron aspectos relacionados al aserrío y calidad de la madera en función de defectos, durante los ensayos se observó que la especie presentó muy severas limitaciones en términos de calidad, incluso limitando el número de probetas que se habían

planificado obtener en el estudio. Y si bien no se estudiaron variables sanitarias, se pudo inferir que el uso industrial de la madera de ñire está extremadamente limitada dado la magnitud y frecuencia de perforaciones y pudriciones observadas. Este aspecto requiere una evaluación particular para futuros estudios.

Finalmente, se concluye que la madera de *N. antarctica* de bosques post-incendio posee valores en sus características físico-mecánicas y propiedades de trabajabilidad que permitirían desarrollar productos elaborados, y de mayor valor comparado a su uso actual como leña, siempre considerando las altas limitaciones derivadas de la forma de los rollizos y los defectos encontrados. Con este aspecto presente, se podría emplear en pieza parte de pequeños muebles, juguetes, artesanías y artículos de decoración, entre otros. Para ello se sugiere la incorporación de diseño industrial y estudio de mercado para potenciar sus características naturales y transformar sus defectos sanitarios en elementos de identidad.

5. Bibliografía

American Society for Testing and Materials. ASTM D 1666-1984. (2004). Standard test methods for conducting machining tests of wood and wood-base materials. In Annual Book. ASTM Standard- American Society for Testing and Materials. Philadelphia. <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D1666-87R04.htm>.

American Society for Testing and Materials. ASTM D 143-09. (2010). Standard test methods for small clear specimens of timber. In Annual Book. ASTM Standard- American Society for Testing and Materials. Philadelphia.

Baraño, J., Peñon, E., Craig, E., Cucuifo, E. y De Falco, P. (2008). Manual para la identificación de Maderas con aumento de hasta 10x. Universidad Nacional de Luján. Departamento de Tecnología. Producción Vegetal IV Dasonomía. 57p.

Bowyer, J. L., Shmulsky, R. y Haygreen, J.G. (2007). Forest products and wood science: an introduction. Fifth edition. Blackwell Publishing. 558 p.

Comisión Panamericana de Normas Técnicas. COPANT 458. (1972). Maderas - Selección y colección de muestras. Buenos Aires, Argentina.

Coronel, E. O. (1995). Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las Maderas: aspectos teóricos y prácticos para la determinación de las propiedades y sus aplicaciones. Vol. 2. Instituto de Tecnología de la Madera (ITM), Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero. 2ª Edición.

Davis, E. M. (1962). Machining and related characteristics of united states hardwoods. Technical Bulletin U. S. Department of Agriculture. Forest Service. (1267).

https://books.google.com.ar/books/about/Machining_and_Related_Characteristics_of.html?id=m78XAAAAYAAJ&redir_esc=y.

- Díaz-Vaz, O. J. E.; Devlieger Sollier, F.; Juacida Percaz, L. R. y Poblete Wilson, H. (2002). Maderas comerciales de Chile = Chilean commercial woods. Colección Naturaleza de Chile. Vol. 4. Valdivia, Chile: Marisa Cuneo, ediciones. Editorial Alborada.
- Espina Lizana, A. I. (2006). Densidad básica de la madera de *Eucaliptus globulus* en dos sitios en Chile. Trabajo de titulación. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Profesor guía: Sr. Fernando Droppelmann.
- Forest Products Laboratory. (2010). Wood handbook - wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508 p.
- International Organization for Standardization. (1975). Wood - Determination of density for physical and mechanical tests. (ISO Standard No. 3131: 1975 (E)).
- International Organization for Standardization. (1981). Wood - Wood — Determination of radial and tangential shrinkage. (ISO Standard No. 4469:1981(E)).
- Kollmann, F. y Côté, W. (1968). Principles of wood science and technology. Munich, DE: Springer-Verlang.
- Machuca-Velasco, Roberto, Borja-de la Rosa, Amparo, Morales-Villalba, Emilio, & Flores Velásquez, Rogelio. (2012). Trabajabilidad de la madera de *Pinus oaxacana* Mirov. proveniente de una plantación en el Estado de México. Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente, 18(2), 193-205 p. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.01.001>.
- Martínez Castillo, J. L. y Martínez-Pinillos Cueto, E. (1996). Características de maquinado de 32 especies de maderas. *Madera y Bosques*, 2(1). 45-61p. Retrieved 04 21, 2024, from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61720105>.

