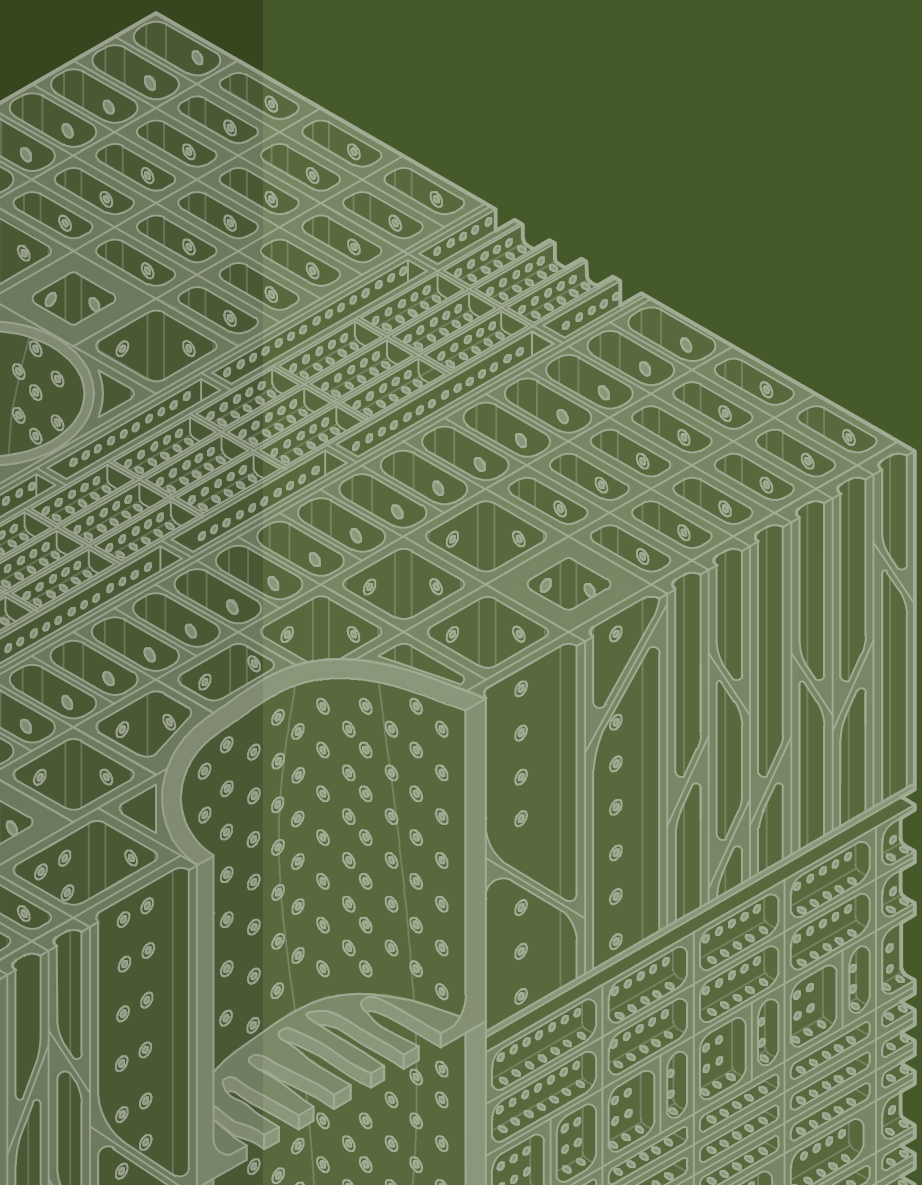
Centro UC de Innovación en Madera

Centro Nacional CENAMAD para la Industria de la Madera

Durabilidad natural de la madera:
Propiedades, clasificación y evaluación del riesgo

Tomo I



Vicente López, Josefina Marambio, María Paulina Fernández, Priscila Moraga

Vicente López, Josefina Marambio, María Paulina Fernández, Priscila Moraga

Durabilidad natural de la madera: Propiedades, clasificación y evaluación del riesgo.

Tomo I

Centro UC de Innovación en Madera
Centro Nacional CENAMAD para la Industria de la Madera

Durabilidad natural de la madera: Propiedades, clasificación y evaluación del riesgo.

Este manual fue elaborado por el Centro UC de Innovación en Madera (CIM UC) y el Centro Nacional de Excelencia para la Industria de la Madera (CENAMAD).

Cualquier reproducción total o parcial de este manual debe ser reconocido referenciando esta publicación:

Citación: *"López V., Marambio J., Fernández, M. P., Moraga-Suazo P. (2026) Durabilidad natural de la madera: Propiedades, clasificación y evaluación del riesgo. Centro UC de Innovación en Madera (CIM UC), primera edición. Santiago, Chile".*

English citation: *"López V., Marambio J., Fernández, M. P., Moraga-Suazo P. (2026) Natural Durability of Wood: Properties, Classification, and Risk Evaluation (in Spanish). Timber UC Innovation Center (CIM UC), first edition. Santiago, Chile".*

Autoría:
Vicente López
Josefina Marambio
María Paulina Fernández
Priscila Moraga

Colaboradores:
Fabiana Lorca

Diagramación:
Vanessa Naranjo

Ilustración:
Vicente López
Josefina Marambio
Catalina Gaete

Los autores, colaboradores y editores no asumen ninguna responsabilidad por cualquier daño directo o indirecto, lesión, perjuicio o pérdida que pueda producirse o sufrirse como resultado del uso, la confianza, la aplicación y/o la referencia a la información incluida en esta publicación. Consulte a su jurisdicción local o a un profesional del diseño para asegurarse de que se cumplen las disposiciones legales y ordenanzas locales de construcción.

Prefacio

En el contexto actual, marcado por la necesidad de avanzar hacia ciudades bajas en carbono y entornos más saludables, la madera emerge como un material clave para el desarrollo de una construcción más sustentable. Su origen renovable, su capacidad de almacenamiento de carbono y sus cualidades para generar espacios confortables la posicionan como una alternativa estratégica para enfrentar los desafíos actuales.

En el ámbito del diseño y la construcción, cada proyecto permite explorar nuevas formas de integrar la naturaleza en el espacio construido. En ese sentido, la madera ocupa un lugar privilegiado: no solo por sus capacidades técnicas y su contribución a una edificación más sustentable, sino también por su origen vivo, que nos conecta directamente con lo natural.

Hoy trabajamos cada vez más con productos de ingeniería en madera de alta precisión, diseñados para ofrecer un comportamiento predecible y estandarizado. Sin embargo, es fundamental no perder de vista que, en su esencia, seguimos construyendo con un material natural. La madera conserva la huella de su origen: su crecimiento, su estructura y su relación con el entorno. Comprender estas condiciones no es solo un ejercicio técnico, sino una base para proyectar de manera más informada y coherente con sus características.

En CENAMAD promovemos una visión integral de la construcción en madera, que comienza en el árbol —en su genética, su silvicultura y su interacción con el entorno— y se proyecta hacia su transformación en materia prima y productos para la construcción. Esta mirada permite entender no solo el material en sí, sino también el conjunto de decisiones que inciden en su desempeño a lo largo del tiempo.

En este primer tomo de la Colección sobre Durabilidad y Preservación de la Madera en Edificación", se propone un recorrido por la anatomía de los árboles, entendiendo cómo su estructura da origen a las propiedades de la madera y cómo estas influyen directamente en su comportamiento como material de construcción. A partir de esta base, el análisis avanza hacia la madera en uso: su desempeño en obra, los factores que condicionan su durabilidad y los criterios necesarios para su adecuada protección según especie y condiciones de exposición.

Comprender y anticipar los factores que inciden en el comportamiento de la madera es clave para lograr soluciones durables y de alto desempeño. Desde esta base, entender el origen de los materiales naturales permite proyectar con mayor precisión, generando espacios más sustentables y concebidos con una visión de largo plazo.

Francisca Lorenzini
Gerente General CIM UC - CENAMAD

Contenido

Prefacio **5**

Contenido **7**

01 Introducción **11**

1.1 Objetivos y orientación del Tomo I. 11

02 Glosario **13**

03 Propiedades de la madera y factores que determinan la durabilidad **17**

3.1 Crecimiento del árbol y estructura leñosa 17

3.1.1 Definición de madera 18

3.1.2 Tejidos en el árbol 19

3.1.3 Anatomía de la madera 20

3.1.3.1 Anatomía celular del xilema de las coníferas 22

3.1.3.2 Anatomía celular del xilema de las latifoliadas 24

3.1.3.3 Sistema de conexión entre células para el flujo de savia 27

3.1.4 La pared celular 28

3.1.4.1 Constituyentes químicos de la pared celular 28

3.1.4.2 Pared primaria, pared secundaria y lamela media 30

3.1.5 Generalidades del proceso de crecimiento de un árbol 31

3.1.6 Xilogénesis o formación de la madera 33

3.1.6.1 Meristema apical y meristema cambial o cambium vascular. 33

3.1.6.2 Generación y desarrollo de una célula leñosa. 35

3.1.6.3 Efecto de las condiciones ambientales, desarrollo vegetativo, hormonas y posición del cambium vascular en la formación y características de la madera. 35

3.1.6.4 Madera temprana y madera tardía 37

3.1.6.5 Madera juvenil y madera madura 38

3.1.6.6 Pared primaria, pared secundaria y lamela media 40

3.1.7 Proceso de duraminización 40
3.2 Propiedades físicas y mecánicas 42
3.2.1 Propiedades físicas 42
3.2.2 Densidad 42
3.2.3 Propiedades mecánicas 47
3.3 Efectos de la estructura y propiedades de la madera en la impregnación 49
04 Fundamentos de la durabilidad 51
4.1 Fundamentos de la durabilidad 51
4.2 Agentes de degradación 53
4.2.1 Condiciones necesarias para el desarrollo de los procesos de deterioro 53
4.2.1.1 Humedad 53
4.2.1.2 Oxígeno 54
4.2.1.3 Temperatura 54
4.2.1.4 Manchas químicas 54
4.2.2 Agentes bióticos (organismos xilófagos) 55
4.2.2.1 Mohos y hongos cromógenos 56
4.2.2.2 Hongos degradadores de madera 58
4.2.2.3 Insectos xilófagos 62
4.2.2.4 Xilófagos marinos 67
4.2.3 Agentes abióticos 68
4.2.3.1 Exposición al sol 68
4.2.3.2 Exposición al agua 68
4.2.3.3 Factores de deterioro abióticos 69

05 Clasificación de los productos de madera para la construcción 71

5.1 Especies disponibles y sus propiedades 71

5.2 Clasificación de productos de madera 87

06 Evaluación del riesgo: el producto de madera en servicio 100

6.1 Niveles de riesgo 100

6.1.1 Condición de uso 102

6.2 Categoría de durabilidad según el nivel de riesgo 107

6.3 Requerimientos normativos generales 108

6.3.1 Requisitos de humedad para la madera en servicio 112

07 Anexo 114

7.1 Anexo A - Especies arbóreas disponibles en Chile 114

Referencias 117

Índice de figuras 119

Índice de tablas 120



Imagen gentileza CMPC

01
Introducción

Los materiales utilizados en la construcción pueden clasificarse según su origen o composición. Entre los más utilizados se encuentran los materiales orgánicos, inorgánicos, metálicos, poliméricos y biobasados. En este contexto, la madera corresponde a un material orgánico que presenta propiedades y comportamientos intrínsecos que pueden ser expresados y cuantificados mediante distintas propiedades físicas, químicas y mecánicas. Estas características determinantes derivan directamente de su estructura microscópica y macroscópica (Capítulo 2), así como de los procesos anatómicos, biológicos y químicos asociados a las funciones que cumple el árbol.

Al estar la madera constituida por polímeros naturales basados en carbono, principalmente celulosa, hemicelulosa y lignina, la madera posee atributos propios de los materiales orgánicos, tales como su carácter higroscópico, combustible y biodegradable. La presencia de carbono biológico implica que hongos, bacterias e insectos xilófagos pueden metabolizar sus componentes, lo que la hace susceptible a distintos mecanismos de degradación. Esto contrasta con los materiales inorgánicos y metálicos comúnmente utilizados en construcción, los cuales carecen de carbono orgánico y, por ende, no son vulnerables a agentes bióticos. No obstante, estos materiales también experimentan procesos de deterioro, como corrosión, fisuración, carbonatación, disolución química o erosión física, aunque de naturaleza distinta y generalmente asociados a factores ambientales y a la estabilidad química de sus componentes.

Aun cuando la naturaleza orgánica de la madera la hace susceptible a degradación biológica, esta misma condición le otorga ventajas únicas frente a otros materiales. Su estructura basada en polímeros naturales de carbono proporciona una elevada relación resistencia-peso, lo que permite obtener elementos estructurales livianos y eficientes. Asimismo, la composición orgánica de la madera le confiere una capacidad natural de regular la humedad y mejorar el confort higrotérmico interior, atributos que pueden integrarse de forma ventajosa en el diseño arquitectónico. Además, su origen renovable y su capacidad de almacenar carbono durante toda su vida útil contribuyen significativamente a la reducción de emisiones y al desempeño ambiental de las edificaciones, especialmente cuando proviene de bosques manejados de manera sostenible. Estas propiedades demuestran que, pese a su vulnerabilidad frente a agentes biológicos, la madera ofrece beneficios estructurales, ambientales y funcionales que la posicionan como un material competitivo y de alto valor en la construcción contemporánea. Entender cómo funciona la madera desde su origen en el árbol, permite comprender mejor sus limitaciones y ventajas, y constituye el punto de partida para su uso informado en la construcción, con miras a asegurar su durabilidad en servicio.

1.1 Objetivos y orientación del Tomo I.

El conjunto de tres tomos describe la durabilidad de la madera a distintos niveles, proporcionando a los profesionales de la construcción un marco de referencia integral, que permita comprender la madera desde su nivel molecular (Tomo I) hasta su utilización final en servicio, considerando aspectos de preservación y durabilidad. Asimismo, busca evaluar los factores que afectan su durabilidad y garantizar el cumplimiento tanto de los requerimientos normativos como de los principios del buen construir. Este enfoque se desarrolla mediante la preservación (Tomo II) y las estrategias de diseño (Tomo III), que aseguren un desempeño adecuado y sostenible de la madera en el tiempo.

En este contexto, el Tomo I: Durabilidad natural de la madera. Propiedades, clasificación y evaluación del riesgo tiene como objetivo fundamental explicar por qué la madera presenta una determinada durabilidad natural y cómo esta se relaciona con su estructura, sus propiedades y las condiciones a las que se verá expuesta. Este tomo desarrolla de manera secuencial los fundamentos esenciales para comprender el material y los mecanismos que intervienen en su deterioro, constituyendo la base conceptual necesaria antes de abordar, en los tomos siguientes, los tratamientos de preservación y las estrategias de diseño orientadas a asegurar su desempeño en servicio.

A través de este tomo se pretende:

i. Describir la formación, estructura y factores que determinan la durabilidad natural de la madera (Capítulo 2).

ii. Explicar los principios de la durabilidad y los agentes bióticos y abióticos responsables del deterioro (Capítulo 3).

iii. Establecer la clasificación de las especies y productos de madera según sus propiedades (Capítulo 4).

iv. Presentar los criterios para evaluar el riesgo asociado al uso de la madera en servicio, incluyendo condiciones de exposición y exigencias normativas (Capítulo 5).

Este manual está dirigido a arquitectos, ingenieros, proyectistas, técnicos y otros profesionales vinculados a la industria de la construcción y a la cadena de suministro de madera preservada, que buscan asegurar su durabilidad y preservación, basándose en normativas nacionales vigentes y referencias internacionales reconocidas.

Esta guía se redactó utilizando la normativa chilena vigente a la fecha de publicación. Para las referencias con fecha, solo se considera la versión citada; para referencias sin año, se aplica la última edición disponible del documento correspondiente.

02
Glosario

Este glosario se elaboró considerando el enfoque y los objetivos específicos del presente documento. Por esta razón, algunas definiciones pueden haberse ajustado para favorecer la comprensión o coherencia interna del documento. Se recomienda verificar las fuentes citadas y el contexto de aplicación de cada término antes de su uso en otros ámbitos.

Albura: Zona externa del tronco, fisiológicamente activa, que conduce agua y nutrientes. Sus células de transporte aún funcionales la hacen más permeable a productos preservantes, pero también más susceptible al ataque de hongos e insectos xilófagos que el duramen.
Definición elaborada en base a NCh173.

Anillo de crecimiento: Capa de madera formada por el cambium vascular durante un período de crecimiento anual, visible en corte transversal. Está compuesto por madera temprana, de células con lumen amplio, y madera tardía, de células con lumen estrecho y pared más gruesa.
Elaboración propia

Biodeterioro: Degradación de la madera causada por organismos vivos, principalmente hongos de pudrición, insectos xilófagos y organismos marinos. Requiere la presencia simultánea de condiciones favorables de humedad, temperatura y oxígeno para manifestarse.
Definición elaborada en base a (CORMA, 2003)(Ripa et al., 2004)

Durabilidad adquirida: Resistencia al biodeterioro que la madera alcanza mediante la aplicación de medidas de protección externas, ya sea a través del diseño constructivo o mediante procesos de impregnación industrial con productos preservantes. Complementa o suple la durabilidad natural cuando esta es insuficiente para el nivel de riesgo previsto.
Elaboración propia

Durabilidad natural: Atributo de la madera que le otorga resistencia al ataque de agentes de daño. Tal resistencia es diferente para cada especie maderera y está referida a maderas que no han sido sometidas a ningún tratamiento de preservación o impregnación.
Fuente: NCh173

Duramen: Zona interior del tronco, biológicamente inactiva, formada a partir de la transformación química de la albura mediante el proceso de duraminización. Contiene compuestos polifenólicos (taninos, terpenos, quinonas) que confieren, en muchas especies, mayor durabilidad natural frente a hongos e insectos. Generalmente de color más oscuro que la albura, especialmente en latifoliadas.
Definición elaborada en base a (CORMA, 2003) (Reinprecht, 2016)

Duraminización: Proceso de transformación de la albura en duramen, en que las células parenquimáticas del xilema mueren y producen compuestos polifenólicos que impregnan la madera. Puede incluir la oclusión de vasos mediante tilosis y originar cambios de color. Confiere al duramen mayor durabilidad natural y menor permeabilidad a productos preservantes.
Elaboración propia

Higroscópico: Propiedad de la madera de absorber y desorber humedad del ambiente en respuesta a variaciones de temperatura y humedad relativa.
Definición elaborada en base a (Guindos, 2019)

Humedad de equilibrio: Contenido de humedad de la madera que se mantiene constante, bajo determinadas condiciones de temperatura y humedad relativa del medio ambiente.
Fuente: NCh173

Impregnabilidad: Capacidad que presenta una especie de madera a la penetración de un líquido.
Definición elaborada en base a (Reyes et al., 2024) (UNE-EN 350:2016)

Insectos xilófagos: Insectos cuyos estados inmaduros y/o adultos se alimentan de la madera, causando su deterioro o destrucción.
Fuente: NCh630:2019

Lixiviación: Proceso de migración y arrastre de extractivos solubles —principalmente taninos— desde el interior de la madera hacia su superficie, favorecido por la exposición al agua. Puede generar manchas oscuras sobre la madera y sobre materiales adyacentes.
Elaboración propia

Lumen: Espacio interior hueco de una célula leñosa, delimitado por la pared celular. Una vez que la célula completa su diferenciación y muere, el lumen vacío actúa como conducto para el transporte de savia en células de conducción, y como vía de penetración para productos preservantes durante la impregnación.
Elaboración propia

Madera cuarteada: Tabla cuya cara más ancha resulta de un corte radial, paralelo al eje del tronco y orientado desde la médula hacia la corteza. Presenta mayor estabilidad dimensional frente a cambios de humedad que la madera floreada.
Elaboración propia

Madera floreada: Tabla cuya cara más ancha resulta de un corte tangencial, pasando por los anillos de crecimiento. Presenta mayor veteado visible y menor estabilidad dimensional que la madera cuarteada.
Elaboración propia

Madera tardía (de verano /de otoño): Madera formada al final de la temporada de crecimiento anual, caracterizada por células leñosas de lumen estrecho y pared celular gruesa. Aporta mayor densidad y soporte mecánico.
Definición elaborada en base a (CORMA, 2003)

Madera temprana (de primavera): Madera formada al inicio de la temporada de crecimiento anual, caracterizada por células leñosas de lumen amplio y pared celular delgada, diseñadas para el transporte eficiente de agua.
Definición elaborada en base a (CORMA, 2003)

Mancha azul: Coloración azul principalmente en la albura, producida por hongos cromógenos y que no altera su estructura leñosa.
Fuente: NCh173:2019

Meteorización: Proceso de degradación superficial de la madera expuesta a la intemperie, causado por la acción combinada de radiación ultravioleta, agua y viento. Afecta principalmente la madera temprana, resaltando el veteado entre anillos de crecimiento. Es un proceso superficial que no incide en las propiedades estructurales del material.
Definición elaborada en base a (Touza, 2013)

Organismo xilófago: Organismo que se alimenta de madera o la utiliza como sustrato, causando su deterioro.
Definición elaborada en base a (Ripa et al., 2004)

Punteadura: Zona de la pared celular donde la pared secundaria no se forma, permitiendo el paso de agua y nutrientes entre células adyacentes. Se clasifican en simples (entre células parenquimáticas) y areoladas (entre células de conducción). Su morfología varía entre especies y contribuye a su reconocimiento taxonómico.
Definición elaborada en base a (USDA et al., 2010) (Baas -Leiden et al., 2004)

Pudrición blanda: Tipo de descomposición causada por hongos ascomicetos, caracterizada por un reblandecimiento superficial de la madera. Puede producir también pudrición en profundidad en condiciones de alta humedad. Predomina en madera en contacto con el suelo o el agua.
Definición elaborada en base a (UNE-EN 335-2013)

Pudrición blanca: Tipo de descomposición causada por hongos basidiomicetos que se alimentan fundamentalmente de la lignina, afectando ligeramente la celulosa. La madera adquiere un color blancuzco y aspecto fibroso. También denominada pudrición fibrosa. Predomina en latifoliadas.
Definición elaborada en base a (Touza, 2013)(Guindos, 2019)

Pudrición parda: Tipo de descomposición causada por hongos que se alimentan preferentemente de la celulosa, dejando un residuo de lignina de coloración oscura. La madera adquiere un color pardo y se agrieta formando estructuras cúbicas. Predomina en coníferas. También denominada pudrición cúbica.
Definición elaborada en base a (Touza, 2013)(Guindos, 2019)

Punto de saturación de las fibras: Contenido de humedad de la madera cuando ha perdido la totalidad del agua libre sin haber perdido agua higroscópica.
Fuente: NCh173

Singularidades: Características propias del material que se apartan de la condición ideal de la madera, como nudos, variaciones en la orientación de la fibra o bolsas de resina. Influyen en el desempeño mecánico de la pieza y se consideran en su clasificación por resistencia.
Elaboración propia

Tilosis: Bloqueo total o parcial de los vasos por expansiones de las células del parénquima axial o radial adyacente a través de las punteaduras respectivas.
Fuente: NCh173

Los términos producto, elemento y pieza de madera se emplean con frecuencia de forma indistinta; sin embargo, en el contexto de los tres tomos tienen alcances específicos, por lo que es importante establecer la distinción entre ello.

| TABLA 1 – DIFERENCIA ENTRE PIEZA , PRODUCTO Y ELEMENTO DE MADERA

Término	Definición	Caracaterísticas principales	Ejemplo
Pieza de Madera	Forma genérica para referirse a una unidad de madera, sea esta compuesta por uno o más productos.	-	-
Producto de madera	Material con caracteristicas definidas.	- Tiene exigencias de penetración y retención según el nivel de riesgo asignado al elemento de madera. - Puede contar con adhesivos. - Incluye productos simples y compuestos	- Madera sólida aserrada (con o sin finger joint) - Madera sólida redonda (o cilíndrica) - Madera ingeneria: MLE, CLT, LVL, OSB, MDF - Productos chapas de madera: Contrachapado - Productos compuestos(1): Viga i-joist
Elemento de madera	Componente constructivo de una edificación compuesto de productos de madera.	- Rol estructural o arquitectónico definido en la edificación. - Nivel de riesgo según condiciones de exposición.	NCh819: Fundaciones, vigas pisos, entablado de piso sobre envigado, pisos de terraza, Soleras en contacto con hormigon, pie derecho en zonas humedas, pie derecho en zona seca, vigas entrepisos, cerchas, tapacanes, revestimientos exteriores, molduras y carpinterias exteriores.

Notas:

(1) Los productos compuestos, para los tratamientos preservantes deben considerarse cada producto como una unidad independiente con sus propias exigencias.



03

Propiedades de la madera y factores que determinan la durabilidad

3.1 Crecimiento del árbol y estructura leñosa

La adecuada comprensión de las propiedades de la estructura leñosa, en especial en lo referente a la madera, requiere entender el proceso evolutivo, de desarrollo y crecimiento del árbol. A lo largo del tiempo, las plantas desarrollaron diferentes estrategias para competir por la luz solar, necesaria para la fotosíntesis, que aporta la energía para el crecimiento y la reproducción de cada individuo.

En el caso de las plantas leñosas, con la aparición de la lignina, molécula que le da rigidez al tejido leñoso, fue posible desarrollar un sistema de soporte estructural que les permitiese elevar la copa a posiciones cada vez más altas, por encima de sus competidores, y así desplegar su follaje a la luz del sol.

A su vez, el tejido leñoso se fue conformando como un sistema que permitía la conducción eficiente del agua necesaria para la fotosíntesis en las hojas, y el transporte de nutrientes desde las raíces hasta cada zona de la copa. Con el tiempo los primeros árboles, correspondientes a las coníferas, gracias a este diseño que conjuga la conducción del agua con el soporte mecánico, alcanzaron alturas incluso superiores a los 100 m (Figura 3.4).

Podemos definir, por tanto, la estructura del tronco y las ramas como un sistema complejo destinado al sostén del árbol, al transporte del agua de las raíces hacia el follaje y a la distribución de los productos de la fotosíntesis entre los diferentes órganos de la planta. Durante el crecimiento del árbol, se requiere equilibrar permanentemente las funciones antes mencionadas, por lo que la planta leñosa debe mantener una relación armoniosa entre el follaje, las ramas, el tronco y las raíces que permita su supervivencia.

El tejido que compone este sistema de soporte y conducción es la **madera**. La formación de este material es dinámica y continua a lo largo del tiempo, y sus características físico-mecánicas dependerán de una serie de factores cuyo origen se encuentra en la creación y el desarrollo del tejido leñoso.

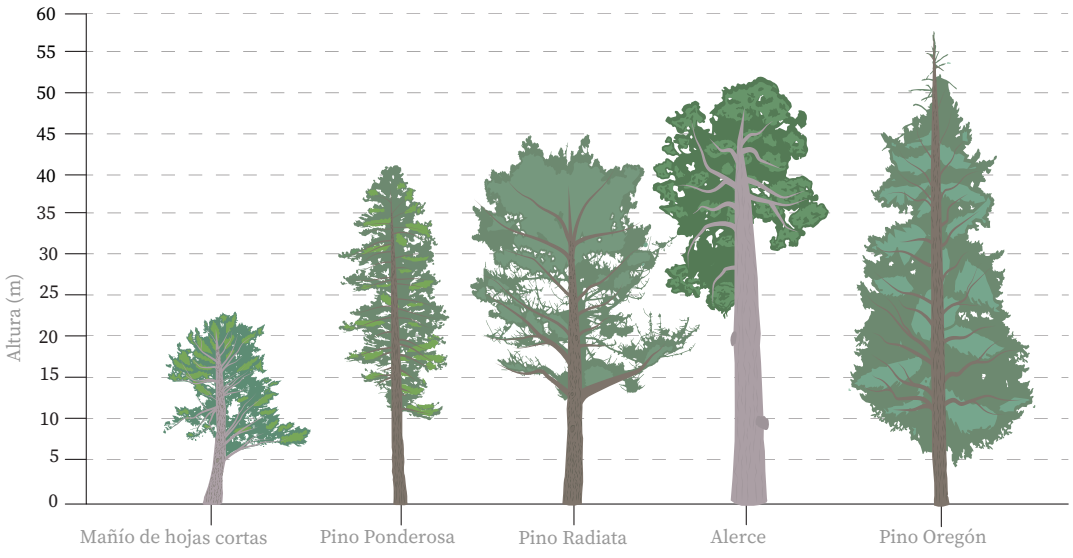


Figura 3.1 – Altura de algunas coníferas

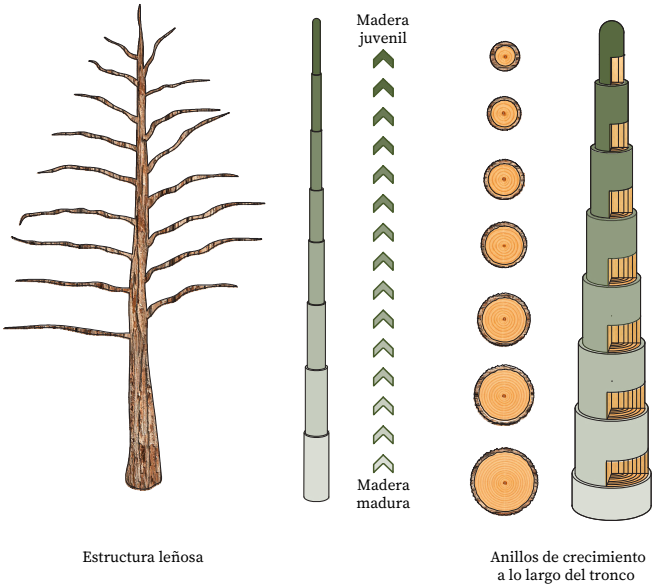


Figura 3.2 – Anillos de crecimiento

3.1.1 Definición de madera

Podemos describir la madera como un tejido compuesto por distintos tipos de células, con características anatómicas particulares y una disposición espacial en sentido longitudinal y radial, que le permite cumplir con las funciones de soporte mecánico de las distintas estructuras del árbol, y de transporte de agua y nutrientes a lo largo de este.

La madera se dispone en capas sucesivas, cada una sobre la anterior, a medida que el árbol crece, presentando distintas propiedades según el momento de la temporada de crecimiento en que se forma, la altura en el árbol, la edad del ejemplar, las condiciones ambientales, la competencia con otros árboles, la especie y sus características genéticas.

Cada una de estas capas de madera presenta variaciones internas en la anatomía y las características de sus células, lo que permite distinguir el límite entre una capa y la siguiente, al menos en especies de climas con estaciones de crecimiento marcadas. Estas capas, al ser observadas en un corte transversal, son lo que se conoce como **anillos de crecimiento** (Figura 3.2).

Debido a esto la madera se define como un material leñoso, perenne, heterogéneo, higroscópico, biodegradable y anisotrópico es decir, con variaciones en sus propiedades físico-mecánicas y químicas en los sentidos radial y longitudinal.

Este arreglo de capas de tejido de distinto grosor y características, alineadas en forma concéntrica, hace que la madera se presente de manera distinta al efectuar un corte transversal, radial o tangencial sobre una sección de una troza de madera. El corte transversal es el que se realiza en forma perpendicular al eje longitudinal del tronco, exponiendo los anillos de crecimiento. El corte radial es el que se ejecuta en forma longitudinal al eje del tronco, pero siguiendo un radio desde la médula hasta la corteza, exponiendo los anillos de crecimiento en forma longitudinal. Una tabla que presenta su cara más ancha en esta posición se llama madera cuarteada (*quarter-sawn* o *edge-grained* lumber en inglés). El corte tangencial corresponde a un corte en sentido longitudinal, pero que pasa tangencialmente por alguno o algunos anillos de crecimiento. Una tabla aserrada en esta posición, y que presenta su cara más ancha en corte tangencial, se llama madera floreada (*plain* o *flat-sawn lumber*, en inglés) (Figura 3.3).

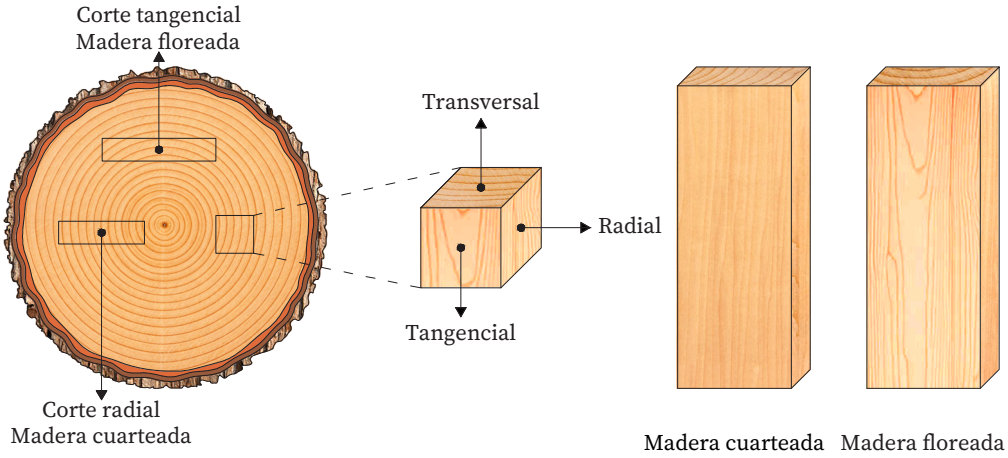


Figura 3.3 – Tipos de trozas y corte transversal, radial y longitudinal

3.1.2 Tejidos en el árbol

De acuerdo a Panshin y de Zeeuw (1980), Díaz-Vaz (2003) y Esau (2006), la parte aérea de un árbol presenta varios tipos de tejidos que cumplen distintas funciones. Existen tejidos de crecimiento; correspondientes al **meristema apical**, **cambium vascular**, y **cambium de corteza o suberoso**; tejidos de protección, correspondientes a la **corteza**, tejidos de transporte de savia elaborada a partir de la fotosíntesis, correspondientes al **floema**, también llamada corteza interior, y tejidos de transporte de agua y nutrientes, y de soporte estructural, correspondientes al **xilema**, es decir, a la madera (Figura 3.4)(Schweingruber et al., 2011).

El **meristema apical** corresponde a un tejido meristemático primario ubicado en el ápice de cada eje de crecimiento en el árbol (tronco, ramas, ramillas). Está conformado por células madre, indiferenciadas, que sufren división mitótica para dar origen a nuevas células, las cuales pueden diferenciarse en células de distinto tipo, conducentes a la formación de hojas, flores, ramas u otros órganos, o mantenerse como células meristemáticas. Además, las células del meristema apical generan una delgada capa de células llamada cambium vascular o meristema cambial. El meristema apical está a cargo del crecimiento primario.

El **cambium vascular** corresponde a una delgada capa de células madre indiferenciadas, generadas por el meristema apical, que forma un manto por sobre la médula tan pronto es generado por este. El cambium vascular está a cargo de generar nuevas células hacia el interior que darán origen a la madera o xilema y hacia el exterior que darán origen al floema, por lo que se encuentra entre ambos tejidos.

El **cambium de la corteza** o **cambium suberoso** corresponde a una delgada capa de células madre, indiferenciadas, ubicada entre el floema y la corteza, y que da origen a sucesivas capas de corteza, generando células hacia afuera.

La **corteza** corresponde al tejido más externo del tronco y las ramas, muerto, y que cumple con la función de protección de los tejidos interiores, actuando como aislante térmico, reservorio de agua, protección contra pestes e insectos, y en algunos casos, contra el fuego.

El **floema** (o corteza interior): corresponde a un tejido vivo, que por tanto mantiene su citoplasma celular, generado por el cambium vascular. Cumple la función de transportar, desde las hojas u órganos fotosintéticos, la savia elaborada a partir de la fotosíntesis, hacia distintos puntos del árbol y sus raíces.

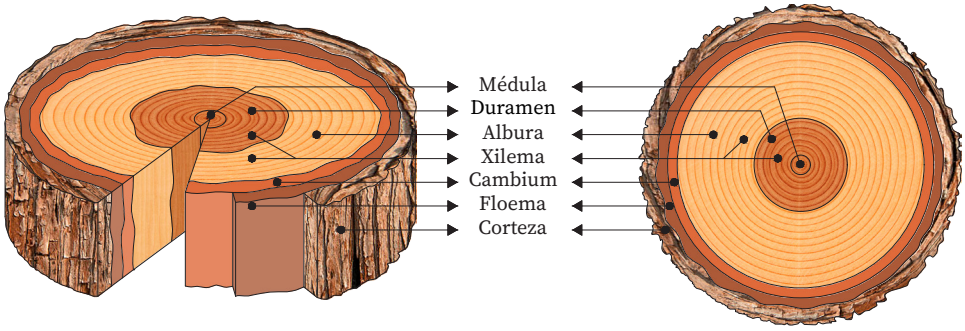


Figura 3.4 – Tejidos de la madera

El **xilema** corresponde a la madera propiamente tal (del griego *xylo*=madera). Es un tejido compuesto por variados tipos de células, algunas de ellas con funciones de transporte de agua y nutrientes, y otras con funciones de almacenamiento y de transformaciones químicas en la madera.

La **médula** es un conjunto de células parenquimáticas, de carácter esponjoso, cuya principal función es el almacenamiento. Se forma directamente a partir del meristema apical de cada eje de crecimiento.

3.1.3 Anatomía de la madera

La madera está compuesta por diferentes tipos de células que se pueden agrupar en células leñosas de conducción, células parenquimáticas de almacenamiento, y células epiteliales de canales resiníferos y gomíferos.

Las células de la madera forman dos sistemas en términos de su orientación. Un sistema de células orientadas longitudinalmente, el **sistema longitudinal**, a lo largo del tronco y las ramas, y un sistema de células orientadas en sentido radial , el **sistema transversal**, desde la médula hacia la corteza, formando radios (o rayos) leñosos, también llamados radios medulares, que se distribuyen horizontalmente desde la médula hacia la corteza, en distintas direcciones.

A su vez, cada uno de estos sistemas contiene dos tipos de células: las **células prosenquimáticas**, que una vez formadas y lignificadas mueren, pierden su citoplasma y se convierten en ductos conductores de agua; y las **células parenquimáticas**, que se mantienen vivas hasta que la madera se duraminiza, lo que les permite generar cambios químicos en la madera (Díaz-Vaz, 2003).

En resumen, la Tabla 2 presenta los dos sistemas de células de madera según orientación y los dos tipos de células que estos contienen.

La madera de coníferas y latifoliadas presenta diferencias en algunos de los tipos de células de cada sistema y en los radios leñosos.

| TABLA 2 – SISTEMAS DE CÉLULAS SEGÚN ORIENTACIÓN

Tipo de célula	Sistema longitudinal	Sistema horizontal
Células prosenquimáticas o sistema de conducción	Orientación longitudinal	Orientación transversal o radial
Células parenquimáticas	Orientación longitudinal	Orientación transversal o radial

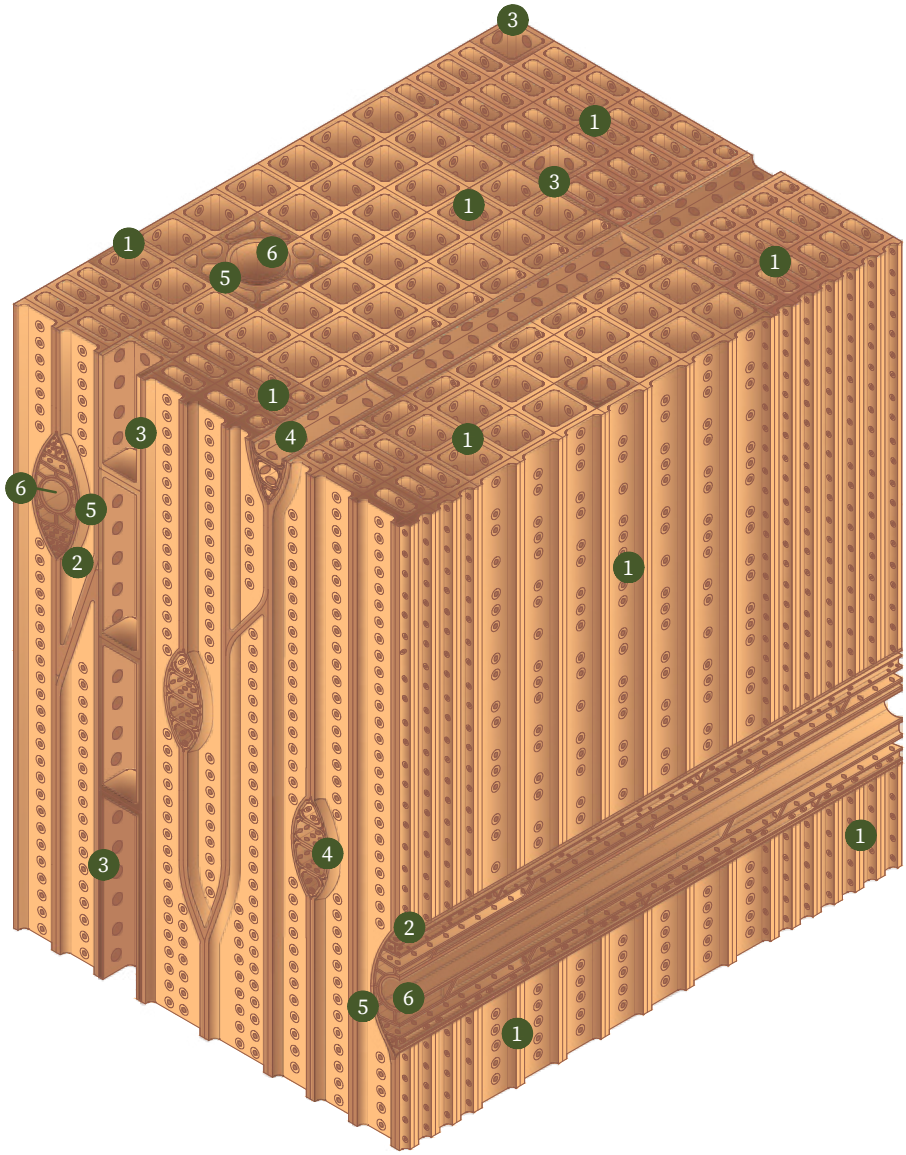


Figura 3.5 – Microanatomía de la madera de coníferas

TABLA 3 – TIPOS DE CÉLULAS DEL XILEMA DE CONÍFERAS

Tipo de célula	Sistema longitudinal	Sistema horizontal
Células prosenquimáticas o sistema de conducción	Traqueidas axiales	Traqueidas radiales (radio-traqueidas)
Células parenquimáticas	Parénquima axial	Parénquima radial (de los radios leñosos)
	Células epiteliales de canales resiníferos	Células epiteliales de canales resiníferos

3.1.3.1 Anatomía celular del xilema de las coníferas

Las coníferas, que se desarrollaron millones de años antes que las latifoliadas, poseen una estructura celular relativamente simple conformada por un número reducido de elementos. El xilema de las coníferas está compuesto por dos sistemas de células: el sistema de conducción o de células prosenquimáticas, donde hay células longitudinales, correspondientes a las traqueidas axiales, y células transversales o radiales, correspondientes a las traqueidas radiales (o radio-traqueidas); y el sistema de células parenquimáticas, donde hay células longitudinales, correspondientes al parénquima axial y a las células epiteliales de canales resiníferos, y células transversales o radiales, correspondientes al parénquima radial (de los radios leñosos) y a las células epiteliales de canales resiníferos (Díaz-Vaz, 2003; IAWA Committee, 2004).

De acuerdo a Panshin y de Zeeuw (1980), Díaz-Vaz (2003) y Esau (2006), las **traqueidas axiales** conforman la mayoría del xilema. Corresponden a células alargadas que ya han completado su proceso de lignificación y poseen puntuaciones areoladas características. El tamaño del lumen de estas células variará según si estas fueron generadas al principio de la temporada de crecimiento anual, en cuyo caso se observan lúmenes de mayor tamaño (madera temprana), o si fueron generadas al final del período de crecimiento anual, en cuyo caso los lúmenes son más pequeños (madera tardía) (Esau et al., 2000). El espesor de la pared celular también varía notoriamente, siendo la pared celular más delgada en las traqueidas de madera temprana y más gruesas en las traqueidas formadas al final de la temporada de crecimiento.

El largo de las traqueidas varía de especie a especie, entre individuos de una misma especie y dentro de un mismo individuo, pudiendo variar entre los 1,5 mm en *Taxus baccata* y los 9 mm en *Araucaria angustifolia* (Richter, 2015); el diámetro también es variable, pudiendo alcanzar entre los 20 y los 50 micrones[1] (Schmitt et al., 2023).

Las **traqueidas radiales** son elementos presentes en algunas familias, como el caso de la familia Pinaceae, que se ubican en los radios leñosos, y que poseen algunas diferencias con respecto a las traqueidas axiales, en especial en lo referente a las puntuaciones (Esau et al., 2000).

El **parénquima axial** funciona principalmente como estructura de almacenamiento. Este puede, o no, estar presente en una proporción muy baja con respecto a las demás estructuras. (Esau et al., 2000).

El **parénquima radial** corresponde a los radios o rayos leñosos; en el caso de las coníferas, estos son uniseriados (una sola fila de células ordenadas verticalmente, que se extiende radialmente) y están conformados por tejido vivo que permite el transporte radial de elementos y el almacenamiento de algunas sustancias (Esau et al., 2000).

Las **células epiteliales de canales resiníferos** rodean los canales longitudinales que conforman los canales resiníferos, formando un epitelio secretor. Secretan resinas frente a agresiones, actuando como sistema de defensa y cicatrización ante daños mecánicos (Esau et al, 2000).

1. 1mm = 1000 micrones

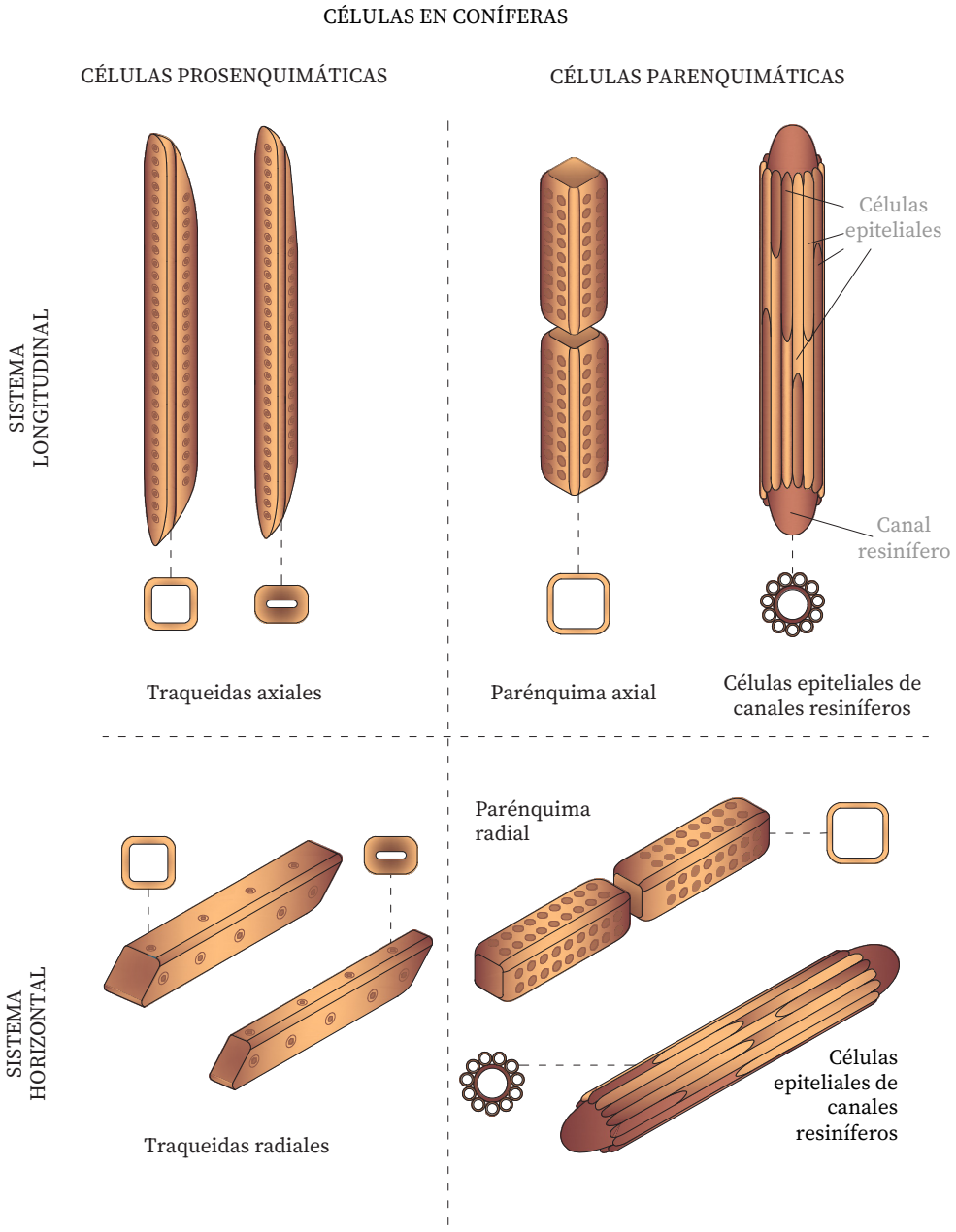


Figura 3.6 – Esquema tipos de células de coníferas

TABLA 4 – TIPOS DE CÉLULAS DEL XILEMA DE LATIFOLIADAS

Tipo de célula	Sistema longitudinal	Sistema horizontal
Sistema de conducción o de células prosenquimáticas	Vasos	
	Traqueidas vasculares	
	Traqueidas vasicéntricas	
	Fibrotraqueidas	
	Fibras libriformes	
Sistema de células parenquimáticas	Parénquima axial (apotraqueal y paratraqueal)	Parénquima radial (de células procumbentes, erectas y cuadradas)

3.1.3.2 Anatomía celular del xilema de las latifoliadas

Las latifoliadas presentan una estructura anatómica más compleja, caracterizada por la presencia de vasos, células de mayor diámetro que permiten una conducción de agua más eficiente que en las coníferas. Sin embargo, esta eficiencia hidráulica también implica un comportamiento mecánico más frágil frente a esfuerzos perpendiculares a la fibra. Además, las latifoliadas contienen una mayor diversidad de elementos celulares, como fibras, parénquima y canales gomíferos, entre otros, lo que genera una variabilidad más amplia en sus propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad natural.

De acuerdo a Panshin y de Zeeuw (1980), Díaz-Vaz (2003) y Esau (2006), los **vasos** están compuestos por elementos, que corresponden a células anchas y cortas unidas por sus extremos, generando así ductos de distinta longitud para el transporte de agua. Sus paredes terminales presentan perforaciones que permiten el paso del líquido entre ellas. Para cada especie hay aspectos característicos en cuanto a la forma de su sección transversal, que puede ser circular, elíptica o angulosa; el grado de asociación entre ellos en sección transversal (vasos solitarios; vasos múltiples agrupados en filas; vasos agrupados en conjuntos no necesariamente en fila); los cambios de diámetro de acuerdo al momento en que son formados dentro de la temporada de crecimiento (más anchos en la madera temprana, más angostos hacia el final de la temporada de crecimiento), y la forma de ordenarse dentro del anillo de crecimiento.