- Martinuzzi, F. (2007). Lengua. Fichas técnicas de maderas. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Madera y Muebles. <https://www.cema.com.ar/newsletter-2/fichas-tecnicas-de-maderas/>.
- Martinuzzi, F. (2007). Ñire. Fichas técnicas de maderas. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Madera y Muebles. <http://www.inti.gob.ar/maderaymuebles> verificado: 20 de junio de 2018.
- Martinuzzi, F. (2007). Raulí. Fichas técnicas de maderas. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Madera y Muebles. <https://www.cema.com.ar/newsletter-2/fichas-tecnicas-de-maderas/>.
- Martinuzzi, F. (2007). Roble Pellin. Fichas técnicas de maderas. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Madera y Muebles. <https://www.cema.com.ar/newsletter-2/fichas-tecnicas-de-maderas/>.
- Martínez M. N. (2024). Efecto de disturbios antrópicos (intervenciones silvícolas, fuego y ganadería) y sus interacciones sobre la dinámica del bosque de ñire, *Nothofagus antarctica* (G. Forster) Pokerstars), en diferentes tipos de sitio forestal bajo uso silvopastoril en la Provincia del Chubut. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional del Nordeste.
- Munsell Color. (1990). Munsell soil color charts. Edition revised. Macbeth of Kollmorgen Instruments Corporation. Maryland, Estados Unidos.
- Pastur G. M. y Soler, R. (2015). Ñire: Ñirre, char, antarctic beech. *La Lupa*: Colección fueguina de divulgación científica. Vol. 8-5. 20-24 pp. <https://www.coleccionlalupa.com.ar/index.php/lalupa/issue/view/10>.
- Puertas, S. P., Guevara Salnicov, C., Espinoza Linares, M. (2013). Manual de transformación de la madera. The international tropical timber organization. https://www.itto.int/files/itto_project_db_input/2929/Technical/Technical%20re

- port%20-%20Manual%20de%20transformacion%20de%20la%20madera.pdf.
- Sotomayor Castellanos, J. R. y Ramírez Pérez, M. (2014). Anisotropía del módulo de elasticidad y de resistencia en compresión de la madera de *Pinus michoacana*, *Pinus douglasiana* y *Pinus pringlei*. *Acta Universitaria*, 24 (5), 15-24 pp.
- Suirez, T. M. y Gilson, B. (2009). *Descripciones de las propiedades físicas y mecánicas de la madera* (1a ed.). Universitaria de la Universidad Nacional de Misiones. https://editorial.unam.edu.ar/images/documentos_digitales/f5_978-950-579-154-5.pdf.
- Tinto, J. C. (1997). *Tecnología de las maderas argentinas y del mundo*. Buenos Aires (Argentina). AGROVET. 565 p.
- Tortorelli, L. A. (2009). *Maderas y bosques argentinos*, Tomo I. 2a. edición. Orientación Gráfica Editora. Buenos Aires. 576 p.
- Winandy, J. E. (1994). Wood properties. USDA – Forest Service, Forest products Laboratory en Arntzen, Charles J., ed. *Encyclopedia of Agricultural Science*. Orlanod, FL: Academic Press: 549-561. Vol.4.
- Zavala, D. y Vázquez, M., (2001). Determinación de las características de maquinado de la madera de 34 especies tropicales. *Revista Chapingo Serie Ciencia Forestales y del Ambiente*, vol. 7, no. 2. https://revistas.chapingo.mx/forestales/revista/articulos/viewer.html?file=rchs_cfaVII361.pdf.

6. Anexo I

Tabla 13. Características de la madera de ñire comparadas con lenga, raulí y roble pellin: propiedades macroscópicas, físico-mecánicas y de trabajabilidad.

Características	Ñire	Lenga	Raulí	Roble Pellin
Color albura	Blanco rosaceo a amarillo suave-rosaceo	Blanco rosada	Amarillo rosada	Amarillo rosada
Color duramen	Marrón rojiza claro	Rosado pálido	Rosada castaño	Rosada a castaño rojizo
Brillo	Suave	Suave	Pronunciado	Suave
Textura	Fina homogénea	Fina homogénea	Fina homogénea	Fina homogénea
Diseño sección tangencial	Floreado	Floreado	Floreado	Floreado
Diseño sección radial	Rayado	Jaspeado	Veteado jaspeado	Veteado jaspeado
Densidad normal (g/cm ³)	0,633	0,580	0,600	0,720
Clasificación de peso	Semipesada	Semipesada	Semipesada	Semipesada
Contracción tangencial (%)	9,7	8,0	7,1	8,3
Contracción radial (%)	3,8	4,8	3,3	4,1
Contracción volumétrica (%)	14,3	14,2	10,2	12,9
Índice de retractibilidad T/R (%)	2,55	1,66	1,86	2,02
Dureza Janka (kg/cm ²)	446,76	407,00	610,00	505,00
Clasificación de dureza	Semidura	Semidura	Semidura	Semidura
Trabajabilidad	Cepillado: regular a muy pobre. Lijado: excelente. Taladrado: excelente.	El cepillado presenta superficie lisas y pulidas.	No presenta problemas , dando superficie lisas y pulidas.	No presenta problemas, dando superficie lisas y pulidas.