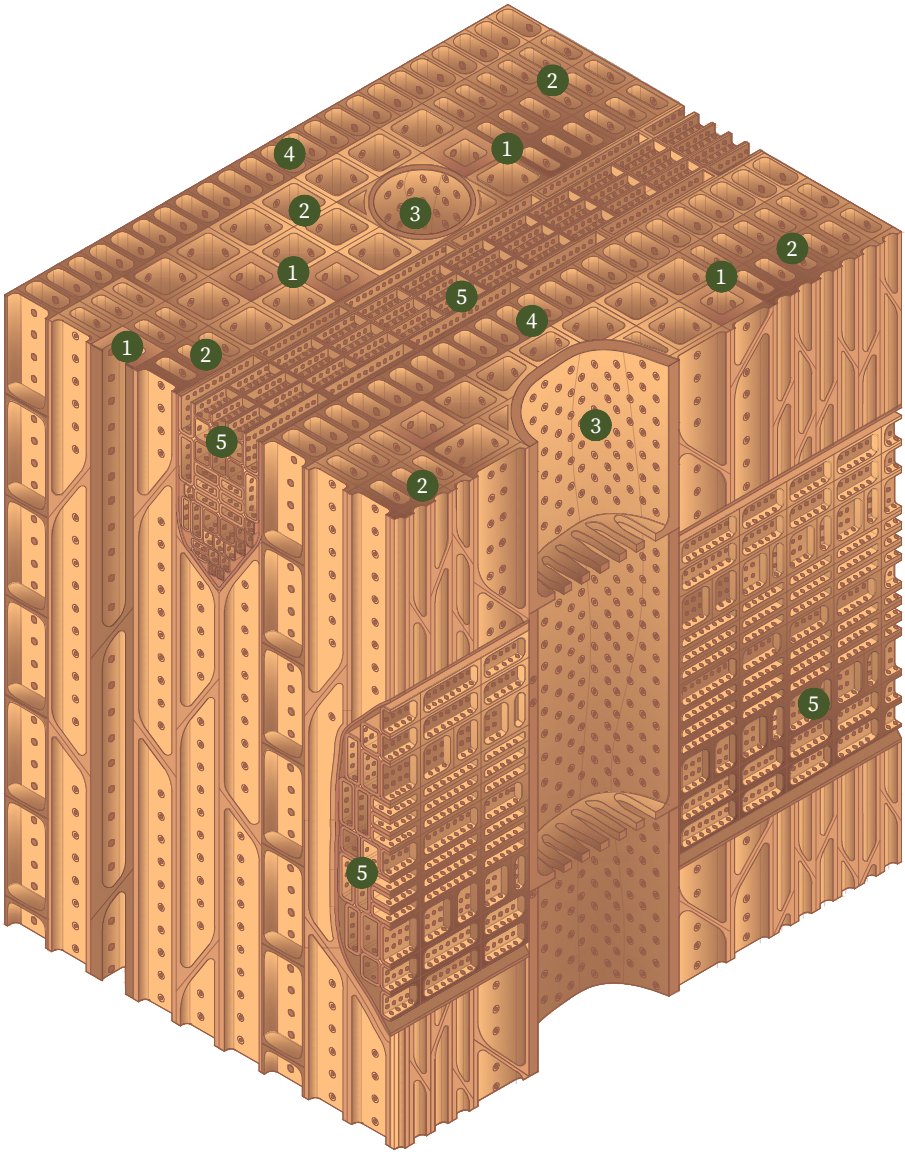
Las **fibrotraqueidas**, al igual que las traqueidas en las coníferas, corresponden a células alargadas con un lumen relativamente pequeño comparado con el de los vasos, con puntuaciones areoladas. Su largo también es variable, pero generalmente menor que el de las traqueidas de las coníferas, sin embargo, no son tan abundantes como estas últimas. Su función es el transporte de agua, en especial en las especies más primitivas.

Las **fibras libriformes** corresponden a células alargadas y lignificadas que cumplen una función estructural, con puntuaciones simples. Son los elementos más abundantes en la madera de latifoliadas, seguidos por las fibrotraqueidas, y conforman el soporte mecánico del xilema de las latifoliadas. Su largo es variable dependiendo de la especie y su posición dentro del árbol, varía entre los 0,5 y los 2,5 mm. Tienen lúmenes más estrechos y paredes más gruesas que las fibrotraqueidas.

El **parénquima axial** corresponde a células vivas que almacenan almidón, entre otras sustancias, ubicadas fuera de los vasos o alrededor de estos. Si las células del parénquima axial se encuentran colindantes a los vasos, se denomina parénquima paratraqueal; en cambio, si se distribuyen en el anillo de crecimiento sin asociarse a los vasos, se denomina parénquima apotraqueal.

El **parénquima radial** está conformado por células que componen el radio leñoso; en el caso de las latifoliadas, este corresponde a un arreglo de varias células en forma vertical, con varias capas de células de ancho, que recorre la madera desde la médula hasta la corteza. Por ello, los radios de latifoliadas son multiseriados, y la cantidad de células en sentido horizontal es una característica distintiva de cada especie.

El tamaño y la disposición espacial de los vasos se definen como **porosidad** de la madera. De acuerdo con los cambios de diámetro de los vasos dentro del anillo, se puede distinguir la **porosidad circular** o **anular**, correspondiente a vasos de mayor tamaño agrupados al comienzo del anillo de crecimiento, con cambios bruscos de tamaño a medida que avanza la temporada de crecimiento; la **porosidad semicircular** o **semianular**, correspondiente a vasos con diámetros mayores al



1 Fibras libriformes
2 Fibrotraqueidas
3 Vasos
4 Parénquima axial
5 Parénquima radial

Figura 3.7 – Microanatomía de la madera de latifoliadas

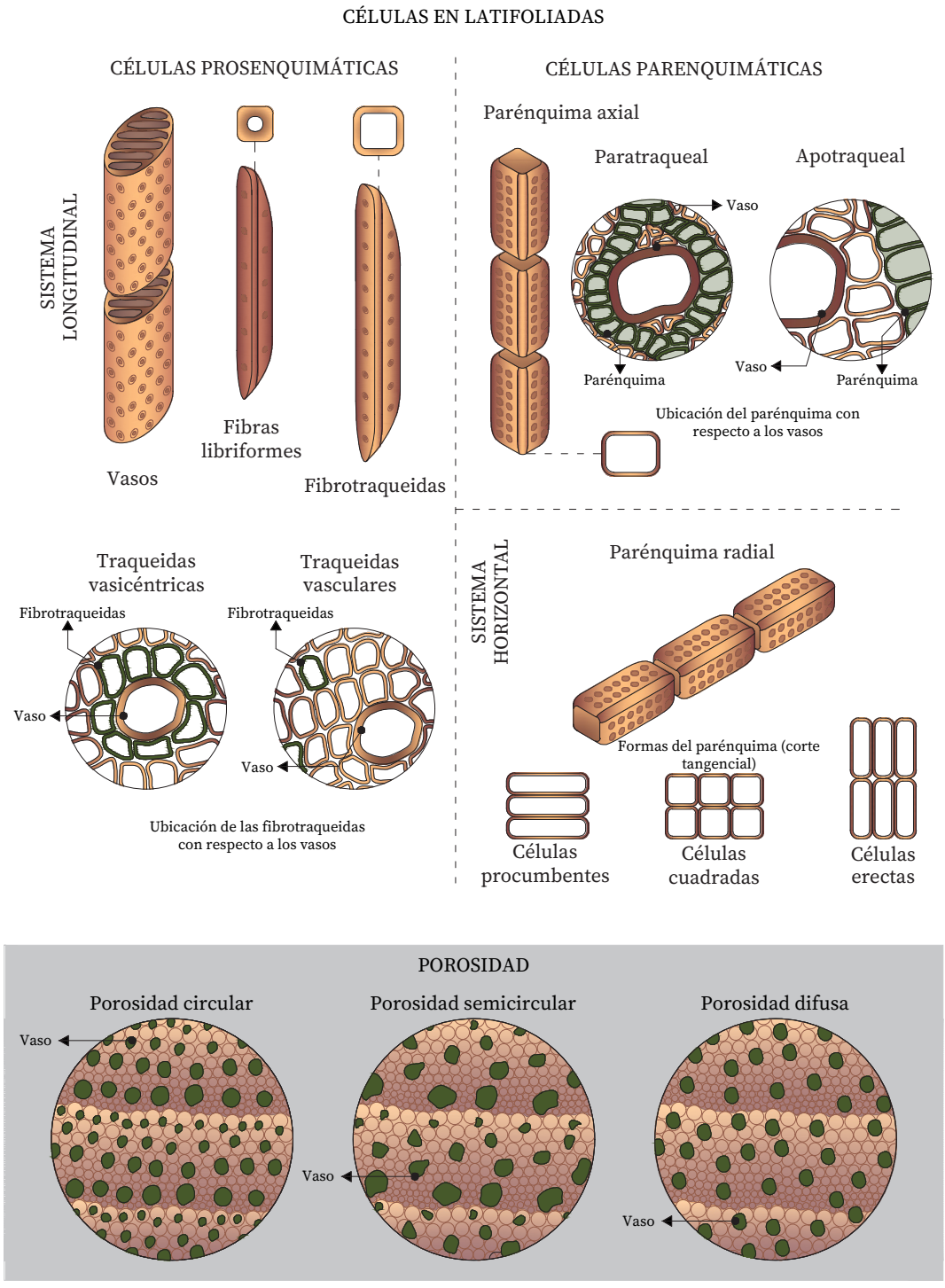


Figura 3.8 – Esquema tipos de células de latifoliadas

inicio del anillo pero con cambio gradual de tamaño a medida que avanza la temporada de crecimiento; y la **porosidad difusa**, correspondiente a vasos de tamaño similar en todo el anillo.

De acuerdo con la forma de ordenarse dentro del anillo, se habla de porosidad ordenada en bandas tangenciales, en bandas radiales, en bandas diagonales y en forma ramificada. El tipo de porosidad es característico de cada especie, y se usa para describir e identificar su madera (IAWA Committee, 1989).

3.1.3.3 Sistema de conexión entre células para el flujo de savia

El agua y los nutrientes fluyen en la madera en el sentido longitudinal de cada eje (tronco, ramas, ramillas), en sentido radial y entre células adyacentes en sentido lateral. Para que esto ocurra, la pared celular debe tener conexiones entre una célula y la siguiente. Estas conexiones corresponden a las punteaduras y las placas de perforación.

De acuerdo a Haygreen y Bowyer (1996), las **punteaduras** (o **puntuaciones**) corresponden a modificaciones de la pared celular que normalmente ocurren a la misma altura entre las paredes celulares de dos células adyacentes, lo que permite el traspaso de agua del lumen de una célula a la otra. Se caracterizan por una interrupción de la pared secundaria, y la presencia de la lámina media y pared primaria de las dos células adyacentes.

A dos punteaduras contiguas se les denomina "par de punteaduras". Existen, sin embargo, casos de **punteaduras ciegas**, sin una punteadura correspondiente en la pared celular de la célula adyacente.

Las punteaduras se clasifican en simples y areoladas. En general, las **punteaduras simples** se encuentran en las paredes de células parenquimáticas, por ejemplo, comunicando las células de los radios medulares; y las **punteaduras areoladas** en las paredes de células prosenquimáticas o de conducción de agua, a excepción de las fibras libriformes de latifoliadas, que presentan punteaduras simples.

Los pares de punteaduras simples consisten en un canal que comunica los lúmenes de dos células adyacentes, con una membrana intermedia compuesta por la lámina media y las respectivas paredes primarias, con una interrupción de la pared secundaria.

Los pares de punteaduras areoladas consisten en un canal de conexión entre las dos células, con un ensanchamiento que genera una cámara entre sus paredes. En la apertura de la punteadura se forman unos rebordes correspondientes a una modificación de la pared secundaria, que cubren parcialmente la cámara.

Entre ambas células se forma una membrana compuesta por la lámina media y las paredes primarias de ambas células. En el caso de las coníferas, esta membrana presenta en su centro un engrosamiento llamado **torus**, que puede ser impermeable. Alrededor del torus, se encuentra el **margo**, que corresponde a la lámina media y las paredes primarias de las células adyacentes, el cual es permeable, ya que, durante su formación, parte de sus estructuras son removidas mediante procesos enzimáticos, dejando una matriz de microfibrillas que permite el paso del agua.

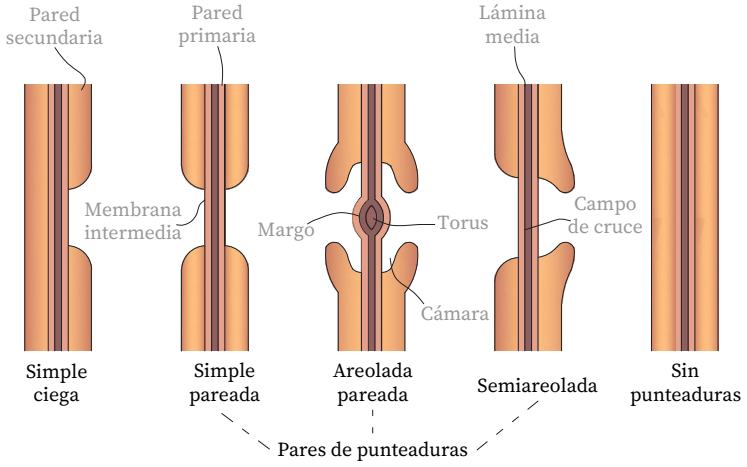


Figura 3.9 – Punteaduras

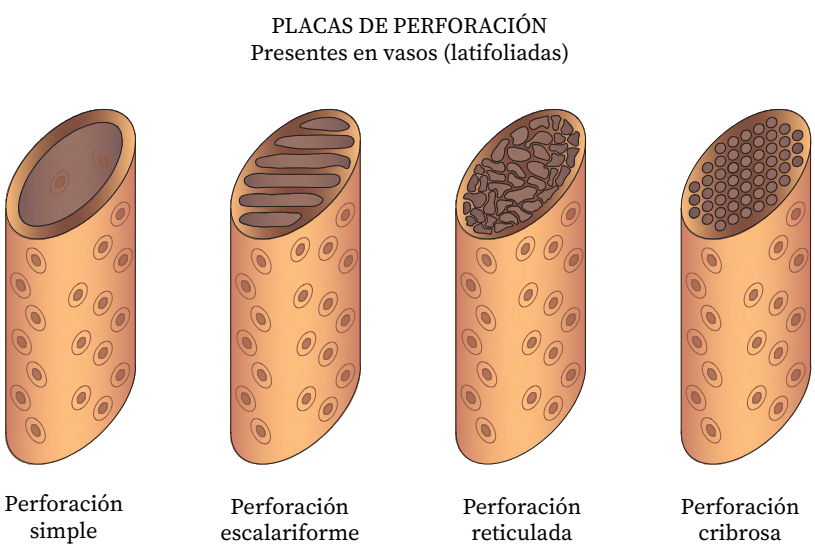


Figura 3.10 – Placas de perforación

En latifoliadas se observa en algunos pocos casos, en las zonas en que se encuentran las paredes de células parenquimáticas (con punteaduras simples) con las de células prosenquimáticas o de conducción (con punteaduras areoladas), se forma un par de **punteduras semi-areoladas**. A estos cruces de punteaduras de distinto tipo se les denomina **campo de cruce**.

Las morfologías que adoptan los campos de cruce y el ordenamiento de las punteaduras en las paredes celulares son características distintivas entre especies y pueden ayudar al reconocimiento de maderas mediante el análisis de su anatomía celular.

Las **placas de perforación** corresponden a la pared celular en la zona superior e inferior de los vasos, con presencia de perforaciones que permiten el paso expedito de fluidos en sentido vertical. Se producen por la eliminación, a través de procesos enzimáticos durante la formación de las paredes celulares, de secciones de las paredes primaria, secundaria y de la lámina media, aunque se observan a veces remanentes de microfibrillas, formando perforaciones coincidentes entre un vaso y el siguiente.

La forma de estas perforaciones y su distribución espacial son características de las distintas especies, y contribuyen también al reconocimiento taxonómico de maderas a través del análisis anatómico. Se pueden clasificar en **perforaciones simples, escalariformes, reticuladas** y **cribosas** (Panshin y de Zeeuw, 1980; IAWA Committee, 1989).

3.1.4 La pared celular

Las células longitudinales leñosas (traqueidas, fibrotraqueidas, vasos, fibras libriformes) cumplen las funciones de transportar agua y nutrientes (savia no elaborada) y otorgar soporte mecánico al árbol. Por esta razón, las paredes de estas células deben otorgar rigidez, además de algún grado de impermeabilidad para que el agua transite. Esto se logra con una combinación de celulosa, hemicelulosa y lignina.

3.1.4.1 Constituyentes químicos de la pared celular

De acuerdo a Panshin y de Zeeuw (1980), Sjöström (1993), y Shmulsky y Jones (2019), químicamente, la madera es un compuesto tridimensional de biopolímeros formado por una red interconectada de celulosa, hemicelulosa, lignina y cantidades menores de compuestos accesorios o extraíbles y compuestos inorgánicos.

El mayor componente químico de la madera en un árbol vivo es el agua, pero en base seca, el mayor componente es el de polímeros basados en azúcares (carbohidratos, 65 a 75%), combinados con lignina (18 a 35%). La madera seca tiene una composición elemental de 50% de carbono, 6% de hidrógeno, 44% de oxígeno y trazas de compuestos inorgánicos.

Existen diferencias en la composición química de coníferas y latifoliadas, pero no se pueden distinguir

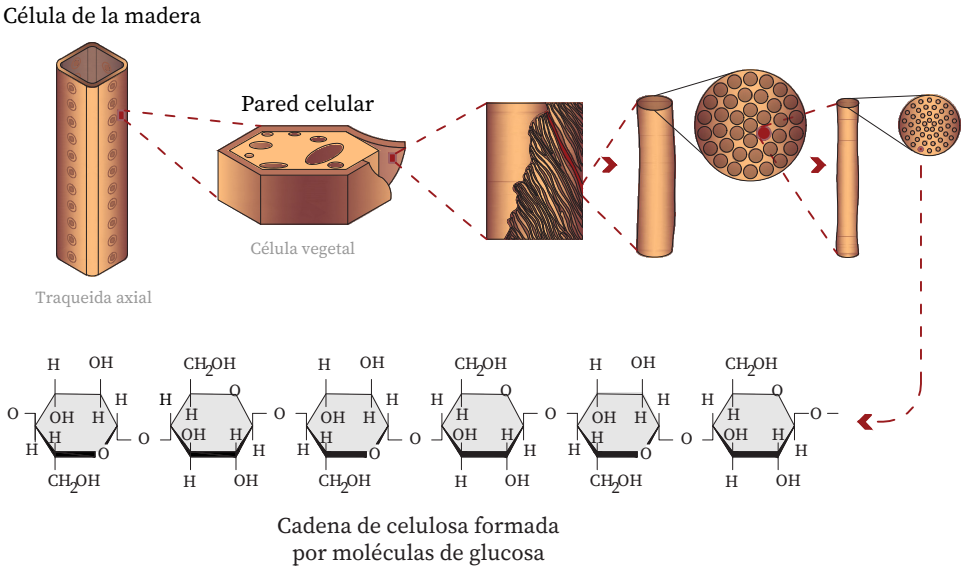


Figura 3.11 – La celulosa en la pared celular

las especies, dado que existen variaciones intra e interespecíficas que se traslapan.

La **celulosa** corresponde a un polisacárido compuesto por monómeros de glucosa unidos por una unión tipo beta, con un grado de polimerización que va de 9000 a 15000 (cantidad de moléculas de glucosa unidas en la cadena de celulosa). Es el polímero más abundante del planeta, no soluble en agua, con aspecto de polvo blanco, y una densidad de 1,5 g/cm^3.

Las **hemicelulosas** o **poliosas** corresponden a polisacáridos no celulósicos con mezclas de monómeros, que forman cadenas cortas de hasta 200 monómeros. Son más solubles y termodegradables debido a su menor peso molecular y sus estructuras amorfas. Presentan una composición y grado de polimerización distintos respecto a la celulosa y entre las diferentes hemicelulosas. Las hemicelulosas están íntimamente ligadas a la lignina y a la parte paracristalina de las microfibrillas celulósicas. A la combinación de celulosa más hemicelulosas se le denomina holocelulosa.

La **lignina** corresponde a un polímero cementante de la pared celular que otorga rigidez. Es heterogénea y compleja, formada por tres alcoholes. La lignina es estable y difícil de extraer de la madera, con alta resistencia a la degradación térmica y a los solventes químicos, y es el polímero de menor higroscopicidad. Es un compuesto termoplástico, importante en los mecanismos de flujo de agua y en la resistencia al ataque de hongos. Se deposita preferentemente en la membrana externa de las células (lamela media) y está ligada químicamente a las hemicelulosas.

Los **compuestos accesorios o extraíbles** son distintos compuestos y moléculas que conforman entre un 3% y un 10% de la madera. Corresponden a gomas, taninos, pigmentos, ceras, grasas, resinas, aceites, entre otros.

TABLA 5 – COMPUESTOS QUÍMICOS EN LA PARED CELULAR

Compuesto	Porcentaje (%)
Celulosa	40 – 45
Hemicelulosas	20 – 30
Lignina	20 – 30
Compuestos accesorios o extraíbles	1 – 10

A medida que estas moléculas se organizan y enlazan, forman estructuras cada vez más complejas hasta conformar la pared celular. La celulosa y la hemicelulosa son sustancias hidrofílicas que aportan resistencia estructural y capacidad de absorción de agua, mientras que la lignina, de naturaleza hidrofóbica, confiere rigidez al tejido y reduce la penetración de la humedad. Como resultado, la madera presenta un marcado carácter higroscópico: absorbe y libera agua según las

condiciones del ambiente, generando variaciones dimensionales asociadas al hinchamiento y la contracción.

Parte de las moléculas de celulosa se ordenan entre sí en forma paralela, constituyendo estructuras cristalinas (de 3 nm a 10 nm de sección y 60 nm de longitud), con forma de cinta, llamadas **micelas**. Otras partes de la macromolécula de celulosa no se disponen en paralelo y forman **zonas paracristalinas** o **zonas amorfas**, íntimamente ligadas a polisacáridos no celulósicos.

La estructura micelar incluye espacios intermicelares de 1 nm, ubicados en las zonas paracristalinas, donde se depositan moléculas de agua. Estas fibrillas elementales forman haces llamados **microfibrillas**, de 10 a 30 nm de diámetro. Los espacios entre microfibrillas, o **espacios interfibrilare**s, miden aproximadamente 10 nm, parcial o totalmente ocupados por la matriz de sustancias incrustantes no cristalinas, en condiciones de saturación de agua. Finalmente, la matriz de sustancias amorfas o incrustantes está compuesta por lignina, hemicelulosas, sustancias pépticas, proteínas y polifenoles y otros componentes.

Las microfibrillas de celulosa y hemicelulosa alojan agua en sus espacios intersticiales según el gradiente de presión, y la lignina actúa como estabilizante frente a la entrada de humedad, contribuyendo así a la durabilidad de la madera (Guindos, 2019).

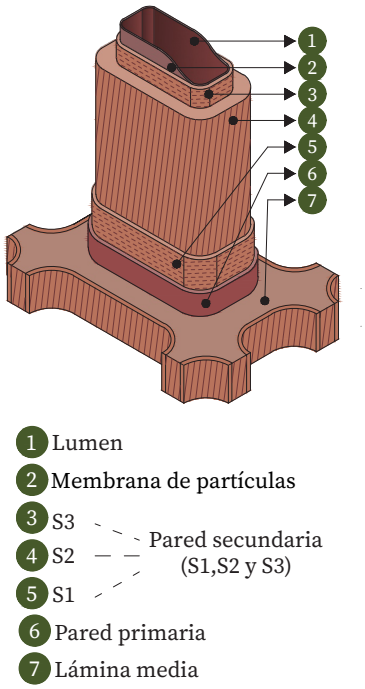


Figura 3.12 – Composición de capas de la pared celular

3.1.4.2 Pared primaria, pared secundaria y lamela media

De acuerdo a Panshin y Zeeuw (1980) y Kumar et al. (2015), la estructura de la **pared celular** se compone de tres capas: una **lámina** o **lamela media** que limita exteriormente a la célula con respecto a las células adyacentes, una **pared primaria** (P) delgada y una **pared secundaria** (S) más gruesa (Figura 3.12).

La lámina media es rica en lignina y pectinas, y asegura la cohesión del tejido (Guindos, 2019); la pared primaria está compuesta por celulosa, lignina, pectina y polisacáridos no celulósicos, que forman microfibrillas de orientación aleatoria, más sueltas que en la pared secundaria; y la pared secundaria está compuesta por una capa externa S1, una capa intermedia o S2 y una capa interior, S3, esta pared es la más importante en cuanto a su efecto sobre las propiedades de la madera.

La **capa S1** es delgada, de 0,1 a 0,35 µm, conformada por polisacáridos en forma de microfibrillas de celulosa y hemicelulosa con un alto ángulo microfibrilar, de 45° a 80° respecto al eje longitudinal de la célula. Las microfibrillas no se encuentran tan compactas como en la capa S2 y tienen espacios visibles. La capa S1 otorga estabilidad inicial a la estructura celular y controla la torsión de la célula.

A continuación, se deposita la **capa S2** que comprende alrededor del 70% al 80% de la pared celular, con un espesor de 1 µm a 10 µm. Está conformada por polisacáridos de celulosa y hemicelulosas depositados con un ángulo fibrilar bajo (más paralelas a la orientación longitudinal de la célula), que puede variar entre 10° y 30°. Sus características definen la rigidez, la resistencia mecánica y las propiedades hidráulicas del xilema.

Por último, se encuentra la **capa S3**, mucho más delgada que las capas S1 y S2, de 0,5 a 1,1 µm, conformada principalmente por microfibrillas de celulosa y hemicelulosa depositadas de manera perpendicular a la célula (30° a 90°). Esta capa, en contacto con el lumen, regula la interacción con este, controlando la impermeabilidad e influyendo en la capilaridad celular.

Finalmente, al interior del lumen se encuentra la **membrana de partículas**.

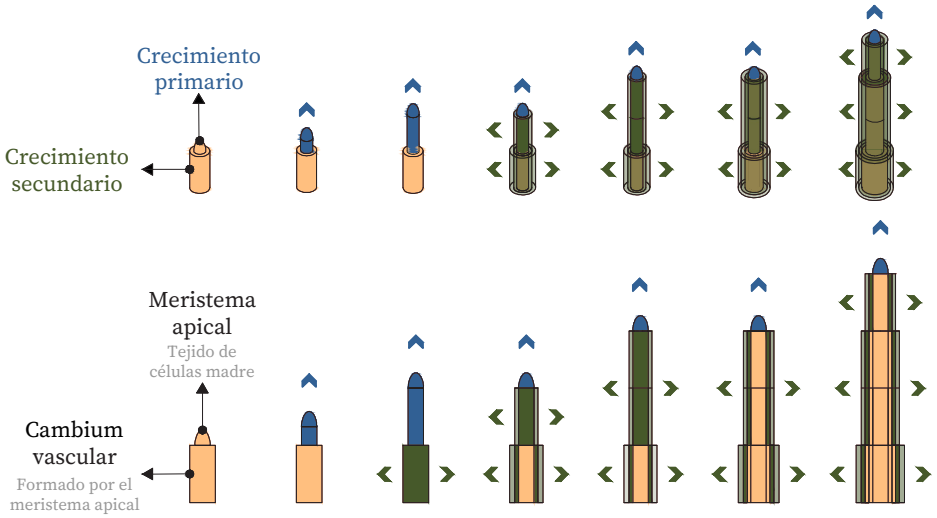


Figura 3.13 – Crecimiento primario y secundario

3.1.5 Generalidades del proceso de crecimiento de un árbol

Para comprender adecuadamente las propiedades de la madera, es fundamental analizarla desde sus distintas escalas, ya que cada una de ellas explica características y comportamientos específicos del material. Los árboles, en su proceso evolutivo, desarrollaron estrategias para competir por la luz solar necesaria para la fotosíntesis. Esta competencia condujo a la necesidad de crecer en altura, de manera de exponer la copa con sus hojas a la radiación solar, evitando la interferencia de otras especies. Esto, a su vez, exigió la aparición de un sistema de soporte estructural y de conducción eficiente de agua: el tronco, cuya formación es dinámica y continua.

En el árbol se pueden distinguir dos tipos de crecimiento. Si llamamos **ejes de crecimiento** al tronco, ramas y ramillas, se puede decir que cada eje crece en sentido longitudinal, es decir, se alarga mediante la disposición sucesiva de células que se organizan unas sobre otras. A esto, se le llama **crecimiento primario**. Paralelamente, la elongación de cada eje debe ser reforzada lateralmente, ya que aumentar en altura o longitud requiere mantener la estabilidad frente a cargas mecánicas, como el viento o el peso propio (Niklas y Spatz, 2012), y generar un sistema de conducción de agua y nutrientes hacia las nuevas estructuras en formación. A esto se le llama **crecimiento secundario**, que da origen a la madera, entre otros tejidos.

El **crecimiento primario** es generado por los meristemas apicales ubicados en los ápices y yemas del tronco, ramas y ramillas. Durante este proceso, cada eje no sólo crece vegetativamente, es decir, se alarga, sino que también puede formar estructuras laterales tales como yemas laterales, ramas o estructuras reproductivas (flores o estróbilos en el caso de las coníferas).

El **crecimiento secundario o radial** es generado por el cambium vascular, tejido ubicado entre el floema y la madera o xilema, que se extiende como un manto continuo desde la parte superior del tronco o de cualquier eje hacia su base. Es uno de los tejidos más importantes del árbol, ya que es el responsable de producir sistemáticamente xilema en función de los estímulos y ambientales y hormonas que recibe. En paralelo, y con menor frecuencia, la misma capa de cambium vascular produce hacia el exterior otro manto de células llamado floema, que transporta la savia elaborada a partir

de la fotosíntesis. En consecuencia, se van formando capas de xilema hacia el interior y de floema hacia el exterior, incrementando progresivamente el perímetro y el diámetro del tronco. Las capas de células leñosas del xilema, formadas radialmente durante un período de crecimiento, constituyen lo que conocemos como **anillo de crecimiento** (Larson, 1994).

Por último, sobre el xilema y el floema se encuentra la corteza, formada por el cambium de la corteza o cambium suberoso.

El proceso de crecimiento busca mantener relaciones alométricas armoniosas entre las hojas que demandan agua y los conductos leñosos que la transportan. Por esta razón, el crecimiento primario y el secundario se coordinan entre sí. Esta relación entre el follaje demandante y el sistema de conducción que transporta el agua ha sido planteada en términos teóricos como un modelo de cañerías (*pipe model*) (Shinozaki et al., 1964)(Mäkelä, 2002).

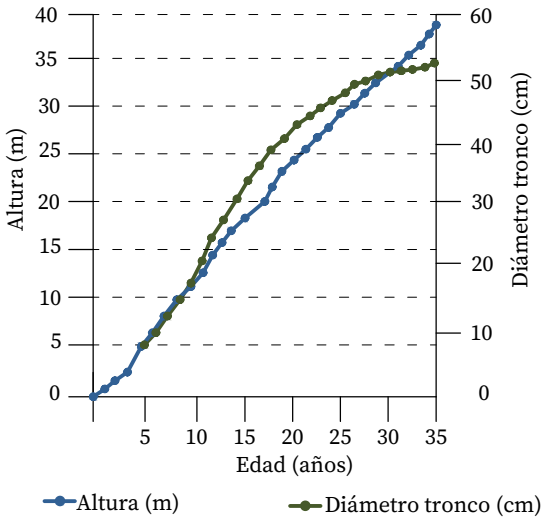


Figura 3.14 – Gráfico de crecimiento de *Pinus radiata* en años, altura y diámetro del tronco

Esta coordinación se puede observar en las curvas de crecimiento en altura y diámetro del tronco de los árboles (Figura 3.14). A medida que el árbol aumenta en edad, el crecimiento en altura comienza a declinar hasta eventualmente llegar a un crecimiento marginal, dado que el crecimiento primario distribuye en un número cada vez mayor de ápices de distintos ejes. Por su parte, el crecimiento en diámetro del tronco también comenzará a disminuir en términos aparentes, ya que se distribuirá sobre un perímetro cada vez mayor.

En paralelo a la formación de nuevo follaje y de nuevas células leñosas para transportar agua y nutrientes, el follaje más antiguo comienza a envejecer y a caer. Esto produce un desbalance entre la cantidad de capas del sistema de conducción y el follaje demandante de agua.

Con el tiempo, esto lleva a que las células internas, o más cercanas a la médula del tronco o de las ramas, y de los anillos de madera más cercanos a la médula del tronco primeros en formarse, comiencen progresivamente a perder su capacidad de conducción, dando origen al **duramen** (Mäkelä, 2002), una zona biológicamente inactiva pero estructuralmente relevante, que se explicará en detalle más adelante.

Por el contrario, las capas externas de madera que aún conducen agua o han sido recientemente formadas conforman lo que se denomina la **albura**. La velocidad de formación de la albura, así como su transformación en **duramen**, están determinadas tanto por factores internos del árbol, como la edad del cambium, y los procesos de formación del xilema, como por factores externos del entorno, tales como la disponibilidad hídrica, los nutrientes, la competencia con otros árboles, la temperatura y la luz, entre otros.

Este diseño, tan bien balanceado a nivel de estructura celular y mecánica, permite que existan árboles de más de 100 m de altura, como las secuoyas (*Sequoia sempervirens*), las secuoyas gigantes (*Sequoiadendron giganteum*), o el *Eucalyptus regnans*, capaces de transportar agua hasta esas alturas, y de resistir el peso de su estructura y las solicitaciones mecánicas a las que están sometidos. La altura y el diámetro máximo de cada especie dependen de factores genéticos y ambientales (Siau, 1984; Mäkelä, 2002)(Niklas y Spatz, 2012).

3.1.6 Xilogénesis o formación de la madera

La madera es llamada xilema (del griego *xylo*=madera) y la xilogénesis corresponde a la formación de la madera (del griego *xylo*=madera, *génesis*=generación, formación). La formación de la madera ocurre a partir de dos fenómenos, el crecimiento en altura o en longitud de cada eje de crecimiento (tronco, ramas, ramillas) y, paralelamente, el crecimiento en diámetro de estos ejes. Estos dos procesos dependen de dos tejidos distintos que actúan coordinadamente: el meristema apical y el meristema cambial o cambium vascular.

3.1.6.1 Meristema apical y meristema cambial o cambium vascular.

Ya hemos mencionado que las estructuras leñosas crecen en sentido longitudinal y radial. El ápice del árbol y el ápice de cada rama y ramilla, tienen un tejido llamado **meristema apical**. El meristema apical es un tejido de células madre, indiferenciadas, que sufren división mitótica para dar origen a nuevas células, las cuales a su vez se elongan. Las células nuevas producidas pueden diferenciarse en células leñosas de distinto tipo, en células conducentes a la formación de hojas, flores u otros órganos, o mantenerse como células meristemáticas.

Además, las células del meristema apical generan el cambium vascular (ver sección 3.1.2), que forma un manto que rodea la zona meristemática a medida que esta se reproduce y elonga, y comienza de inmediato a formar células leñosas en sentido radial. Es decir, en cuanto un eje (tronco, rama, ramilla) se elonga un poco producto de la división celular del meristema apical, esta nueva capa de cambium vascular comienza a generar células en sentido radial. Estas células producidas por el cambium vascular deben cumplir con el objetivo de empezar a abastecer de agua a los tejidos que se están formando más arriba, y a su vez, dar soporte mecánico a las nuevas estructuras (Esau, 2006).

El **cambium vascular** se encuentra bajo la corteza del árbol y genera tres tipos de células. Por una parte, sufre mitosis o división celular periclinal en sentido radial, generando hacia el interior células leñosas de distinto tipo que conforman el xilema o madera. Cada cierta cantidad de células xilemáticas producidas hacia el interior, el mismo cambium vascular produce células hacia el exterior, llamadas células floemáticas o del floema (ver sección 3.1.2), para abastecer a todos los tejidos vivos en los ejes de crecimiento y en las raíces. Dado que la tasa de producción de células hacia el interior es mayor que hacia el exterior, con el tiempo se pueden observar más células xilemáticas que floemáticas en un corte en plano trasversal del tronco.

Como en la generación de células hacia el interior o células xilemáticas, el perímetro sobre el cual se encuentra el cambium vascular aumenta, además el cambium debe auto regenerarse, para aumentar su superficie, lo que ocurre con divisiones anticlinales de nuevas células cambiales que extienden el tejido (Larson, 1994).

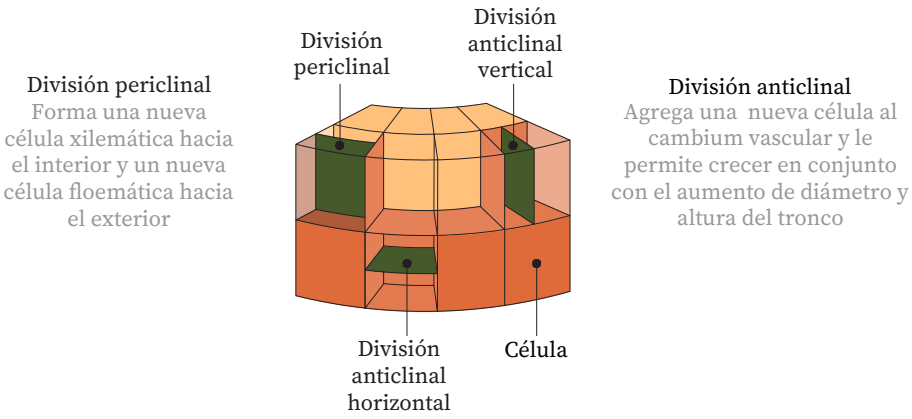


Figura 3.15 – División periclinal y división anticlinal

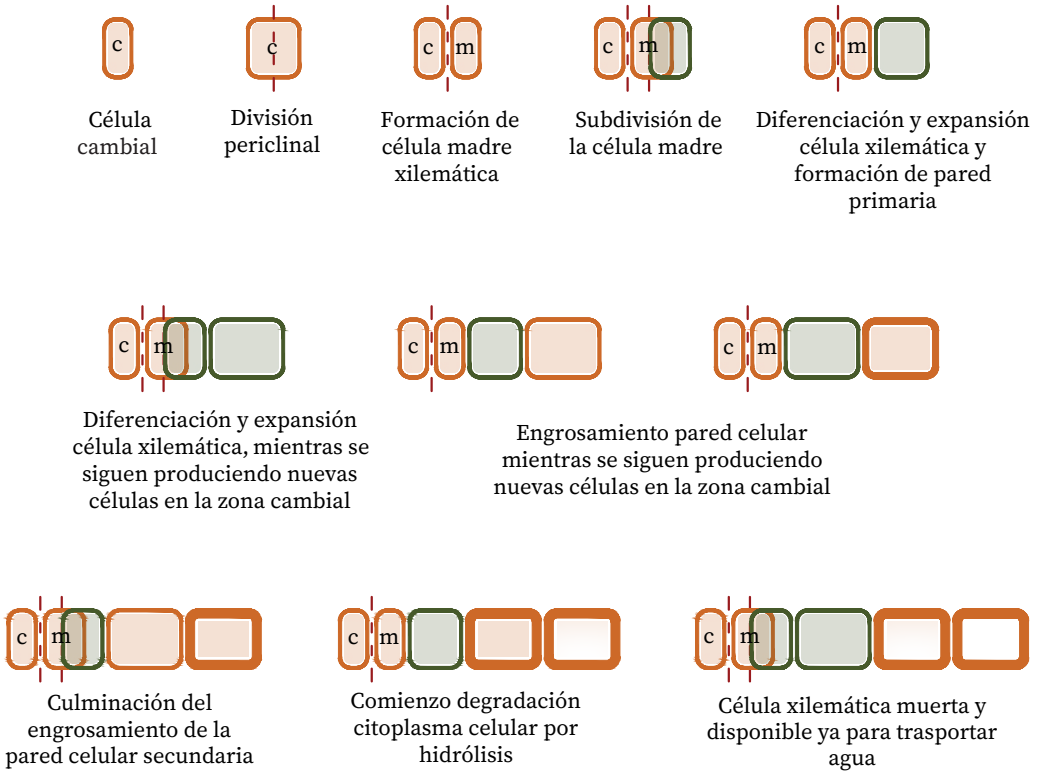


Figura 3.16 – Secuencia de formación de células madre desde el cambium vascular

3.1.6.2 Generación y desarrollo de una célula leñosa.

La formación del anillo de crecimiento anual es el resultado de la generación de varias células leñosas o xilemáticas (que contienen celulosa y lignina) en forma sucesiva desde el cambium vascular, y que van pasando por una serie de **etapas de desarrollo** durante la temporada de crecimiento. El cambium vascular está compuesto por células juveniles iniciales largas o fusiformes (con forma de huso) y células iniciales cortas, que **dan origen a células madre** por **división periclinal**. A su vez, cada **célula madre se subdividirá** varias veces antes de comenzar a **diferenciarse en las características** de la célula leñosa final (Butto et al. 2020; Larson, 2012).

Cuando una célula madre deja de subdividirse, comienza a expandirse en diámetro y longitud (etapa de expansión). En esta etapa se irá formando la pared celular primaria. La **expansión del tamaño de la célula** depende de factores ambientales y del nivel de turgor en los tejidos. Las células iniciales fusiformes darán origen a células leñosas tipo fibras, fibrotraqueidas, traqueidas, u otras de conducción de agua. Las células iniciales cortas darán origen a células parenquimáticas radiales que se mantienen vivas, y tienen la función de transportar y almacenar nutrientes minerales y fotosintatos (Esau, 2006).

Durante la etapa de expansión, la célula madre se va diferenciando en uno de los tipos de células leñosas

correspondientes. En esta etapa, el volumen de cada célula aumenta exponencialmente y **se sintetiza la pared primaria de la célula**, compuesta principalmente por celulosa, pectinas y polisacáridos no celulósicos Durante esta etapa la célula en expansión mantiene una pared primaria delgada y flexible, rica en microfibrillas de celulosa orientadas de manera de permitir el estiramiento. La velocidad y magnitud de la expansión determinan el tamaño final de lumen, lo que es clave para la conductividad hidráulica de la madera y su densidad (Ruel et al.; 2006; Guerriero et al., 2014; Kumar et al., 2015).

Una vez que la etapa de expansión termina, comienza la **etapa de engrosamiento** de la pared celular secundaria, o **síntesis de la pared secundaria**, aún antes de que termine la formación de la pared primaria, compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. Se depositan microfibrillas en una orientación paralela entre ellas, embebidas en una matriz de compuestos hemicelulósicos y lignina.

Este proceso consiste en la deposición de tres capas conocidas como S1, S2 y S3, cada una con distintas características descritas anteriormente. La capa S1, siendo la más externa, es la primera en depositarse, otorgándole una primera estabilidad estructural a la célula. Luego se deposita la capa S2, que comprende alrededor del 70 al 80% de la pared celular. El tiempo que dura la deposición de la capa S2 dependerá de la temporada en que ocurra (si es tempranamente en la primavera, o más tardía) y, por tanto, de la combinación de concentraciones de hormonas. Mientras más largo sea el período de depositación de celulosa en la capa S2, más gruesa será esta. Al final del proceso de formación de la célula se deposita la capa S3 o interior (Barnett y Bonham, 2004)(Ruel et al., 2006)(Kumar et al., 2015).

La **lignificación de la pared celular** corresponde a la etapa final del proceso de diferenciación celular del xilema y marca el paso de una célula flexible y viva a un elemento inerte, rígido y resistente. Tras la depositación de las capas S1, S2 y S3, la célula comienza a incorporar lignina en la matriz de polisacáridos. La lignina es sintetizada a partir de compuestos fenólicos y se deposita de manera gradual, impregnando la pared y volviéndola hidrofóbica y mecánicamente estable, dada su resistencia a la compresión. Es así como la matriz celulosa-lignina puede asimilarse a un hormigón armado, en el que la celulosa se equipara a la enfierradura (armadura de acero) y la lignina al cemento. Estas características son esenciales para sostener la estructura arbórea. La lignificación evita el colapso de las células, dejando expedita la función de los elementos traqueales funciones como sistema de conducción (Guerriero et al., 2014)(Schmitt et al., 2023).

Finalmente, y una vez completado el proceso de lignificación, comienza la **muerte de la célula** por la vía del colapso de la vacuola y liberación de hidrolasas, que permiten la **degradación del citoplasma el interior de la célula** por hidrólisis, pero no la pared celular. Con esto, la célula leñosa queda con sus paredes celulares rígidas y **listas para transportar agua** desde las raíces a las hojas (Kumar et al., 2015).

3.1.6.3 Efecto de las condiciones ambientales, desarrollo vegetativo, hormonas y posición del cambium vascular en la formación y características de la madera.

El proceso de formación de células leñosas desde el cambium vascular es un proceso que varía en el tiempo, dependiendo de la especie, del clima, y de la posición del cambium en árbol. En un momento dado, si se hace un corte transversal a alguna altura del árbol, se observará que pueden haber simultáneamente células madre en formación, subdividiéndose o ya en etapa de diferenciación y expansión; células diferenciadas ya expandidas y en etapa de engrosamiento de la pared celular, así como células que fueron formadas al principio de la temporada de crecimiento cuya pared celular ya está totalmente formada, ha desaparecido su citoplasma celular, y se encuentran transportando agua hacia el follaje (Fernández y Meléndez-Miguélez, 2016).

A lo largo de un año, la activación del cambium vascular y la tasa de producción de células, así como el tiempo que pasa una célula en etapa de expansión y de engrosamiento o también llamado **etapa de maduración de la pared celular**, depende de variables endógenas y ambientales, y la resultante será que, en un mismo anillo de crecimiento, el tamaño de las células y el grosor de su pared pueden variar, haciendo variar localmente las propiedades de la madera.

En esta cadena de eventos se puede indicar que; la actividad del cambium depende de la concentración de ciertas hormonas en torno al tejido cambial, que activan o no la división celular del cambium y de las células madre. A su vez, la concentración de hormonas depende de la generación de hormonas por parte de puntos de crecimiento (meristemas apicales en distintos lugares, incluyendo los meristemas de las raíces, hojas nuevas en formación). Y que la actividad de dichos meristemas y desarrollo vegetativo de hojas particularmente, dependen de las condiciones ambientales. Por tanto, es una cadena de eventos relacionados entre ellos, los que finalmente comandan la actividad cambial.

Esto es importante, porque es la directa explicación de por qué, para una misma especie, la formación del anillo de crecimiento en cantidad y características de las células varía en distintos ambientes (con mayor o menor temperatura, con mayor o menor disponibilidad de agua en el suelo, etc.), o en un mismo ambiente con variaciones climáticas en distintos años.

Hormonas de crecimiento de la madera

Las hormonas vegetales son moléculas de señal requeridas para que se produzcan casi todos los procesos fisiológicos y morfológicos, incluyendo la producción de células leñosas o crecimiento secundario (Novák et al., 2017).

Existen tres grupos de hormonas que están involucrados en la formación de las células leñosas; las **auxinas**, las **citoquininas** y las **giberelinas**.

Las **auxinas** son un grupo de compuestos producidos en varios órganos de la planta, pero principalmente en los primordios de hojas y en hojas jóvenes, y también en las raíces, semillas y flores en formación (Butto et al., 2020). Dentro de ellas, la más común es el ácido indolacético (IAA en inglés), que regula muchos procesos en la planta, incluyendo la diferenciación de las células del xilema.

El **ácido indolacético** al entrar en contacto con la zona cambial estimula la división del cambium vascular, es decir afecta la tasa de producción de nuevas células a partir del cambium. Actúa también sobre la expansión de la célula. Su efecto dependerá de su concentración, que se ha visto se distribuye en un gradiente con un valor más alto en el cambium vascular. Lo que ocurra con cada célula dependerá de la concentración de IAA que esté influyendo sobre ella. Así, a niveles altos de IAA las células cambiales y células madre del xilema y floema se dividen; a niveles moderados de concentración de IAA las células se expanden, y a niveles bajos de IAA comienza la formación de la pared secundaria (Butto et al., 2020).

Las **citoquininas** regulan diferentes aspectos del desarrollo de las plantas tanto en su parte aérea como subterránea, controlando el desarrollo de sus órganos. La citoquinina actúa como regulador, permitiendo a la planta adaptarse su entorno, incluyendo la luz que recibe la parte aérea y la cantidad de agua y nutrientes disponibles en las raíces. Además, participa en la respuesta frente a distintos tipos de estrés, tanto de origen biológico como ambiental. Estas hormonas promueven el crecimiento y proliferación del meristema apical y del cambium, ayudando al engrosamiento del tallo y la raíz e inhibiendo el desarrollo del meristema radicular promoviendo la división cambial. A su vez, la producción de citoquinina es afectada por variables ambientales tales como la presencia de luz alterando la respuesta a la luz roja y azul en el árbol, reducen el crecimiento ante sequías y su biosíntesis es estimulada por el efecto del nitrógeno. También responde a la falta de fósforo, azufre y hierro (Butto et al., 2020)(Werner et al., 2009).

Las **giberelinas**, se producen generalmente en las hojas ya maduras y conforman un grupo variado de diterpenos cíclicos, presentes en todas las plantas vasculares y algunos hongos. Tienen una activa participación en la elongación de las fibras del xilema y el crecimiento de los órganos axiales, en la germinación de las semillas, la reactivación cambial, participan en la señal de dife-

| TABLA 6 – HORMONAS DE CRECIMIENTO DE LA MADERA

	Hormonas		
	Auxina (IAA)	Citoquininas (CKs)	Giberelina (GAs)
Fuente principal	Hojas jóvenes, meristemas y semillas	Raíces, semillas y hojas maduras	Hojas maduras, brotes y semillas
Zonas de actuación	Cambium	Floema en desarrollo	Zona de expansión del xilema
Efectos principales	Estimulan división cambial, y expansión celular inhibiendo la lignificación	Estimula la proliferación cambial aumentando el número de células	Promueven la elongación de las fibras aumentando la longitud celular y promueven la formación de lignina dependiendo de la luz
Rol en la formación del anillo	Determinan el inicio de la temporada de crecimiento y la formación de madera temprana (células grandes de pared delgada)	Mantienen la actividad cambial durante la temporada aumentando el ancho del anillo	Favorecen la transición a madera más densa conformando la madera tardía
Interacciones	Antagonismo con CK en las raíces, necesaria para que actúe GA	Complementaria a IAA en división regula su distribución	Requieren niveles moderados de IAA para actuar, sinergia con la luz para lignificación.

renciación del floema, la floración y el desarrollo floral y estimulan en bajas concentraciones el crecimiento radicular (Aloni, 2021)(Butto et al., 2020)(Sponsel, 2003).

En términos generales las citoquininas actúan sobre el desarrollo del floema, las auxinas lo harán sobre el cambium, mientras las giberelinas actuarán en la expansión del tallo.

La tabla 6 resume el efecto de las hormonas en el crecimiento de la madera, mostrando su incidencia en la estructura de esta.

3.1.6.4 Madera temprana y madera tardía

En general las auxinas y citoquininas intervienen al inicio de la actividad cambial en primavera, mientras que las giberelinas actúan sobre la expansión de las células durante el crecimiento activo; en este período de alta actividad se forma la llamada madera temprana. Durante el otoño, por el efecto de la luz y la temperatura la actividad hormonal disminuye, lo que produce un descenso en la tasa de crecimiento de las células, produciendo la llamada madera tardía (Butto et al. 2020) (Larson, 1994).

La madera temprana, también llamada madera de primavera, se caracteriza por células leñosas con lumen más ancho y pared celular más delgada, diseñadas especialmente para el transporte de agua. La madera tardía, también conocida como madera de otoño, se caracteriza por células leñosas de lumen más pequeño y pared celular más gruesa, diseñadas especialmente para otorgar buen soporte mecánico (Jozsa y Middleton, 1994)(Fernández y Meléndez-Miguélez, 2016).

Dadas estas diferencias en la proporción de pared celular respecto al lumen, visualmente la zona de madera tardía puede parecer más oscura. La formación de madera temprana en la temporada siguiente generará un contraste de colores que permite distinguir el límite del anillo de crecimiento (Figura 3.17). Esto es particularmente fácil de observar en coníferas o en latifoliadas caducifolias. En algunas especies, el límite entre la madera tardía y la madera temprana de la temporada siguiente es más difícil de observar; en algunos casos el límite puede consistir en una leve variación del tamaño o frecuencia de los vasos, o en una capa delgada sin vasos y con mayor presencia de fibras (Figura 3.17). Por ello, es importante conocer la anatomía particular de cada especie y las variaciones celulares a lo largo del anillo de crecimiento.

3.1.6.5 Madera juvenil y madera madura

La edad del árbol también incide sobre la formación de la madera. El cambium en árboles jóvenes suele tener variaciones de actividad más rápidas que en árboles viejos, entrando y saliendo de la dormancia más rápidamente y generando mayor cantidad de vasos en la madera temprana. Sin embargo, el cambium en las latifoliadas adultas se vuelve más sensible a niveles muy bajos de auxinas. Asimismo, los árboles más jóvenes poseen una mayor proporción de hojas nuevas por unidad de biomasa, por lo que la concentración de auxinas es mayor, favoreciendo la actividad del cambium, lo

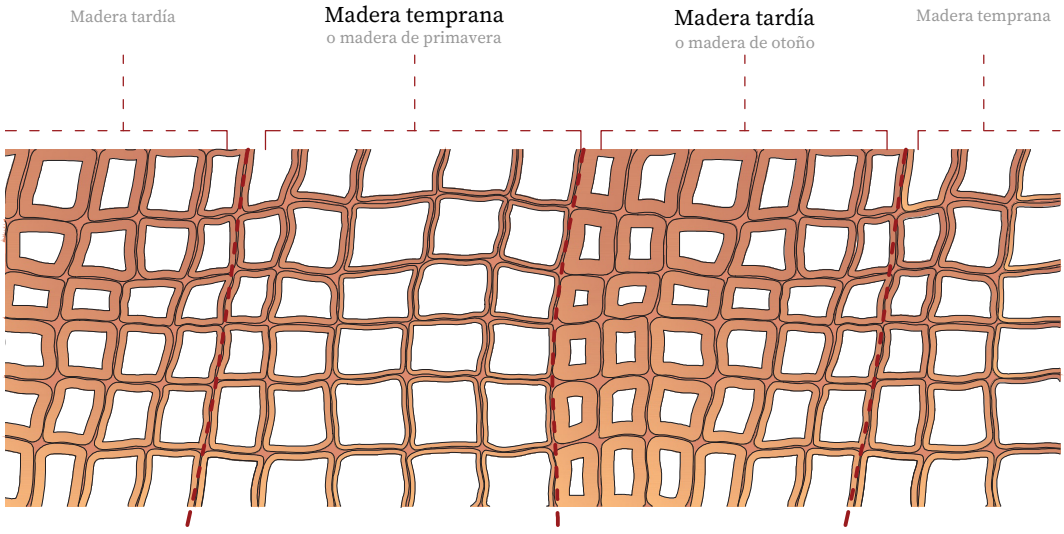


Figura 3.17 – Madera tardía y madera temprana

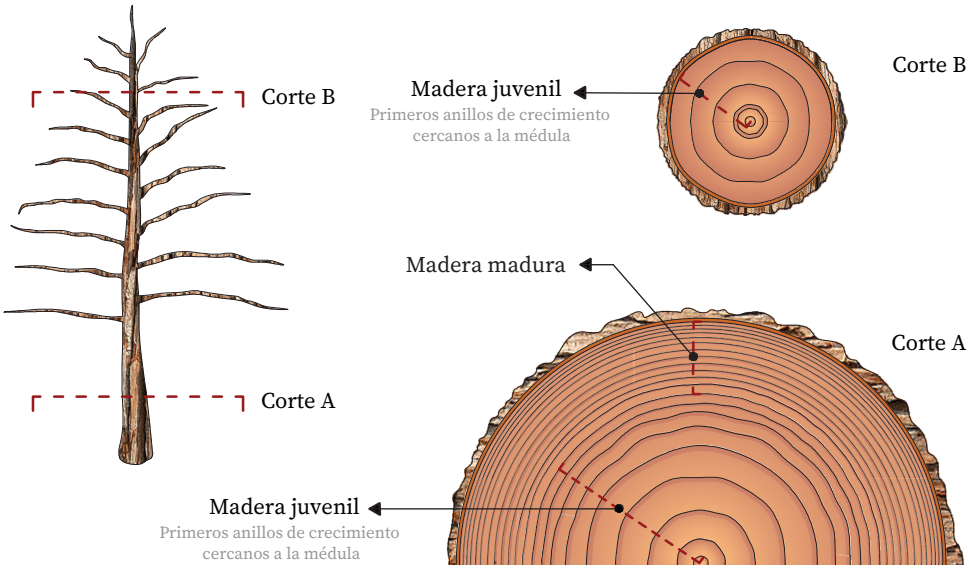


Figura 3.18 – Madera juvenil y madera madura

que explica en parte los anillos más anchos en la etapa juvenil (Figura 3.17)(Larson et al.,2001)(Aloni, 2021).

A su vez, en árboles maduros, con una mayor proporción de hojas maduras, la giberelina predomina sobre las auxinas, generando una menor cantidad de fibras y madera más densa, lo que explica la mayor densidad y los anillos más delgados en relación a árboles en etapa juvenil (Larson et al., 2001)(Aloni, 2021).

Finalmente, en árboles más viejos el transporte de las hormonas se vuelve más ineficiente debido a la distancia entre las zonas generadoras de hormonas en la copa y el cambium en la zona más basal del tronco. Es así como, en árboles de mayor edad, la concentración máxima de auxinas es más baja, la ventana de crecimiento es más corta y la transición a madera tardía ocurre antes (Aloni, 2021).

Supongamos, un árbol maduro de 30 años, con una altura total de 20 m y una altura de inicio de copa viva de 10 m. En su zona basal tendrá un cambium ya maduro, de 30 años, ubicado además a 10 m de distancia de la zona de copa viva donde se producen las hormonas. Su comportamiento será totalmente diferente al cambium en la parte alta de la copa, por ejemplo, a 19 m de altura, formado hace pocos años (cambium juvenil), totalmente rodeado por los tejidos que producen hormonas (hojas, ápices de ramas) y, por lo tanto, con un fuerte estímulo para la producción de células. Estas diferencias de edad del cámbium y de su posición relativa con respecto a la copa hacen que a lo largo del tronco se observen diferentes comportamientos del cambium y, como resultado, diferentes características de la madera en cuanto a la cantidad de células formadas en el anillo de crecimiento (ancho de anillo), el tamaño del lumen, el ancho de la pared celular y la longitud celular.

Al observar longitudinalmente un tronco, se observa que, cercano a la médula, se encuentran los anillos de crecimiento formados por el cambium cuando este era juvenil y se encontraba rodeado de la copa viva. Radialmente, y sobre todo en las trozas basales, se observa la transición de ese cambium juvenil a un cambium maduro, que produce anillos más angostos, pero con células más largas, con menor cantidad de células de madera temprana y, por lo tanto, proporcionalmente, con una mayor participación de las células de madera tardía en el anillo (Fernández y Cornejo, 2016).

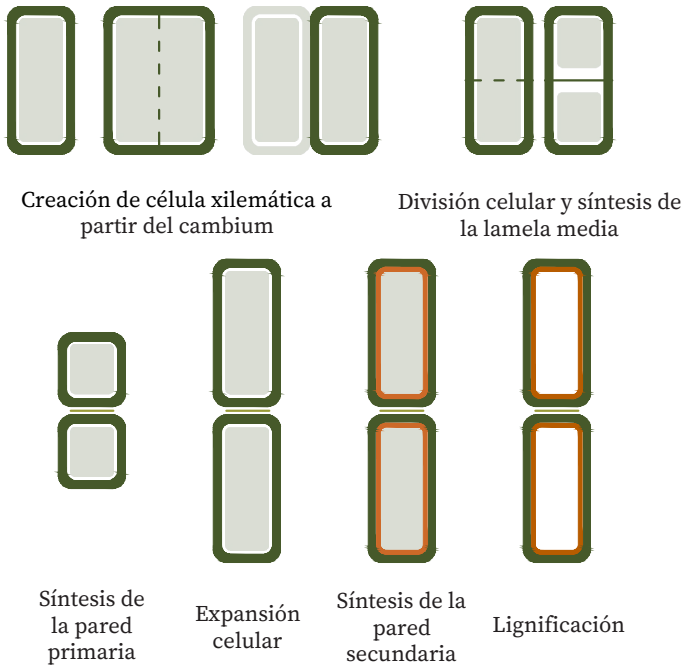


Figura 3.19 – Representación esquemática de la síntesis de la pared celular durante el desarrollo celular

Como ya se ha visto, es el cambium el tejido encargado de generar las células del xilema (hacia el interior) y del floema (hacia el exterior). Ahora el enfoque se dirige al proceso que siguen las células del xilema una vez que son liberadas del cambium. Las nuevas células formadas pasan por cuatro etapas reguladas por señales hormonales que están fuertemente relacionadas con las variables ambientales. Estas etapas se denominan generalmente: expansión, deposición de múltiples capas en la pared celular, lignificación y muerte programada; tal como lo muestra la Figura 3.18.

La expansión celular es una de las primeras etapas tras la división de las células cambiales. Una vez formada la célula hija, esta entra en una fase de crecimiento radial y longitudinal, donde el lumen se amplía antes de que se depositen las capas definitivas de la pared celular.

Durante esta etapa, la célula mantiene una pared primaria delgada y flexible, rica en microfibrillas de celulosa orientadas de tal manera para permitir el estiramiento. La expansión ocurre gracias a la turgencia interna, que empuja la pared hacia afuera, y a la acción de enzimas que relajan la matriz de polisacáridos. El proceso está regulado por hormonas como auxinas y giberelinas, que modulan la plasticidad de la pared.

La velocidad y magnitud de la expansión determinan el tamaño final del lumen, lo que es clave para la conductividad hidráulica y la densidad de la madera. En primavera, cuando el cambium es más activo, las células se expanden más, generando madera temprana de lumen más amplio; en verano, la expansión es menor y se forma madera tardía más densa.

3.1.6.6 Pared primaria, pared secundaria y lamela media

Al describir la pared celular se mencionó el **ángulo microfibrilar,** que corresponde a la inclinación en que se depositan las microfibrillas de celulosa con respecto al eje longitudinal de la célula leñosa. El ángulo microfibrilar tiene incidencia directa en las propiedades mecánicas de la madera. Como la capa S2 es la de mayor espesor, el término ángulo microfibrilar se refiere al ángulo de las microfibrillas en la capa S2 (Panshin y Zeeuw, 1980)(Barnett y Bonham, 2004).

El ángulo microfibrilar varía entre especies, entre individuos de la misma especie y al interior del individuo. En general, este ángulo puede variar entre 2° y 45°. En términos generales, el ángulo microfibrilar tiende a ser más alto en los anillos más cercanos a la médula del árbol (madera juvenil) que en los del exterior (madera madura). Esto hace que los árboles más jóvenes sean más flexibles pero, al mismo tiempo, menos resistentes a las cargas, lo que disminuye su valor comercial (Zobel y van Buijtenen, 1989)(Larson et al., 2001).

A su vez, el ángulo microfibrilar decrece con la altura, alcanzando su mínimo entre un 30% y un 50% de esta, para luego volver a incrementarse. El comportamiento es disímil en cuanto a madera tardía y temprana, y dependerá de la especie, el genotipo y las condiciones ambientales al momento de la formación de la célula.

La estructura de la pared celular ha evolucionado para hacer frente a las cargas internas y externas del árbol. Las fibras con un alto ángulo microfibrilar tienden a presentar un menor módulo de Young (o módulo de elasticidad), lo que permite una mayor flexibilidad. A medida que el árbol crece, requiere menos flexibilidad para soportar el peso sin doblarse; por ello, las células exteriores presentan un menor ángulo microfibrilar y, consecuentemente, un mayor módulo de Young, así como mayor resistencia a la tracción (Tabet y Aziz, 2013). Este cambio no es menor: un cambio del ángulo microfibrilar desde 40° en la madera juvenil a 10° en la madera madura puede generar una variación del módulo de elasticidad en un factor de cinco.

Las razones de las variaciones del ángulo microfibrilar aún no están del todo claras. Se ha observado que el ángulo microfibrilar se correlaciona con el largo de la fibra, lo que podría ser evidencia de que el mayor alargamiento de la célula extiende la microfibrilla y disminuye el ángulo microfibrilar. Por ello, las células leñosas de anillos más externos, que son más largas que las de anillos interiores de madera juvenil, presentan un menor ángulo microfibrilar y, por tanto, mejores propiedades. El ángulo microfibrilar está controlado por la presencia de microtúbulos en el plasmalema; otros autores consideran que está controlado por mecanismos físicos y depende de las fuerzas electrostáticas al interior de la célula (Barnett y Bonham, 2004).

3.1.7 Proceso de duraminización

La **duraminización** corresponde al proceso final de transformación de la madera. Mientras las células conductoras (vasos, traqueidas, fibrotraqueidas, fibras libriformes) funcionan como tejido conductor de agua, su estructura y funcionalidad se mantienen sin alteración. Son células muertas, vacías por dentro, cuyo lumen sirve de tubería de transporte. Esta zona conductora se llama **albura**.

El **duramen**, en cambio, corresponde a una zona de la madera que en algún momento fue albura, pero que producto de diversos cambios que se explicarán a continuación, deja de conducir agua y queda sólo como tejido de sostén mecánico del árbol. Con el tiempo, y a medida que se van agregando nuevas capas de madera conductora de agua, las células parenquimáticas longitudinales y las de los radios medulares, que hasta el momento habían permanecido vivas, en los anillos interiores, comienzan a morir. En el proceso, llamado duraminización, se produce una serie de cambios químicos al interior de las células, como la reducción de azúcares y almidón, la disminución de nitrógeno, y la producción de compuestos polifenólicos (grasas, taninos, gomas, aceites, ceras, compuestos aromáticos, entre otros). El contenido de humedad en la zona en duraminización disminuye (Haygreen y Bowyer, 1996).

Durante el proceso de duraminización, en algunas especies los vasos pueden quedar obstruidos con la deposición en su interior de estos compuestos polifenólicos. Los cambios químicos pueden llevar a cambios de color en la madera, aunque hay especies que duraminizan sin aparente cambio de color. Se puede producir **tilosis**, que corresponde a la distensión de la pared de una célula parenquimática dentro del lumen de un vaso a través de una punteadura, lo que disminuye la permeabilidad



Figura 3.20 – Duramen espino

de la madera, lo que se refleja en dificultades durante el proceso de secado o de impregnación. Esta tilosis puede contener gomas, cristales u otros compuestos (Panshin y de Zeeuw, 1980; Haygreen y Bowyer, 1996; De Micco et al., 2016) . Algunas especies como el roble, el raulí, la lenga, el coihue, el ñirre y el coihue de Magallanes presentan tilosis (Wagemann, 1949).

Los mecanismos que desencadenan el comienzo de la duraminización no están del todo claros. Una hipótesis señala que el exceso de tensión en la columna de agua puede producir embolismo, es decir, la interrupción de la columna de agua debido a un exceso de tensión que genera la expansión de burbujas de aire hasta interrumpir el flujo. En la medida en que un árbol es más maduro y alto, hay más probabilidad de que esto ocurra, y podría explicar el por qué la duraminización no se observa en árboles juveniles. Otra hipótesis plantea que el exceso de producción y almacenamiento de fotosintatos en células parenquimáticas del xilema puede llevar a su descomposición y generar la muerte del parénquima, desatando la duraminización (Haygreen y Bowyer, 1996; De Micco et al., 2016).

Lo cierto es que el **duramen**, en algunas especies, presenta propiedades químicas que le confieren mayor durabilidad natural contra el ataque de hongos e insectos (Archer y Lebow, 2006). Se ha determinado que la concentración y composición de los compuestos extraíbles tóxicos, tales como terpenos, alcaloides y fenoles generados durante la duraminización, constituyen la principal propiedad de la madera relacionada con su durabilidad natural (Martín y López, 2023), superando el efecto de otros factores relacionados con la anatomía, la densidad, el contenido de lignina y el contenido de humedad de la madera.

El duramen, además, no contribuye al transporte de agua y contiene menos humedad que la albura. En muchas especies el duramen es de color más oscuro, particularmente en latifoliadas. Es una de las características que hace valiosas a determinadas especies, como el ébano negro (*Diospyros ebenum*), el aromo australiano *(Acacia melanoxylon*, melano = negro; xylon = madera), usado para instrumentos musicales y muebles, o en Chile el roble *(Nothofagus obliqua*), cuya madera duraminizada de tonalidad más rojiza y oscura es conocida como roble pellín, o roble apellinado.

3.2 Propiedades físicas y mecánicas

3.2.1 Propiedades físicas

Las propiedades físicas y mecánicas de la madera son el reflejo de su estructura anatómica y composición química, y determinan su desempeño frente a cargas, esfuerzos y condiciones ambientales. La respuesta de la madera frente a solicitaciones mecánicas está directamente relacionada con la organización de sus células, la proporción de duramen y albura, la densidad y la orientación de las fibras. Comprender estos aspectos es fundamental para evaluar su comportamiento en aplicaciones estructurales y no estructurales.

3.2.2 Densidad

La densidad es una de las características físicas más importantes de la madera, expresada en kg/m^3 o g/cm^3, y se define como la razón entre su masa y su volumen. Es un parámetro determinante en su comportamiento físico, mecánico y biológico, condicionado por la anatomía del tronco, la tasa de crecimiento, la composición química y la estructura celular. En la madera —material poroso compuesto por paredes celulares y espacios vacíos (lumen)— esta propiedad está determinada por la proporción entre pared y lumen y el contenido de humedad.

La densidad se define como la masa de un cuerpo dividido por su volumen. En el caso de la madera, que es un material poroso compuesto por paredes celulares y espacios vacíos correspondientes al lumen de las células, la densidad de la madera estará determinada por la proporción de pared celular y lúmenes, que depende de su anatomía, y su contenido de humedad.

La densidad de la pared celular varía muy poco entre diferentes especies y dentro del individuo, manteniéndose en torno a los 1,5 g/cm^3, esto a pesar de las variaciones en la composición y proporción de las macromoléculas que conforman la pared celular.

Es así como la lignina tiene una densidad de 1,35 g/cm^3, las hemicelulosas varían entre 1,5 g/cm^3 y 1,8 g/cm^3 y la celulosa tiene una densidad de 1,56 g/cm^3. En las coníferas, la celulosa es el material más abundante de la pared con un 40% a 50% del total, seguido por las hemicelulosas (20% a 35%) y la lignina (15% a 35%).

De esta manera, la densidad de la madera estará dada por la razón entre el grosor de la pared, el tamaño del lumen y la cantidad de agua que esta contenga. Esta dependencia entre densidad y contenido de humedad tiene su origen en la higroscopicidad de la madera: su capacidad constitutiva para absorber o liberar agua según las condiciones del entorno, con efectos directos sobre sus dimensiones, su densidad y su resistencia biodeterioro.

Debido al efecto del peso del agua en el valor de la densidad de la madera es que al referirse a la densidad es necesario distinguir el porcentaje de humedad contenido en la madera, ya que el contenido de humedad afectará por una parte el peso de la madera y por el otro su volumen, ya que la madera bajo un cierto contenido de humedad (<30%) se contrae al perder el agua ligada. Por este motivo, en términos técnicos se habla de distintos tipos de densidad de madera.

Sobre esta base anatómica actúan factores biológicos y ambientales que modulan la densidad a lo largo de la vida del árbol. La especie, las condiciones ambientales, la edad y la tasa de crecimiento influyen directamente en la proporción entre madera temprana y tardía.

Es así como en un mismo árbol encontramos diferentes densidades:

Variación intra-anillos: Existe una variación en el tamaño del lumen entre la madera temprana y tardía, siendo la primera de lúmenes más grandes y pared

| TABLA 7 – TIPOS DE DENSIDAD Y LA RELACIÓN CON EL CONTENIDO DE HUMEDAD (CH, %)

Tipo	Masa de referencia	Volumen de referencia
Básica	Seca (0% CH)	Verde (≥ 30% CH)
Nominal	Seca (0% CH)	A CH% < 30%
De Ensayo	A CH% dado	Al mismo CH%
Anhidra	Seca (0% CH)	Seco (0% CH)
Verde	A CH% saturado	A CH% saturado
Normal	A 12% CH	A 12% CH

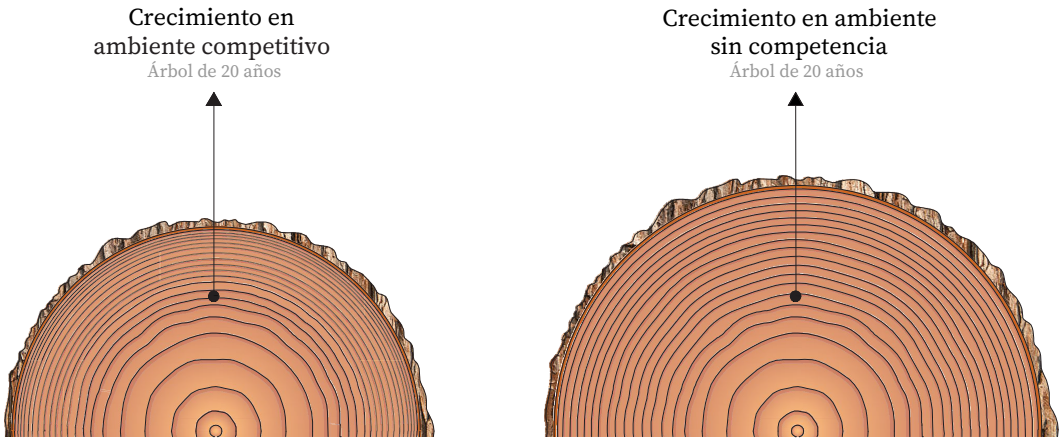


Figura 3.21 – Rodela de árbol creciendo libremente y bajo alta densidad de rodal

celular más delgada. Consecuentemente la densidad de la madera será mayor en la madera tardía que en la madera temprana.

Variación radial con la edad del árbol, A medida que el árbol envejece el tamaño de los lúmenes de las células es menor con respecto a la pared celular, es por esto por lo que la madera localizada hacia el exterior del tronco tendrá una mayor densidad que aquella contenida hacia el interior. Además, en los anillos más lejanos a la médula, la participación porcentual de la madera tardía se va haciendo mayor, aumentando así el promedio de densidad de la madera en el anillo. En resumen, a medida que pasan los años y se acumula más anillos a una misma altura del árbol, el promedio de la densidad de la madera aumenta.

La **variación axial con la edad del árbol**, dado que el cambium en la parte superior de un árbol es más joven que el cambium en la parte inferior, se produce el mismo efecto que observamos en la variación radial. Las células formadas en un mismo año en la parte inferior de un árbol tendrán lúmenes más pequeños que aquellas formadas en la parte superior, por lo que dentro del mismo manto de madera anual, la madera en la parte inferior del tronco tendrá una mayor densidad que aquella de la parte superior.

Árboles que crecen rápidamente en ambientes poco competitivos tienden a desarrollar madera de menor densidad, mientras que aquellos sometidos a condiciones más restrictivas o a alta competencia presentan densidades mayores. Esto demuestra que la densidad es una propiedad dinámica y altamente sensible al entorno de crecimiento (Figura 3.20).

La densidad de la madera puede variar considerablemente entre especies (Figura 3.21), entre individuos de una misma especie y dentro de un mismo individuo. En términos generales, la densidad de las especies puede variar desde los 110 k/m^3 en *Ochroma pyramidale* (madera de balsa) hasta los 1355 k/m^3 en *Krugiodendron ferreum* (madera de hierro) proveniente del Caribe. Sin embargo, normalmente la mayor parte de las especies tienen densidades de la madera que van entre los 330 y los 600 kg/cm^3.

Desde el punto de vista de la industria, la densidad influye en la durabilidad y en la capacidad de impregnación de preservantes. Las maderas de mayor densidad presentan una menor permeabilidad, lo que limita la penetración de preservantes; sin embargo, una vez aplicados, tienden a retenerlos de manera efectiva. En contraste, las maderas de menor densidad poseen una mayor permeabilidad, lo que facilita la penetración de los preservantes, aunque su capacidad de retención puede ser limitada.(Lebow, 2010)(Young et al., 2019).

Asimismo, la densidad condiciona los usos posibles de la madera. Especies livianas se emplean en la producción de papel o aplicaciones no estructurales, mientras que maderas densas se destinan a mobiliario, elementos estructurales y construcción. Además, la densidad influye en la cantidad de dióxido de carbono que puede almacenarse en el material, aportando a la evaluación ambiental y la sostenibilidad de su uso.

En Chile, la densidad de la madera se encuentra regulada por normas que permiten su correcta clasificación y uso en aplicaciones estructurales y no estructurales. La NCh1198 establece valores de densidad húmeda, básica

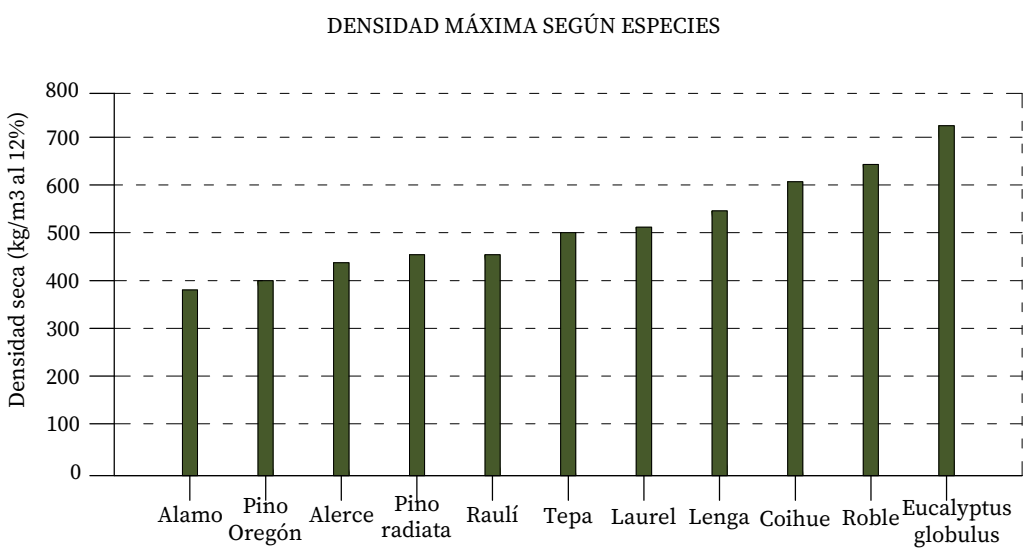


Figura 3.22 – Densidad seca de distintas especies arbóreas

y seca por especie, mientras que la NCh176/2 define los procedimientos para determinar densidad normal, anhidra, básica y nominal, considerando la humedad y los distintos estados volumétricos del material. En el caso de los paneles de madera, la densidad se determina según la NCh792. La correcta caracterización de la densidad constituye un parámetro fundamental para la evaluación del comportamiento estructural de la madera frente a cargas externas y para la adecuada especificación del material en proyectos de ingeniería y arquitectura.

El agua en la madera

El agua es un constituyente natural de de la madera, cuya principal función es transportar agua desde las raíces a todos los tejidos del árbol. Aunque gran parte de las células de la madera están muertas, en un árbol en pie o en madera verde recién cortada, el peso del agua puede ser igual e incluso mayor que el peso de la madera seca (Shmulsky y Jones, 2019).

La madera es un material **higroscópico**, es decir, tiene afinidad por el agua y otros líquidos polares en forma de líquido o en forma de vapor (Panshin y de Zeeuw, 1980), y regula su humedad interior a través de la absorción o liberación de agua contenida, en relación con la humedad relativa y la temperatura del ambiente en que se encuentra, alcanzando, luego de un tiempo, la humedad de equilibrio.

La presencia de agua en la madera afecta sus propiedades físicas y mecánicas, su resistencia al biodeterioro y su estabilidad dimensional, ya que la adición de agua a la pared celular cambia su densidad y dimensiones, afecta la plasticidad y la transferencia de energía dentro de una pieza de madera. En cuanto al biodeterioro, en la medida en que la madera está más saturada de agua, la falta de oxígeno dificulta el desarrollo de los hongos (Panshin y de Zeeuw, 1980)(Shmulsky y Jones, 2019). Estos mecanismos de degradación se desarrollan en profundidad en el Capítulo 4.

El agua que contiene la madera se puede clasificar según la ubicación que ocupa en la célula: se denomina **agua libre** aquella que se ubica en el lumen de las células, y **agua ligada**, aquella que impregna las paredes de las células, unida por fuerzas de adsorción (Shmulsky y Jones, 2019).

El **agua ligada** está unida a la pared celular por fuerzas de adsorción de naturaleza fisicoquímica, consistentes en la atracción de las moléculas de agua a zonas de enlaces de hidrógeno presentes en la celulosa, hemicelulosa y la lignina. Las fuerzas de atracción entre el agua y la madera seca son tan fuertes que es imposible evitar la ganancia de humedad, lo que le confiere a la madera su carácter higroscópico. Las moléculas de líquidos polares, como el agua, se difunden entre las microfibrillas de la pared celular, generando una expansión lateral en relación con el sentido del eje longitudinal de las microfibrillas, en la medida que las moléculas del líquido se van alojando entre ellas. Cuando todos los enlaces de hidrógeno de la pared celular han sido

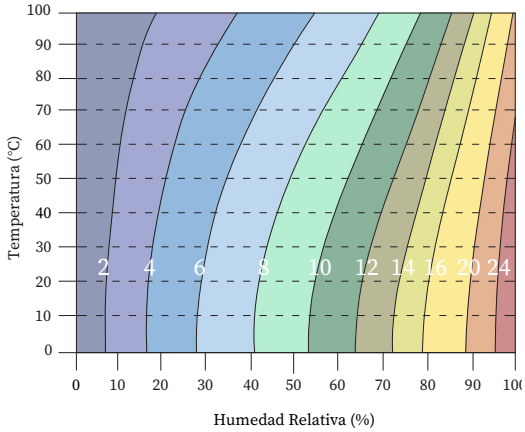


Figura 3.23 – Humedad de equilibrio higroscópico (HEH) en función de la humedad relativa y la temperatura

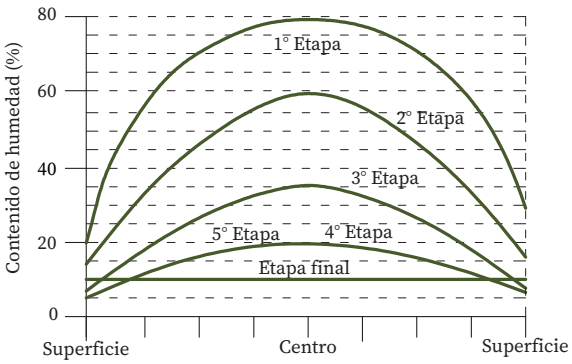


Figura 3.24 – Regiones exteriores de la madera se secan más que aquellas zonas interiores conformando un gradiente de humedad

ocupados por las moléculas del líquido polar, se considera que la pared celular está saturada (Panshin y de Zeeuw, 1980)(Shmulsky y Jones, 2019).

El **punto de saturación de la fibra** (PSF) corresponde al punto en que toda la pared celular de las fibras está saturada de agua, pero no hay agua libre en el lumen de las células. Este generalmente varía entre un 25% y 30% de contenido de humedad, asumiéndose el valor máximo (30%) como valor de referencia (Panshin y de Zeeuw, 1980)(Walker, 2006)(Ross y Anderson, 2021).

El **agua libre** es aquella agua en estado líquido o gaseoso que se encuentra absorbida al interior del lumen o de los espacios intercelulares, ya sea cuando el árbol está vivo o en otras condiciones que pueden causar que el lumen celular acumule agua. Cuando se alcanza la saturación total del lumen, se alcanza el contenido máximo de humedad de la madera, que puede llegar a un 60% para maderas pesadas hasta un 200% para maderas livianas (Panshin y de Zeeuw, 1980).

El agua libre y el agua ligada constituyen la masa de agua contenida en la madera. La relación entre esta masa de agua y la masa de la madera seca que la contiene define el contenido de humedad del material, expresado como la razón entre el peso del agua y el peso seco de la madera, en porcentaje (Shmulsky y Jones, 2019)(Panshin y de Zeeuw, 1980). Dado que el denominador corresponde al peso seco y no al peso total de la muestra, el valor del contenido de humedad puede superar el 100%.

La **sorción de vapor de agua** en la madera se refiere al cambio de fase entre el vapor de agua y el agua contenida en la madera, y es lo que permite a la madera ganar o perder humedad en condiciones normales. Cuando la madera está protegida del contacto con agua líquida y de fuentes de calor, su contenido de humedad dependerá de la temperatura y de la humedad relativa del ambiente que la rodea. Las variaciones del contenido de humedad debidas a los cambios ambientales son en general graduales, y las fluctuaciones de corto plazo suelen afectar solamente a la madera superficial.

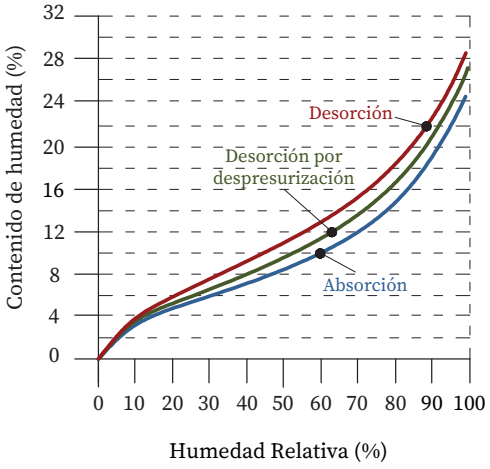


Figura 3.25 – Isoterma de sorción de la madera: curvas de absorción y desorción muestran el fenómeno de histéresis.

En condiciones estables de temperatura y humedad relativa, la madera alcanza la llamada **humedad de equilibrio higroscópico (HEH)**, definida como aquella humedad en que la madera no gana ni pierde agua. A mayor temperatura ambiente, la humedad de equilibrio será menor; a menor humedad relativa, la humedad de equilibrio también será menor (Ross y Anderson, 2021). Puede observarse además que en condiciones atmosféricas la madera nunca alcanza el punto de saturación de la fibra, requiriéndose para sobrepasarlo que la madera sea inmersa en agua líquida.

El comportamiento del agua durante el proceso de secado (desorción) e hidratación (absorción) responde directamente a la distinción entre agua libre y agua ligada. Durante el secado, el agua libre será la primera en ser evacuada. Una vez que esta haya desaparecido, será el turno del agua ligada que requiere una mayor cantidad de energía para producir su separación de las fibras. En el caso de la hidratación, si la madera se encuentra por debajo el punto de saturación de la fibra, se repondrá primero el agua ligada para luego continuar con el agua libre.

Dadas las fuerzas de atracción a nivel de la pared celular durante el proceso de secado o de hidratación en condiciones de humedad bajo el punto de saturación de la fibra, el agua será adsorbida o eliminada directamente de la pared celular (agua ligada), lo que afectará a las dimensiones de la madera contrayéndose en caso de perder agua o provocando hinchamiento al ganar agua. Por sobre el punto de saturación de la fibra la pérdida o ganancia de agua (agua libre) no alterará las dimensiones de la madera quedando esta alojada en el lumen de la célula (Forest Products Laboratory, 2015).

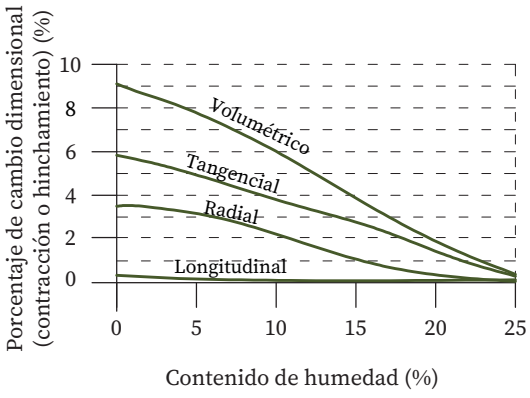


Figura 3.26 – Cambios dimensionales de la madera según el eje de medición: longitudinal, radial y tangencial

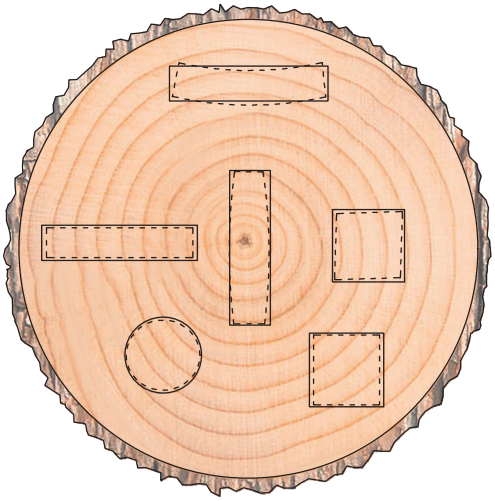


Figura 3.27 – Deformaciones diferenciales características en piezas de madera aserrada durante el secado.

Durante la desorción (secado) el agua se mueve de aquellas zonas con mayor humedad en el interior de la madera a aquellas zonas con menor humedad hacia el exterior de esta, formándose un gradiente de humedad al interior de la madera. Es así como podemos graficar la pérdida de humedad o desorción si se aumenta la temperatura y/o disminuye la humedad relativa del ambiente.

La velocidad a la que ese gradiente se disipa está determinada por la permeabilidad de la madera: la capacidad de sus pasajes para conducir el agua depende de su tamaño. Por encima de 1 micrón el flujo es libre; por debajo, se ralentiza considerablemente. En las coníferas, la permeabilidad longitudinal está limitada por el margo de la membrana punteada —estructura menor a 1 micrón—, mientras que en las latifoliadas los vasos de mayor diámetro permiten hasta 10 veces más permeabilidad longitudinal, aunque pueden reducirse significativamente por tilosis o gomas. En ambos grupos de especies, la permeabilidad lateral es entre 1.000 y 10.000 veces menor que la longitudinal, siendo la dirección tangencial ligeramente menos permeable que la radial (Panshin y de Zeeuw, 1980).

La relación entre el contenido de humedad de equilibrio y la humedad relativa a una temperatura constante se denomina **isoterma de sorción**. Sin embargo, esta curva cambia si la muestra está siendo sometida a un proceso de secado (desorción) o de hidratación

(absorción): en desorción, a igual humedad relativa, la humedad de equilibrio será mayor que durante la absorción. Este proceso es conocido como **histéresis** (Ross y Anderson, 2021).

La adición de agua o cualquier otro líquido polar a la pared celular, en condiciones de humedad menores al punto de saturación de la fibra, causa que la red de microfibrillas que la componen se expanda en la proporción del líquido agregado. Una vez que se alcanza la saturación de la pared, la adición de agua extra no ocasionará modificaciones en las dimensiones. Así también, durante la desorción, la contracción de la pared celular solamente comienza una vez que el contenido de humedad es menor al punto de saturación de la fibra (Panshin y de Zeeuw, 1980).

Sin embargo, dada la naturaleza anisotrópica de la madera, los cambios dimensionales no son iguales en sentido longitudinal, radial y tangencial. La contracción tangencial será mayor que la radial, y esta a su vez mayor que la longitudinal: desde madera verde a seca al aire (12%), la contracción longitudinal es de solo un 0,1% a 0,3%; en sentido radial, de un 2% a 3%; y en sentido tangencial, puede llegar al 4% a 6%.

Esta diferencia en el porcentaje de contracción tiene un efecto en distorsión de la madera aserrada una vez secada, produciendo deformaciones diferenciales en las caras de esta como se muestra en la Figura 26.

Las implicancias de este comportamiento para el diseño de juntas, encuentros y detalles constructivos se abordan en el Tomo III.

3.2.3 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de la madera comprenden resistencias y rigideces, cada una con un rol distinto en el diseño estructural. Las resistencias —a tracción, compresión, corte y flexión— establecen los límites máximos de carga que puede soportar un elemento; según la filosofía de diseño adoptada, estos límites se expresan como tensiones admisibles (ASD) o como resistencias últimas (LRFD). Las rigideces —módulo de elasticidad (E) y módulo de corte (G)— permiten estimar las deformaciones del elemento ante cargas de servicio, y constituyen el parámetro de control cuando el criterio de diseño es la deformación máxima admisible.

La orientación de las fibras confiere a la madera un marcado carácter anisotrópico, descrito mediante tres ejes anatómicos ortogonales: longitudinal (L), paralelo a las fibras; radial (R), perpendicular a los anillos de crecimiento; y tangencial (T), tangente a estos (Figura 3.27). La dirección longitudinal concentra la mayor resistencia y rigidez del material —con valores de E entre 10 y 30 veces superiores a los de las direcciones radial y tangencial— lo que determina que los elementos estructurales se orienten con las fibras paralelas a la dirección principal de carga.

A nivel de la pared celular (Figura 3.12), la capa S2 absorbe la mayor parte de los esfuerzos de tracción debido a la orientación predominantemente longitudinal de sus microfibrillas, mientras que las capas S1 y S3, con fibras más inclinadas, contribuyen a la estabilidad frente a esfuerzos de compresión, limitando la flexión lateral

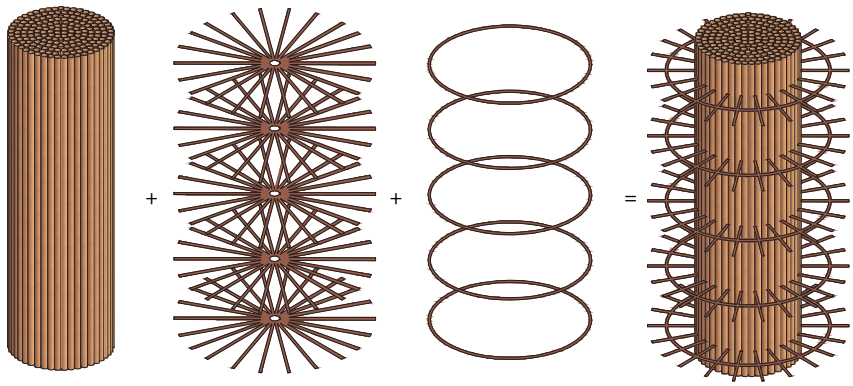


Figura 3.28 – Comportamiento estructural según la dirección de las fuerzas

TABLA 8 - SINGULARIDADES EN LA MADERA

Singularidad	Descripción		Especie	Efecto
Nudo vivo o fijo	**Nudos**: Se originan por ramas que crecen desde la médula del árbol.	Se forma mientras la rama está unida al árbol.	**En coníferas:** Los nudos se presentan agrupados.	Causan desviación e interrupción de las fibras, disminuyendo resistencia y rigidez.
Nudo muerto o suelto		La rama se cae, y el árbol continúa su crecimiento envolviendo el cono de esta.	**En latifoliadas:** Los nudos se presentan más dispersos.	
Madera de reacción	Se genera por esfuerzos externos como sería la fuerza que ejerce el viento e inclinación del terreno.		**En coníferas:** se expresa como madera de compresión.	Mayor densidad, pero menor calidad estructural por la inclinación de las microfibrillas.
			En latifoliadas: se expresa como madera de tracción.	
Fisuras	**Fisuras y deformaciones:** Aparecen por contracciones desiguales durante el secado.	Por diferentes niveles de contracción en las tres direcciones principales.	**En coníferas:** Deformaciones pueden ser más previsibles.	Afectan negativamente sobre todo en flexión y compresión.
Deformaciones		Por la pérdida de agua bajo el punto de saturación de las fibras.	**En latifoliadas:** Grandes vasos y una estructura heterogénea puede provocar fisuras internas o deformaciones irregulares.	No alteran la resistencia, las piezas pueden quedar fuera de la tolerancia dimensional.
Reacciones del árbol	Reacción de los árboles ante ataques externos, alteraciones que se ponen de manifiesto luego del aserrado de las piezas estructurales.		**En coníferas:** Se desarrollan bolsas de resina.	Pueden afectar localmente las propiedades mecánicas de la madera.
			En latifoliadas: En eucaliptos se desarrollan bolsas de Kino.	

y el pandeo. En Chile, la NCh1198 establece los valores de diseño por especie y clase de resistencia; los valores específicos se presentan en las fichas del capítulo 5.1.

La madera presenta singularidades (Tabla 8) que influyen en su desempeño mecánico. Entre estas se incluyen los nudos, las variaciones en la orientación de las fibras, las deformaciones y otros defectos estructurales. La presencia y las características de estas singularidades se relacionan con el manejo silvícola, los procesos de producción y las condiciones ambientales, y se consideran en la clasificación por resistencia y en la predicción del comportamiento estructural de las piezas en servicio.

3.3 Efectos de la estructura y propiedades de la madera en la impregnación

La heterogeneidad de la madera, sus estructuras y los diferentes procesos de impregnación afectarán los resultados esperados de este proceso. En general, se pueden distinguir métodos de impregnación no presurizados, que van desde el pintado o aspersión del producto hasta el método de difusión. Asimismo, existen métodos que combinan vacío y presión para impregnar la madera. Los productos preservantes pueden variar desde sales solubles en agua, aceites o polímeros, algunos de ellos incluso pueden llegar a modificar químicamente la pared celular. Por ello, las reacciones entre la estructura celular, el proceso y los compuestos de impregnación pueden ser variadas.

La permeabilidad de la madera a la penetración de los productos preservantes está relacionada con el tamaño de los pasajes disponibles para el transporte de gases y líquidos, dependiendo del tamaño de estos (Panshin y Zeeuw, 1980).

A nivel de coníferas y latifoliadas, estas últimas presentan una mayor variabilidad en cuanto a su permeabilidad a la impregnación; esto se debe a la gran variabilidad que muestran en sus características como resultado de su amplia distribución geográfica (Siau, 1984)(Panshin y Zeeuw, 1980).

Existen además diferencias a nivel de especie. Por ejemplo, las especies del género Pinus son más fáciles de impregnar, debido a que las punteaduras de las células radiales son de mayor tamaño que las de las especies del género Picea, facilitando el paso de líquidos en dirección radial.

A nivel macroscópico la albura tiene una mejor respuesta a la impregnación. Su condición de madera fisiológicamente activa, con sus estructuras de transporte aún funcionales la hace más permeable a los productos preservantes. En el otro extremo, la madera duraminizada ha sufrido procesos de transformación tales como la deposición de compuestos conocidos como extractivos y, en algunos casos, la oclusión de los poros, lo que dificulta la impregnación al no permitir el libre tránsito del producto preservante a través del tejido celular. Esto sucede especialmente en especies latifoliadas (Mac Lean, 1953)(Panshin y Zeeuw, 1980).

A nivel microscópico, la estructura de las coníferas presenta ventajas sobre las latifoliadas. Durante el proceso de vaciado del lumen en las células de las latifoliadas se produce en varias especies la llamada tilosis, en la que las perforaciones celulares que unen los vasos quedan obstruidas por las membranas que los conforman, generando con ello estructuras estancas que no permiten el movimiento del producto preservante, haciéndolas impermeables a la impregnación. Este proceso ocurre generalmente en la madera madura y con menor frecuencia en la madera juvenil durante los procesos de secado industrial (Mac Lean, 1953).

Los canales resiníferos suelen ser problemáticos al momento de la impregnación debido a la obstrucción de ciertas áreas en la madera de coníferas, lo que es especialmente relevante en algunas especies, en particular en la madera madura (Mac Lean, 1953).

La madera temprana de coníferas suele ser menos permeable que la madera tardía; sin embargo, en las latifoliadas, la presencia de los vasos hace que la madera temprana sea más permeable que la madera tardía. Por otra parte, otros autores indican que la madera temprana es más propensa a la tilosis, debido principalmente a que el espesor de la pared de la madera tardía hace menos probable que las membranas de las perforaciones obstruyan los poros (Siau, 1984) (Walker, 2006).

En general, el proceso de impregnación es menos dificultoso en el sentido longitudinal de la fibra, ya que en el sentido transversal el producto preservante debe atravesar las paredes celulares, lo que dificulta considerablemente la penetración en esa dirección. En cambio, en sentido longitudinal, el líquido se mueve en la dirección de la fibra a través del lumen, siguiendo la dirección de los vasos y las traqueidas (Mac Lean, 1953)(Siau, 1984)



04
Fundamentos de la durabilidad



Figura 4.1 – Esquema factores de deterioro

4.1 Fundamentos de la durabilidad

La madera es un material natural y orgánico, por lo tanto, susceptible al ataque de agentes de biodeterioro que pueden degradarla, en las condiciones apropiadas para su desarrollo. En este contexto, resulta útil partir de una definición general de **durabilidad**. Según la norma ISO 15686 - *Buildings and constructed assets - Service life planning* (Edificios y bienes construidos - Planificación de la vida útil), la durabilidad corresponde a la capacidad de un elemento o de un activo construido para desempeñar la función requerida durante un período de tiempo especificado, bajo la influencia de los agentes previstos en su entorno de servicio.

Aplicado a la madera, es posible distinguir distintas acepciones prácticas de este concepto. Una de ellas es la **durabilidad natural**, entendida como la capacidad intrínseca de una especie maderera para resistir el ataque de agentes biológicos, principalmente hongos de pudrición e insectos xilófagos, sin haber recibido ningún tipo de tratamiento de protección. Esta resistencia puede variar entre especies, entre plantaciones de una misma especie e incluso entre partes de una misma pieza, ya que el duramen suele presentar una mayor durabilidad que la albura (Touza, 2013). En Chile, esta propiedad se clasifica conforme a la NCh789/1, que establece categorías de durabilidad en función de ensayos normalizados, aspecto que se aborda con mayor detalle en la sección 6.2.

Por otro lado, la **durabilidad adquirida** corresponde a la resistencia que la madera alcanza mediante la aplicación de medidas de protección, tanto a través del diseño (Tomo III) como mediante la aplicación de productos preservantes (Tomo II). En este último caso, la protección se obtiene mediante un proceso de impregnación industrial, cuyo desempeño en Chile se asegura a través del cumplimiento de las exigencias normativas. A su vez, a nivel internacional, los proveedores de productos preservantes entregan garantías de desempeño a los usuarios. Estos tratamientos deben aplicarse de acuerdo con la categoría de durabilidad requerida según el nivel de riesgo definido (Capítulo 6).

Cabe mencionar que, si bien por naturaleza todas las especies pueden clasificarse según un grado de durabilidad natural, no a todas se les puede atribuir nuevas capacidades de durabilidad (durabilidad adquirida) mediante un tratamiento de impregnación industrial. Esto se debe a que cada especie presenta una distinta

¿Por qué es importante la preservación?

La preservación de la madera tiene un objetivo preciso: garantizar que los elementos de una edificación cumplan la vida útil para la que fueron proyectados. Esta condición es el resultado de decisiones técnicas tomadas en la especificación de los elementos, en el diseño del detalle y en la selección del tratamiento. Cuando esas decisiones son correctas, el material responde; cuando fallan, el deterioro avanza progresivamente hasta comprometer la función estructural o las condiciones de habitabilidad del espacio.

En el contexto de la inversión habitacional pública, este argumento adquiere una dimensión adicional. Toda vivienda financiada con subsidio público lleva implícita la expectativa de que la estructura permanecerá en servicio durante su vida útil proyectada. Cuando esa expectativa no se cumple, el costo de la remediación —reemplazo de piezas, intervenciones estructurales, relocalización de familias— recae directamente sobre el presupuesto público. El Decreto N° 15 de MINVU (2024) reconoce explícitamente que las patologías asociadas a la humedad y condensación han generado un alto costo fiscal. Asegurar la durabilidad de los elementos de madera es, por tanto, una condición de eficiencia en el uso de los recursos públicos.

Los dos tipos de amenaza biológica que enfrenta la madera en servicio responden a condiciones de activación distintas y exigen estrategias igualmente distintas. Los hongos de pudrición requieren que el contenido de humedad de la madera se sostenga por encima del 20 % para colonizar y desarrollarse: mientras el material permanece seco, no existe riesgo biológico. En este caso, el diseño de la envolvente —controlar cómo entra el agua, cómo drena y cómo seca el sistema— es la primera línea de defensa; la preservación puede operar como la estrategia principal o como respaldo cuando el diseño no logra mantener las condiciones previstas, o cuando el nivel de riesgo del elemento lo justifica por normativa.

Las termitas subterráneas, en cambio, no dependen exclusivamente de la humedad del elemento: la presencia de colonias en la zona del proyecto constituye un factor de riesgo independiente del contenido de humedad del elemento y del control higrotérmico que ofrezca el diseño. En este caso, la NCh819 exige tratamiento preservante en función del nivel de riesgo y la especie maderera, con independencia de las condiciones del detalle constructivo.

A estos argumentos se suma una dimensión ambiental. La madera cumple su función como material de baja huella de carbono únicamente mientras los elementos construidos permanecen en servicio: el CO_2 capturado durante el crecimiento del árbol queda almacenado en la biomasa construida. La degradación prematura lo libera de vuelta a la atmósfera, invirtiendo el beneficio climático del material. A esto se suma que la producción de madera requiere significativamente menos energía que la del acero o el hormigón (Tabla 9), lo que hace que su huella de carbono sea inferior desde el origen. A escala global, se estima que cerca de 180 millones de m^3 de madera podrían haberse conservado anualmente mediante un adecuado control del deterioro (Morrell, 2019). La degradación prematura revierte el beneficio climático antes de que el material haya compensado la huella de su producción.

En Chile, esta discusión se concreta en una realidad específica. El pino radiata constituye la base de la oferta estructural de madera aserrada: una especie de rápido crecimiento cuyo volumen comercializable está compuesto mayoritariamente por albura. La albura carece de durabilidad natural frente a hongos de pudrición e insectos xilófagos, pero responde bien a la impregnación con preservantes, permitiendo alcanzar los niveles de retención y penetración que la NCh819 exige para cada nivel de riesgo. Su duramen, en cambio, es resistente al tratamiento y no garantiza la misma penetración. Esta condición hace de la especificación del nivel de riesgo y el tipo de tratamiento una decisión que la NCh819 regula de manera diferenciada según el nivel de riesgo y la especie. Los requerimientos normativos, los preservantes disponibles y los métodos de aplicación se desarrollan en detalle en el Tomo II de esta serie.

| TABLA 9 -ENERGÍA REQUERIDA PARA CONSTRUCCIÓN DE MADERA, CONCRETO Y ACERO

Consumo de energía primaria para construir 1 km de línea de distribución eléctrica de 0,4 kV			
Concepto	Madera	Hormigón	Acero
Consumo de energía primaria (MJ)	134893	154389	322264
Energía primaria basada en combustibles fósiles (MJ)	65788	148460	311270

Fuente: Kunniger y Richter, 1995.

capacidad de **impregnabilidad** (3.3), definida como la capacidad de una especie maderera a la penetración de los productos de preservación (líquidos) o productos de protección. Esta capacidad resulta una propiedad crítica para los tratamientos de preservación, debido a que la eficacia de un tratamiento se evalúa en función de la cantidad de producto retenido y de la profundidad de penetración alcanzada, parámetros que se encuentran normados en la NCh819.

Es importante diferenciar la durabilidad natural de una especie de madera con la vida en servicio de un elemento de madera elaborado con esa especie, ya que la vida en servicio depende de múltiples factores, como las estrategias de diseño, el tipo de solución constructiva, las condiciones climáticas, el emplazamiento, el mantenimiento, entre otros, mientras que la durabilidad natural considera la resistencia a los efectos de agentes biológicos como un factor aislado para su medición (Touza, 2013).

Por lo tanto, si una especie maderera no tiene propiedades intrínsecas de durabilidad natural, puede adquirirlas a través de un proceso de impregnación, siempre y cuando esta tenga la capacidad de impregnabilidad suficiente para cumplir con los requisitos que se le exigen a la pieza de madera.

4.2 Agentes de degradación

4.2.1 Condiciones necesarias para el desarrollo de los procesos de deterioro

Cuando se habla de **condiciones**, ya sea en este capítulo, referido a la durabilidad de la madera o en el Capítulo 6, en la sección Condición de uso (6.1.1), ambos conceptos coinciden en un punto: **en cualquier posición o situación en que se utilice un elemento de madera, deben darse ciertas condiciones para que los agentes de deterioro puedan manifestarse**. Es decir, la ubicación del elemento y las características del entorno inmediato determinan si existe, o no, un escenario favorable para el desarrollo de hongos, insectos u otros organismos capaces de degradar la madera (Morris, s.f.).

Esta relación o dependencia entre las condiciones ambientales y la aparición del deterioro se debe a que la madera, al ser un material de origen orgánico, está compuesta por celulosa, hemicelulosa y lignina, polímeros ricos en carbono que constituyen una fuente de energía para diversos organismos capaces de metabolizarlos. Debido a esto, cuando las condiciones ambientales, como la humedad, el oxígeno, la temperatura o la presencia de insectos, se ajustan a los parámetros necesarios para la vida o proliferación de estos agentes, pueden activarse y desencadenar procesos de deterioro (Figura 4.1) Forest Products Laboratory (2021).

4.2.1.1 Humedad

La humedad es la condición más determinante para el desarrollo del biodeterioro. En el árbol vivo, la presencia de agua no causa degradación, ya que los tejidos mantienen su actividad fisiológica y sus defensas naturales. Sin embargo, una vez que la madera es procesada, se vuelve un material más vulnerable y susceptible a la degradación.

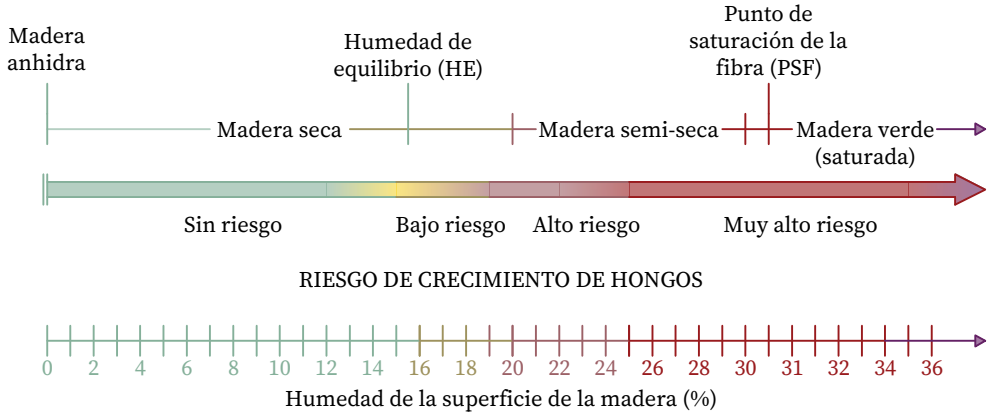


Figura 4.2 – Condiciones de humedad necesarias para el desarrollo de los procesos de deterioro mediados por hongos

Mantener la madera seca es el principio más efectivo para evitar el deterioro y constituye un criterio aplicado de manera universal en la construcción en madera (Lebow et al., 2019)(Touza, 2013). Esto se debe a que los hongos necesitan al menos un 20% de humedad en la madera para poder sobrevivir, y alrededor de un 29% para que ocurra la germinación inicial de las esporas (Figura 4.2) (Clausen, 2010) (Zabel and Morrell 1992). Sin embargo, es fundamental considerar que la madera es intrínsecamente higroscópica; por lo tanto, las piezas de madera se adaptarán con el tiempo a la humedad relativa del ambiente, lo que demuestra que no en todos los casos es práctico o realista mantener la madera seca como única estrategia frente a los agentes de deterioro. Este hecho refuerza la necesidad de recurrir a procesos de impregnación industrial para preservar la madera frente a hongos de pudrición.

Por otro lado, las termitas subterráneas también requieren humedad, sin embargo, son capaces de atacar la madera con contenidos muy inferiores al punto de saturación de la fibra (30%), ya que construyen túneles de refugio que conservan la humedad necesaria y retornan periódicamente al suelo para reponer el agua perdida, lo que indica que, hay casos en que la madera seca puede ser igualmente atacada por hongos de degradación o insectos xilófagos (Lebow et al., 2019).

4.2.1.2 Oxígeno

La presencia de oxígeno constituye un factor clave en los procesos de deterioro biológico de la madera, ya que la mayoría de los organismos xilófagos aeróbicos, como los hongos de pudrición y diversos insectos, requieren concentraciones mínimas de oxígeno para sostener su metabolismo y degradar los componentes estructurales del material (Forest Products Laboratory, 2021).

En condiciones habituales de uso en edificaciones, donde existe ventilación o circulación de aire, las concentraciones de oxígeno son suficientes para permitir la actividad de los agentes de deterioro. Por el contrario, cuando la madera permanece sumergida de manera permanente o se encuentra en entornos confinados, sin renovación de aire, la disponibilidad de oxígeno disminuye hasta niveles que inhiben o ralentizan de forma significativa la actividad de hongos e insectos. Este comportamiento explica la conservación observada en estructuras históricas recuperadas desde ambientes saturados de agua o desde sedimentos con muy baja concentración de oxígeno, como pilotes sumergidos o elementos enterrados. En estos casos, la madera no es susceptible al ataque de hongos o insectos comunes, aunque puede experimentar degradación por bacterias anaeróbicas o por organismos xilófagos marinos, cuya acción responde a condiciones ambientales distintas de las presentes en una edificación (Morris, 2001).

Aunque la presencia de oxígeno es esencial para que se manifieste el deterioro, no constituye un parámetro que pueda controlarse de manera práctica en aplicaciones constructivas. Su función se comprende principalmente en relación con la humedad.

4.2.1.3 Temperatura

La temperatura es otro factor determinante en la actividad biológica asociada al deterioro de la madera. En el caso de los hongos de pudrición, el rango óptimo de desarrollo se sitúa, por lo general, entre 20 °C y 30 °C, intervalo en el cual su metabolismo y capacidad degradativa alcanzan su máxima eficiencia. A temperaturas inferiores a 5 °C, la actividad fúngica disminuye de forma considerable, mientras que por encima de 40 °C la supervivencia de la mayoría de las especies se ve severamente limitada (Forest Products Laboratory, 2021).

Para los insectos xilófagos, incluidos termitas y coleópteros, la tolerancia térmica varía según la especie; no obstante, comparten un comportamiento general: a temperaturas intermedias, como sería temperaturas cercanas a los 25 °C en el caso de termitas subterráneas (Touza, 2013), se favorece su actividad; mientras que temperaturas muy altas o muy bajas restringen su movilidad, alimentación y reproducción (Morris, 2001).

En el ámbito de las edificaciones, la temperatura no suele actuar como un mecanismo de control por sí sola, dado que su influencia depende de la presencia simultánea de humedad disponible y oxígeno. Por ello, la temperatura se considera un parámetro que condiciona la velocidad de los procesos de biodeterioro, pudiendo acelerarlos o ralentizarlos, pero sin reemplazar la estrategia principal de control, basada en mantener la madera en condiciones secas.

En conclusión, la madera es un material con ventajas estructurales y ambientales ampliamente reconocidas; sin embargo, su carácter biológico implica que puede ser susceptible al deterioro si se cumplen las condiciones necesarias para el desarrollo de hongos, insectos u otros organismos. Comprender estos requisitos, como la humedad, oxígeno y rangos adecuados de temperatura, permite anticipar escenarios de riesgo y aplicar estrategias de diseño y protección acordes con el nivel de exposición esperado. De este modo, la gestión informada de estas variables constituye la base para asegurar que los elementos de madera alcancen una vida útil compatible con la expectativa de servicio de la edificación Morris, P.I. (s.f.).

4.2.1.4 Manchas químicas

Las manchas químicas son difíciles de controlar y representan una pérdida sustancial en la calidad de la madera. No deben confundirse con la mancha café de

origen fúngico, e incluyen una variedad de decoloraciones favorecidas por el secado lento y temperaturas de cálidas a altas, condiciones que permiten que los compuestos naturales de la madera reaccionen con el aire mediante oxidación enzimática, formando nuevos compuestos de color oscuro. En este proceso, el pH del medio juega un rol relevante, ya que influye directamente en la actividad de las enzimas que oxidan los compuestos fenólicos de la madera, las que presentan rangos óptimos de funcionamiento según las condiciones ácidas o básicas del entorno. Las manchas más comunes incluyen el grisado, la mancha café en maderas blandas, y el rosado y el pardeamiento en maderas claras (Forest Products Laboratory, 2021).

En Chile, la especie más utilizada en la industria maderera es el pino radiata o bajo su nombre científico *Pinus radiata D.Don*, en la que uno de los problemas más documentados es la mancha café de origen químico durante el proceso de secado. Esta coloración puede reducirse mediante el secado por presión previo al secado térmico, el uso de productos químicos inhibidores de la reacción termoquímica, o la extracción de savia antes del secado, siendo la sobredimensión y posterior cepillado de la zona afectada la solución más empleada a escala industrial.

Otra decoloración frecuente es la mancha de hierro, causada por la interacción del hierro con los taninos de la madera, siendo más frecuente en maderas duras, aunque también afecta a algunas maderas blandas. Puede eliminarse con ácido oxálico, aunque reaparecerá si no se elimina la fuente de hierro. Un caso particular es la mancha de separador, que se forma en maderas claras durante el secado en horno en las zonas de contacto con los separadores entre tablas, como producto de la oxidación de compuestos internos. En el contexto chileno, un secado mal controlado favorece precisamente este tipo de manchas, dado que el proceso en cámaras cerradas requiere un estricto control de temperatura, humedad relativa y velocidad del aire para minimizar defectos en la madera aserrada. La principal medida preventiva es secar la madera rápidamente tras la tala del árbol.

4.2.2 Agentes bióticos (organismos xilófagos)

En condiciones adecuadas, la madera puede prestar servicio durante siglos. Sin embargo, cuando queda expuesta a condiciones favorables la proliferación de organismos de deterioro, es necesario protegerla durante su procesamiento, comercialización y uso. Los principales agentes de degradación son hongos, insectos, xilófagos y barrenadores marinos. Los mohos, las manchas de albura y la pudrición son causados por hongos filamentosos que requieren materia orgánica, humedad, temperaturas moderadas y aire para desarrollarse (Morris, 2001). Las bacterias, aunque generalmente de escasa relevancia, pueden volver la madera excesivamente absorbente o causar pérdidas

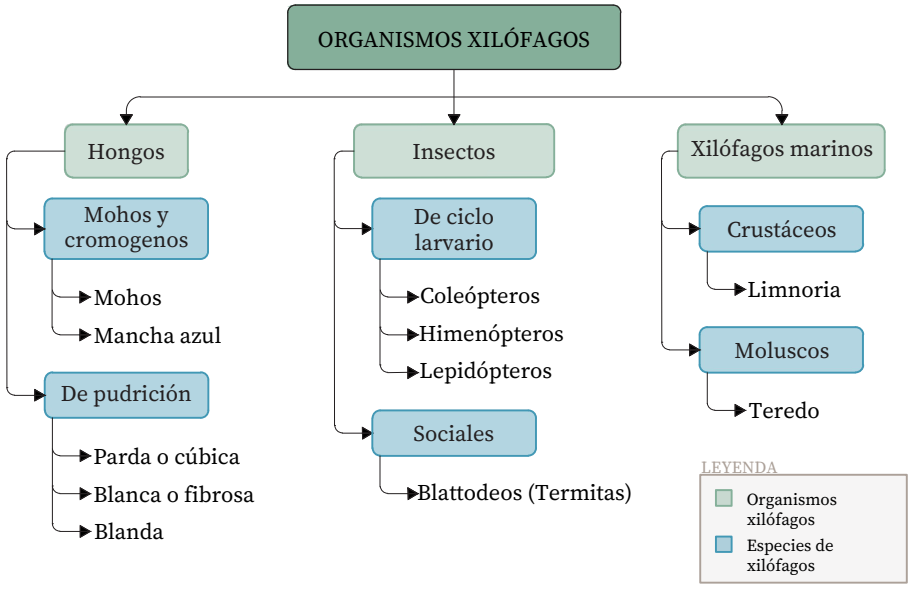


Figura 4.3 – Organismos xilófagos

de resistencia tras exposiciones prolongadas. Los insectos, especialmente las termitas, también representan una amenaza. Por su parte, los barrenadores marinos constituyen la principal causa de daño en estructuras de madera en ambientes de agua salada.

Si bien existe una gran variedad de organismos que dependen de la madera para vivir o alimentarse de ella, en esta sección, considerando el contexto de Chile, se describen de manera general los agentes bióticos capaces de deteriorar la madera utilizada en la construcción. Asimismo, se presentan las condiciones que favorecen la ocurrencia de estos ataques y los efectos que producen sobre la durabilidad del material, con el fin de establecer las bases necesarias para comprender los tratamientos de preservación que se aplican para evitar su degradación.

En el contexto chileno, la normativa NCh789/1 selecciona los agentes bióticos cuyo impacto potencial sobre la madera estructural es más severo, utilizándolos como referencia para definir las categorías de durabilidad. La lógica de esta selección radica en que, si la madera es capaz de resistir al agente más exigente dentro de su grupo, cualquier organismo relacionado (de la misma familia o con un comportamiento similar) generará un daño menor. Bajo este criterio, la normativa considera como agentes representativos de mayor agresividad a los hongos de pudrición, la termita subterránea y los xilófagos marinos (Figura 4.3).

4.2.2.1 Mohos y hongos cromógenos

Los mohos y las manchas fúngicas suelen estar confinados a la albura y presentan una amplia variedad de colores. Aunque ambos corresponden a categorías de hongos que no influyen significativamente en las propiedades mecánicas de la madera, se distinguen entre sí principalmente por la profundidad de la decoloración que generan y por el impacto que tienen sobre el material Forest Products Laboratory (2021). A continuación, se describen ambos grupos de menor a mayor impacto, para luego abordar los aspectos que les son comunes.

Mohos

Las decoloraciones por moho suelen manifestarse como crecimientos superficiales de aspecto algodonoso o polvoriento, con colores que van desde tonos claros hasta negro, siendo comunes los tonos verdes y amarillentos. En maderas blandas, aunque el hongo puede penetrar a cierta profundidad, el crecimiento superficial puede eliminarse con relativa facilidad mediante cepillado o mecanizado. En cambio, en maderas duras de poro grande, la decoloración suele penetrar más profundamente, dificultando su eliminación (Arango et al 2021; Morris 2001).

Desde un punto de vista biológico, los mohos corresponden a organismos saprótrofos que utilizan la madera como fuente de carbono disponible, pero sin degradar activamente los polímeros estructurales de la pared celular. Su metabolismo se enfoca en compuestos de bajo peso molecular presentes en la albura, tales como azúcares solubles, almidones y otros extractivos, lo que explica la ausencia de pérdida significativa de resistencia mecánica. Esta preferencia por la albura se debe a que sus células parenquimáticas se encuentran vivas y metabólicamente activas, almacenando los compuestos de reserva que constituyen el sustrato nutritivo de estos organismos; a diferencia del duramen, donde las células han perdido su contenido celular y han acumulado metabolitos secundarios (como taninos, compuestos fenólicos, resinas y quinonas) que actúan como defensa natural inhibiendo el crecimiento fúngico. Por tanto, su impacto se limita principalmente al aspecto estético y superficial del material (Goodell et al 2003; Sofiaturizkiyah and Priadi, 2023).

Los mohos asociados a la madera incluyen géneros cosmopolitas como *Aspergillus*, *Penicillium*, *Cladosporium*, *Trichoderma* y *Alternaria*, ampliamente reportados en materiales lignocelulósicos y ambientes construidos con alta humedad. En el contexto chileno, aunque la información específica es más limitada, estudios en estructuras de madera patrimonial han reportado la presencia de géneros como *Cladosporium* y *Penicillium*, asociados a procesos de biodeterioro superficial (Ortiz et al 2011; Ortiz 2014). Además de su impacto estético, su presencia puede generar preocupación entre los usuarios debido a posibles efectos sobre la salud, en particular en personas con alergias o asma (Arango et al 2021).

Hongos cromógenos o manchadores

A diferencia de los mohos, los hongos manchadores generan una decoloración que penetra en profundidad en la albura y no suele eliminarse completamente mediante cepillado o mecanizado superficial. En corte transversal, la decoloración suele presentarse como cuñas radiales, frecuentemente orientadas en la dirección de los radios leñosos (Figura 4.4). La decoloración puede cubrir completamente la albura o aparecer como puntos, manchas, vetas o parches de distinta intensidad. Las denominadas manchas azules, que varían desde tonos azulados hasta azul oscuro, gris o marrón, son las más comunes, aunque también pueden observarse tonalidades de amarillo, naranja, púrpura y rojo. El color específico depende del organismo causante, así como de la especie y del contenido de humedad de la madera.

Al igual que los mohos, los hongos manchadores corresponden a organismos saprótrofos que se alimentan principalmente de sustancias de reserva presentes en la albura (tales como azúcares, almidones y otros extractivos) sin causar una degradación significativa de los componentes estructurales de la pared celular, como celulosa y lignina. La decoloración característica



Figura 4.4 – Ataque de hongos cromógenos en trozas de madera

se debe principalmente a la deposición de pigmentos de melanina en las hifas, las cuales se distribuyen en los tejidos de la albura aprovechando su mayor permeabilidad y contenido de humedad, condiciones que favorecen la germinación de esporas y el avance del micelio hacia el interior del tejido. No obstante, en ataques intensos o prolongados, algunos estudios han reportado efectos sobre propiedades específicas como la resistencia al impacto, aunque en general los efectos mecánicos son menores en comparación con los producidos por hongos de pudrición. Por ello, el manchado azul se considera principalmente un problema estético y comercial. Debido a la pérdida de valor visual de la madera afectada, estos hongos pueden generar importantes pérdidas económicas en la industria forestal y maderera, particularmente en productos destinados a exportación (Goodell et al 2003, Sofiaturizkiyah and Priadi 2023, Morris 2001).

Los hongos manchadores de albura corresponden principalmente a hongosascomicetes cromógenos, entre los cuales destacan géneros como *Ophiostoma*, *Ceratocystis*, *Leptographium* y *Graphium*, ampliamente reportados como responsables de la mancha azul en coníferas y maderas comerciales. En Chile, la mancha azul ha sido ampliamente descrita en madera de pino radiata, especie altamente susceptible, donde se ha reportado la presencia de *Ceratocystis pilifera* y especies del género *Ophiostoma*, especialmente en madera destinada a exportación. En este contexto, diversos estudios han

| TABLA 10 – HONGOS CROMÓGENOS Y MOHOS

	Tipo de hongos	Ataque	Aspecto del daño	Ejemplo típico de daño
HONGOS CROMÓGENOS Y MOHOS	Hongos cromógenos o de mancha azul	Afectan la superficie de la madera penetrando ligeramente la madera colonizando vasos y traqueidas, produciendo pigmentos que tiñen la madera.	La madera atacada adquiere un color azul, gris o negro azulado. Se debe tratar la madera previo a su aparición, difícil de remover por completo.	Los ataques suelen encontrarse en fachadas o elementos de madera expuestos a humedad constante. Pueden degradar acabados decorativos.
	Mohos	Hongos microscópicos que afectan superficialmente manifestándose como manchas y formando capas polvorosas por sobre la madera.	La madera atacada adquiere un color verde, negro, blanco o rosado. Se puede remover por completo luego de su aparición.	Los ataques suelen encontrarse en fachadas o elementos de madera expuestos a humedad constante, con ventilación inadecuada y generalmente en ambientes oscuros.

Desarrollada en base a Guía de la Madera. Capítulo 2: Durabilidad. Touza, M

sugerido una estrecha asociación ecológica entre hongos manchadores y escarabajos de corteza introducidos, tales como *Hylurgus ligniperda* e *Hylastes ater*, los cuales podrían actuar como vectores de propágulos fúngicos, transportándolos adheridos a diferentes partes de su exoesqueleto y en algunos grupos de escarabajos de la corteza y de ambrosia, en estructuras especializadas llamadas micangios. Si bien la relación vectorial no ha sido demostrada de forma concluyente, existe evidencia que sugiere que estos insectos podrían actuar como agentes de dispersión de propágulos fúngicos en plantaciones de pino radiata. Esta potencial interacción tiene implicancias directas en las estrategias de manejo fitosanitario, ya que el control de los vectores insectiles podría contribuir a reducir la incidencia del manchado de madera, junto con otras medidas de manejo relacionadas con el tiempo de almacenamiento, el contenido de humedad de las trozas, las condiciones de temperatura durante el acopio y el procesamiento de la madera (Arango et al 2021; Galleguillos 2016; Klepzig and Six 2004; Paine etl al 1997).

4.2.2.2 Hongos degradadores de madera

Los hongos de pudrición constituyen un grupo funcional clave en la descomposición de la madera en ecosistemas forestales. Estos organismos participan activamente en el reciclaje de nutrientes y en la dinámica del carbono, degradando componentes estructurales de la madera como celulosa, hemicelulosa y lignina. De esta manera, contribuyen a la reincorporación de nutrientes al ecosistema y a la formación de microhábitats que favorecen la biodiversidad forestal. Desde una perspectiva ecológica, la pudrición de la madera no debe entenderse únicamente como un proceso de deterioro, sino también como un componente fundamental en la dinámica natural y el funcionamiento de los bosques. Sin embargo, cuando este proceso ocurre en madera destinada a uso estructural, constructivo o industrial, la actividad de estos organismos puede generar pérdidas importantes en resistencia mecánica, calidad y vida útil del material, transformándose en uno de los principales agentes de biodeterioro de la madera (Arango et al 2021).

La albura sin tratamiento preservante debe considerarse susceptible al daño por hongos de pudrición, insectos, xilófagos marinos y otros agentes bióticos; en cambio, el duramen mostrará un mayor rango de durabilidad natural según la especie considerada en la NCh 798/1. Sin embargo, esta durabilidad debe entenderse como relativa y no absoluta, ya que incluso maderas naturalmente resistentes pueden deteriorarse bajo condiciones ambientales favorables para el desarrollo de hongos de pudrición. La mayor durabilidad del duramen se atribuye principalmente a la presencia de extractivos, como polifenoles, taninos, terpenos, quinonas y otros compuestos fenólicos con actividad antifúngica documentada, cuya naturaleza y concentración varían entre especies e incluso dentro de una misma especie, dependiendo de la edad del árbol, las condiciones de crecimiento y la posición dentro del fuste. En consecuencia, bajo condiciones ambientales favorables, los hongos de pudrición pueden colonizar tanto albura como duramen, aunque el duramen generalmente presenta una menor susceptibilidad debido a la acción de estos compuestos protectores (Arango et al 2021; Goodell et al 2003).

Durante el proceso de colonización, los hongos de pudrición extienden sus hifas (filamentos microscópicos) a través del sustrato, penetrando y utilizando sus componentes químicos estructurales como fuente de nutrientes, degradando principalmente celulosa, lignina o ambas según la especie. A medida que avanza la colonización, pueden desarrollarse crecimientos superficiales visibles en forma de manchas, abanicos, cordones o estructuras similares a raíces, generalmente de color blanco o café, aunque en ocasiones pueden presentar tonalidades amarillas o anaranjadas. Estas estructuras corresponden principalmente a micelio (conjunto de hifas) superficial o rizomorfos (agrupaciones densas de hifas especializadas en exploración, transporte y colonización del sustrato).

La lignina, uno de los biopolímeros aromáticos más abundantes de la Tierra y altamente recalcitrante a la degradación, actúa como barrera que limita la penetración de enzimas degradativas en la estructura lignocelulósica de la madera. Sin embargo, algunos hongos basidiomicetos de pudrición blanca poseen la capacidad de degradarla eficientemente mediante complejos sistemas ligninolíticos extracelulares, incluyendo enzimas como lacasas, lignina peroxidasas, manganeso peroxidasas y peroxidasas versátiles, además de diversos mediadores y compuestos de bajo peso molecular. Estos mecanismos desempeñan un papel fundamental en la descomposición de biomasa lignocelulósica y en el ciclo global del carbono.

Dependiendo del tipo de pudrición, los hongos pueden presentar distintas estrategias degradativas. Se reconocen tres tipos principales (Tabla 10). En la **pudrición parda o café**, los hongos degradan preferentemente celulosa y hemicelulosas, dejando una mayor proporción de lignina residual, por lo que la madera adquiere una coloración más oscura, se agrieta transversalmente formando estructuras cúbicas y puede reducirse finalmente a polvo.

| TABLA 11 – HONGOS DE PUDRICIÓN

	Tipo de hongos	Ataque	Caracterización	Ejemplo
HONGOS DE PUDRICIÓN	Pudrición parda o cúbica	Afectan preferentemente a la celulosa, dejando un residuo rico en lignina, de color oscuro.	La madera atacada adquiere un color pardo y tiende a agrietarse en forma de cubos.	Los ataques suelen encontrarse en edificios (a menudo abandonados) poco ventilados y con infiltraciones de agua.
	Pudrición blanca o fibrosa	Afecta preferentemente a la lignina, aunque también pueden dañar, en menor grado, a la celulosa.	La madera adquiere un color blancuzco, debido al complejo celulósico resultante; asimismo la madera atacada tiene un aspecto fibroso.	En edificaciones los ataques pueden estar vinculados a infiltraciones de agua líquida, y también en elementos de madera en el exterior en especies no durables no tratadas expuestas a la humedad.
	Pudrición blanda	Afecta principalmente a la superficie de la pieza de madera expuesta y muy húmeda. Si la humedad persiste, el ataque puede avanzar gradualmente hacia el interior de la pieza.	La pieza de madera presentará un reblandecimiento en su superficie. Generalmente, tras el atague, cuando se seca superficialmente, presenta múltiples cubos de pequeño tamaño.	Los ataques suelen presentarse en elementos de madera en contacto con el suelo o con el agua.

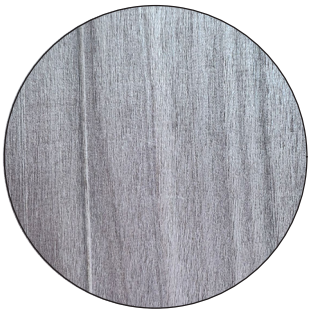
Desarrollada en base a Guía de la Madera. Capítulo 2: Durabilidad. Touza, M

En la **pudrición blanca**, los hongos degradan tanto lignina como polisacáridos estructurales, provocando una pérdida de coloración y un aspecto blanquecino de la madera. En este caso, la madera generalmente conserva su forma externa hasta etapas avanzadas de deterioro, adquiriendo frecuentemente una textura fibrosa o esponjosa. Los hongos de pudrición parda son más frecuentes en coníferas, mientras que los de pudrición blanca predominan en latifoliadas. Sin embargo, ambos tipos pueden colonizar distintos sustratos dependiendo de la especie fúngica y de las condiciones ambientales.

Un tercer tipo corresponde a la **pudrición blanda**, causada principalmente por ascomicetos, asociados a condiciones de elevada humedad. Este tipo de deterioro suele afectar las capas superficiales de la madera y adquiere mayor relevancia en piezas delgadas o expuestas a ciclos alternados de humectación y secado, siendo frecuente en superficies envejecidas o fisuradas (Arango et al 2021; Morris 2001; Touza).

En Chile, la norma NCh789/1 clasifica la madera de pino radiata como especie de baja durabilidad natural frente a agentes bióticos, lo que cobra especial relevancia dado que constituye la especie de mayor uso en la construcción habitacional del país. Históricamente, los ensayos de durabilidad han empleado como organismos de referencia a *Coriolus versicolor* (= *Trametes versicolor*), hongo de pudrición blanca, y a *Gloeophyllum trabeum* y *Rhodonia placenta* (= *Postia placenta*), hongos de pudrición parda, seleccionados por su elevada capacidad degradativa y la rápida pérdida de resistencia mecánica que inducen en la madera.

Los problemas de pudrición de madera en servicio en Chile han sido reportados principalmente en vivien-



Raulí sin ataque



Raulí con ataque de mancha azul



Raulí con ataque de hongos de pudrición parda

Figura 4.5 – Tipos de pudrición en raulí

das expuestas a condiciones persistentes de humedad y ventilación deficiente. Entre los hongos de mayor relevancia destaca *Serpula lacrymans*, agente causal de la denominada "pudrición seca" y considerado uno de los hongos de pudrición parda más destructivos en edificaciones de madera. Este hongo degrada preferentemente celulosa y hemicelulosas, dejando lignina residual de coloración parda y provocando una rápida pérdida de resistencia mecánica y fracturación cúbica de la madera. Aunque requiere humedad para su desarrollo, posee la capacidad de transportar agua mediante rizomorfos, lo que le permite colonizar extensas áreas dentro de una construcción. Su presencia en Chile ha sido reportada principalmente entre las regiones de La Araucanía y Los Lagos, asociada especialmente a viviendas con problemas de humedad, escasa ventilación y madera sin preservación adecuada. Debido a su rápido crecimiento y elevado potencial destructivo, su detección temprana resulta fundamental para evitar daños estructurales mayores.

Ciertos hongos colonizan el duramen causando pudrición del corazón, generalmente asociada al ingreso de los patógenos a través de heridas, daños mecánicos o ramas muertas en árboles vivos, mientras que otros limitan su actividad a la albura de árboles vivos, troncos o productos manufacturados como madera aserrada, vigas estructurales y postes. La mayoría cesa su actividad una vez que los árboles han sido cortados, y relativamente pocos continúan su acción deteriorante tras la transformación de la madera en productos, solo si las condiciones siguen siendo favorables. No obstante, numerosos hongos pueden continuar activos en productos elaborados cuando persisten problemas de humedad, ventilación deficiente o ausencia de tratamientos preservantes adecuados.

Las condiciones favorables para el desarrollo de la pudrición incluyen un elevado contenido de humedad, temperaturas moderadas, disponibilidad de oxígeno y exposición prolongada. La pudrición grave ocurre únicamente cuando el contenido de humedad de la madera supera el punto de saturación de la fibra (generalmente entre 25% y 35%, dependiendo de la especie; promedio cercano al 30%). Solo cuando la madera previamente seca entra en contacto con agua, en forma de lluvia, condensación o suelo húmedo, se alcanza dicho punto. Asimismo, filtraciones, defectos constructivos, puentes térmicos o ventilación insuficiente pueden favorecer la acumulación de humedad crítica en elementos estructurales de madera.

Por sí solo, el vapor de agua en el aire húmedo no humedece suficientemente la madera como para favorecer una pudrición significativa, aunque sí permite el desarrollo de algunos mohos. Sin embargo, humedades relativas persistentemente elevadas y condiciones de escasa ventilación pueden aumentar progresivamente el contenido de humedad de la madera hasta niveles favorables para ciertos hongos. La madera completamente secada al aire generalmente no supera un contenido de humedad del 20%, lo que le proporciona un margen razonable de seguridad contra el daño fúngico, aunque dicho margen depende también del tiempo de exposición y del tipo de hongo involucrado.



Figura 4.6 – Ataque de *Serpula lacrymans*

| TABLA 12 - TABLA COMPARATIVA DE MOHOS, HONGOS CROMÓGENOS Y DE PUDRICIÓN

Tipo	Especies	Daño	Componente atacado	Pérdida de resistencia
Moho	*Penicillium, Aspergillus, Cladosporium*	Superficial	Nutrientes superficiales	Ninguna
Cromógeno/ Manchador	*Ophiostoma, Ceratocystis*	Superficial	Contenido de células del parénquima	Mínima
Pudrición blanda	*Chaetomium, humicola*	Pudrición	Celulosa y hemicelulosa	Moderada
Pudrición blanca	*Trametes versicolor, Phanerochaete chrysosporium*	Pudrición	Celulosa, hemicelulosa y lignina	Alta
Pudrición parda	*Gloeophyllum trabeum, Rhodonia placenta, Serpula lacrymans*	Pudrición	Celulosa y hemicelulosa; modifican lignina	Muy alta

Cabe destacar que la madera también puede estar demasiado saturada de agua para que ocurra pudrición, ya que, si el suministro de aire al interior es insuficiente, los hongos típicos de pudrición no pueden desarrollarse. Esto se debe a que la mayoría de los hongos xilófagos requieren condiciones aeróbicas para mantener su metabolismo activo. Por esta razón, los pilotes de cimentación bajo el nivel freático y los troncos almacenados en estanques no están sujetos a pudrición, aunque, dependiendo del ambiente, podrían verse afectados por otros procesos de biodeterioro.

Cuando hay suficiente humedad, la pudrición puede avanzar rápidamente a temperaturas moderadas. La mayoría de los hongos son mesotérmicos, con crecimiento óptimo cercano a 25 °C, mínimo aproximado de 5 °C y máximo cercano a 40 °C, aunque estos rangos pueden variar considerablemente entre especies fúngicas. La pudrición es lenta por debajo de los 10 °C y por encima de los 30 °C, y se detiene prácticamente a 2 °C o a 38 °C. Algunos hongos tropicales, sin embargo, pueden seguir causando pudrición a temperaturas extremas. En muchos casos, las bajas temperaturas no eliminan al hongo, sino que inhiben temporalmente su actividad metabólica hasta que las condiciones vuelven a ser favorables (Arango et al 2021; Goodell et al 2003; Morris 2021).



Figura 4.7 – Insectos de ciclo larvario (*Polycan chilensis*)

4.2.2.3 Insectos xilófagos

Los insectos xilófagos constituyen uno de los principales agentes de deterioro biológico de la madera, afectando tanto árboles vivos (en pie) como productos elaborados y elementos estructurales en servicio. Su capacidad de degradar los componentes estructurales de la madera, principalmente celulosa y hemicelulosa, puede comprometer la resistencia mecánica, la estabilidad y la vida útil de las construcciones y productos madereros. Estos insectos pertenecen a distintos grupos taxonómicos, cada uno con estrategias particulares de colonización, alimentación y daño. Algunos atacan preferentemente madera húmeda o en descomposición, mientras que otros pueden desarrollarse en madera seca, como aquella utilizada en edificaciones y mobiliario (Arango et al 2021).

En términos generales, los principales grupos de importancia de insectos xilófagos corresponden a coleópteros, himenópteros, lepidópteros y blatodeos, dentro de los cuales se incluyen especies capaces de producir desde perforaciones superficiales hasta graves daños estructurales. La Tabla 13 presenta una clasificación general de los principales órdenes de insectos asociados al deterioro de la madera, junto con sus características más relevantes y el tipo de daño que generan. Este panorama permite comprender que existe una amplia diversidad de insectos xilófagos que representan riesgos relevantes para la conservación, desempeño y durabilidad de los elementos de madera en servicio.

Entre los distintos órdenes de insectos xilófagos, el orden Blattodea posee particular importancia en la evaluación de la durabilidad de la madera, ya que incluye a las termitas, organismos responsables de algunos de los daños más severos en edificaciones y estructuras de madera. Por esta razón, la normativa chilena NCh789/1 considera específicamente a la termita subterránea como especie de referencia para evaluar la resistencia natural de las especies madereras frente al ataque de insectos xilófagos.

Dentro de la diversidad de insectos xilófagos que pueden afectar la madera, las termitas destacan por representar una de las amenazas más importantes para las edificaciones y estructuras en servicio. Su relevancia no solo radica en la magnitud del daño que pueden ocasionar, sino también en la dificultad para detectar tempranamente una infestación, ya que su actividad ocurre principalmente al interior de la madera o desde el subsuelo, permitiendo que el deterioro avance de manera silenciosa antes de manifestarse externamente.

Las **termitas**, especialmente las formas reproductivas aladas, pueden confundirse superficialmente con hormigas debido a su tamaño, apariencia general y hábito de vida en colonias. Sin embargo, se diferencian fácilmente por presentar antenas rectas y no acodadas, además de carecer de la cintura estrecha característica de las hormigas. Desde el punto de vista biológico, las termitas corresponden a insectos sociales altamente organizados, estructurados en castas con funciones específicas dentro de la colonia. Entre ellas destacan las castas reproductoras, responsables de la reproducción y dispersión; los soldados (Figura 4.8), encargados de la defensa; y las obreras (Figura 4.8), que constituyen la casta directamente responsable del daño sobre la madera, debido a que realizan la excavación de galerías, se encargan de la alimentación y el abastecimiento del resto de la colonia (Arango et al 2021; Morris 2021).

Desde el punto de vista de sus hábitos de colonización y métodos de ataque, las termitas se clasifican generalmente en dos grandes grupos: **termitas subterráneas y termitas no subterráneas o de madera seca.** Entre ellas, las termitas subterráneas corresponden



Figura 4.8 – Termita subterránea *Reticulermes flavipes*

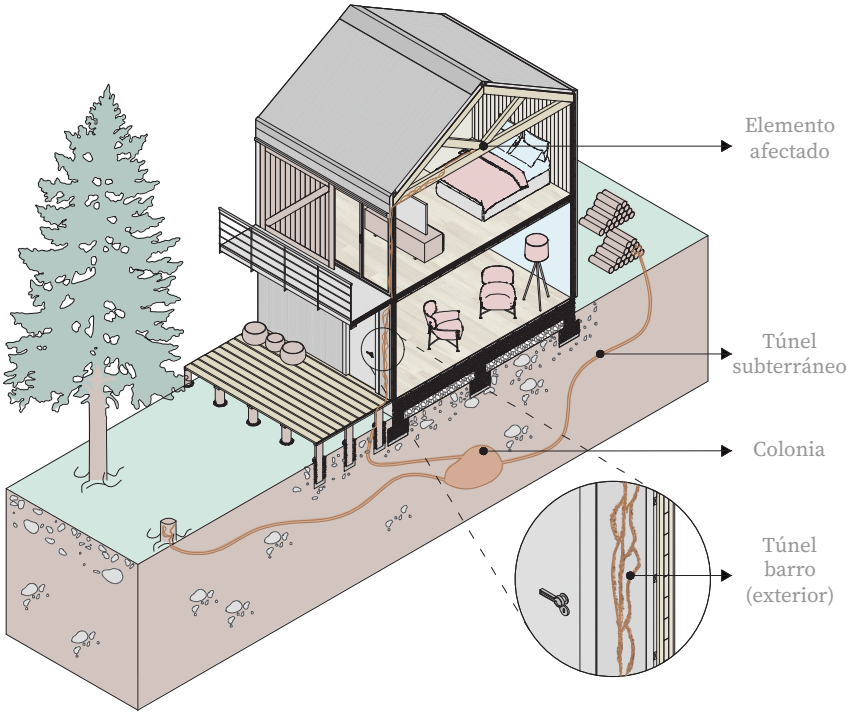


Figura 4.9 – Esquema de colonia subterránea y tubos de barro

al grupo de mayor relevancia en estructuras de madera, siendo responsables de gran parte de los daños asociados a edificaciones.

Las **termitas subterráneas** desarrollan sus colonias bajo el suelo, desde donde construyen túneles y tubos de barro que les permiten desplazarse hacia la madera manteniendo condiciones adecuadas de humedad,condición fundamental para su supervivencia, ya que, son altamente susceptibles a la desecación. Su desarrollo óptimo ocurre en temperaturas cercanas a los 25 °C; sin embargo, la construcción de galerías y microambientes húmedos les permite mantenerse activas incluso bajo condiciones ambientales menos favorables. Gracias a este comportamiento, pueden permanecer activas durante largos períodos sin ser detectadas, especialmente en estructuras con deficiente ventilación, problemas de drenaje o contacto directo entre elementos de madera y el suelo.

La alimentación de las termitas subterráneas se basa principalmente en materiales ricos en celulosa, especialmente madera muerta, aunque también pueden atacar papel, hojarasca y otros productos derivados de origen vegetal.El deterioro que producen suele ser particularmente severo, debido a que consumen la madera internamente siguiendo la dirección de la veta, dejando una delgada capa superficial aparentemente intacta que oculta galerías y cavidades en el interior del material. Como consecuencia, los daños estructurales pueden avanzar considerablemente antes de manifestarse externamente, comprometiendo la capacidad resistente de los elementos afectados.

Desde una perspectiva ecológica, las termitas cumplen un rol relevante como organismos descomponedores, contribuyendo al reciclaje de materia orgánica y al funcionamiento de los ecosistemas. No obstante, en el contexto de las edificaciones representan un problema de alta relevancia económica y estructural, particularmente cuando afectan elementos constructivos elaborados con materiales celulósicos y componentes de madera no impregnada, comprometiendo la resistencia y seguridad de viviendas y edificios (Soto et al., 2018).

En Chile, las termitas subterráneas han adquirido creciente relevancia debido a la expansión de focos de infestación asociados principalmente al género *Reticulitermes*. Se estima que *Reticulitermes sp*. ingresó al país alrededor del año 1986, estableciéndose inicialmente en distintos sectores de las regiones Metropolitana, Valparaíso y O'Higgins. Posteriormente, también se han reportado otros focos de infestación, como el caso de la comuna de Nacimiento, Región del Biobío, eviden-

| TABLA 13 – CLASIFICACIÓN DE TIPOS DE INSECTOS XILÓFAGOS

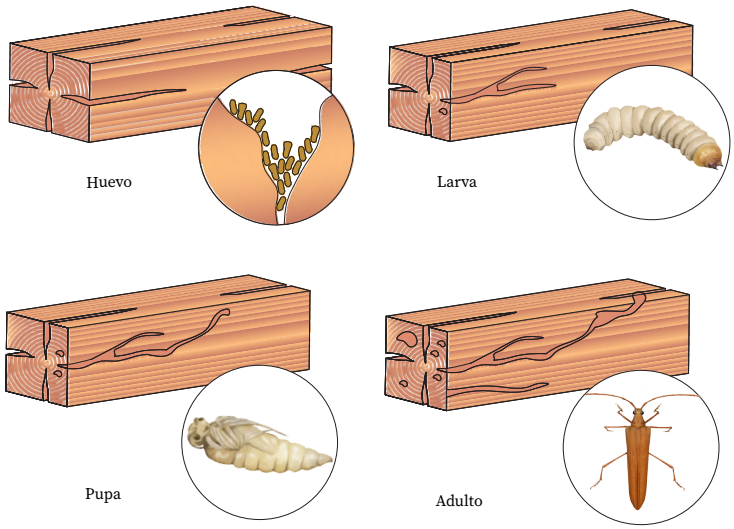
Insectos xilófagos	Caracterización	Ataque
Insectos de ciclo larvario	Insectos voladores cuyo daño a la madera se produce principalmente durante la fase larvaria. La hembra deposita los huevos en la superficie (fendas o vasos); las larvas penetran en la madera, excavan galerías internas y, tras la pupación, emergen como adultos que reinician el ciclo.	**Fase destructiva:** larva. **Organización:** ataque individual (sin estructura social). **Zona afectada:** principalmente albura; puede extenderse al duramen en condiciones de alta humedad o pudrición previa. **Morfología del daño:** galerías internas; suelen existir orificios de salida al emerger el adulto. **Simultaneidad:** múltiples individuos pueden atacar simultáneamente, pero de forma independiente.
Insectos sociales	Insectos organizados en colonias estructuradas en castas (obreras, soldados, reproductores) que utilizan la madera como fuente de alimento, especialmente la madera de primavera en cada anillo de crecimiento. El daño suele pasar desapercibido, ya que no presentan orificios visibles de salida y mantienen una lámina superficial de madera intacta.	**Fase destructiva:** principalmente obreras. **Organización:** ataque colectivo propio de una colonia. **Zona afectada:** interior de la pieza; asociado a condiciones de alta humedad (subterráneas) o madera seca (termitas de madera seca). **Morfología del daño:** galerías internas en dirección de la fibra; aspecto de "hojas de libro" (subterráneas). Formación de canales termíticos en superficie. **Condiciones favorables:** ≈25 °C y HR cercana al 90%. **Signos característicos:** tubos de barro, enjambrazón primaveral, acumulación de excrementos (en termitas de madera seca).

Desarrollada en base a Guía de la Madera. Capítulo 2: Durabilidad.Touza, M

ciando el potencial de dispersión y establecimiento de estas termitas en nuevas áreas urbanas y periurbanas del país. Esta situación ha incrementado la preocupación respecto al impacto económico y estructural que estas especies pueden generar sobre edificaciones y estructuras de madera en servicio.

Debido a la estrecha relación entre humedad, suelo y actividad de termitas subterráneas, las estrategias de prevención se basan principalmente en impedir el acceso oculto desde el terreno hacia los elementos de madera, reducir las fuentes de humedad y favorecer condiciones constructivas adecuadas de ventilación y drenaje. Entre las medidas más utilizadas destacan el empleo de barreras físicas o químicas, el uso de madera preservada, la separación de los elementos estructurales respecto del suelo y la eliminación de residuos lignocelulósicos cercanos a la construcción.

No obstante, aunque las termitas subterráneas constituyen uno de los principales focos de preocupación en edificaciones de madera, resulta pertinente con-



*Representación: *Proholopterus chilensis* sólo ataca árboles vivos, no madera aserrada.

Figura 4.10 – Representación del ciclo de vida de insectos xilófagos de ciclo larvario y su ataque

| TABLA 14 – CLASIFICACIÓN DE INSECTOS XILÓFAGOS SEGÚN ORDEN Y FAMILIA

Orden	Clasificación / Familia	Tipo de ataque	Caracterización
Coleóptera	Scolytidae	Árboles muertos, corteza y troncos caídos	Galerías pequeñas bajo la corteza, patrón variable según especie.
	Lymexilidae	Árboles muertos y troncos caídos	Galerías circulares y alargadas con paredes ennegrecidas en la madera, cultivan y se alimentan de hongos de ambrosía.
	Bostrychidae	Árboles muertos	Galerías angostas en la madera, aserrín compacto tapa los orificios, se exponen al producirse la emergencia de los adultos.
	Lyctidae	Madera elaborada (albura)	Galerías pequeñas, aserrín muy fino tipo polvo, orificios de emergencia circulares de 1mm a 2 mm.
	Anobiidae	Madera seca y elaborada	Galerías estrechas, principalmente en albura, aserrin fino, múltiples orificios de emergencia circulares de diámetro viariable según especie. En el caso de *Ernobius mollis* los orificios son ovales.
	Cerambycidae	Árboles muertos o ramas secas y árboles vivos	En árboles muertos: galerías profundas en la corteza o bajo esta, orificios grandes, aserrín compacto. En árboles en proceso de descomposición: galerías amplias y aserrín fibroso. En árboles vivos: galerías limpias paralelas al eje del árbol o galerías ovales en forma de J.
	Buprestidae	Árboles debilitados o muertos	Galerías planas, aserrín fibroso, orificios de salida ovales, se alimentan del xilema de especies como el pino radiata.
	Curculionidae	Árboles muertos o troncos caídos, y madera en servicio.	En árboles muertos: galería redondas y radiales en la corteza, orificios de emergencia taponeados con aserrín compacto, ocupan una pequeña sección de la albura, lo que genera un aserrín fibroso. En madera en servicio húmeda o podrida: galerías con aserrín fino y redondeado.
Himenóptera	Siricidae	Árboles vivos debilitados	Galerías profundas formadas desde orificios en sentido transversal y luego longitudinal de la fibra, múltiples orificios de emergencia muy circulares de mayor y menor tamaño (macho y hembra) taponeados con aserrín.
Lepidóptera	Cossidae	Árboles vivos	Galerías circulares amplias, de poca longitud y ramificación, las larvas se alimentan en el cambium y se extienden en galerías individuales hacia el xilema cuando bajan las temperaturas, son selladas con un tapón de fibras de madera.
Blattodea	Termita subterránea	Madera estructural y en contacto con suelo	Galerías internas desde los puntos de mayor humedad en la pieza, conectadas a la colonia bajo tierra mediante túneles externos de barro en los que se mantiene la humedad necesaria para la sobrevivencia de estos insectos.
	Termita de madera húmeda (*Termopsidae*)	Árboles muertos y madera elaborada húmeda	Galerías amplias y laminares en la madera sin tratamiento y con altos contenidos de humedad.
	Termita de madera seca (*Kalotermitidae*)	Madera en servicio y árboles muertos.	Galerias amplias y laminares en la madera en maderas sin tratamiento, residuos de pellets fecales expulsado por las galerías de la madera infestada.

Desarrollada en base a Proyecto Vigilancia y Control de Plagas Forestales Ministerio de Agricultura / Servicio Agrícola y Ganadero

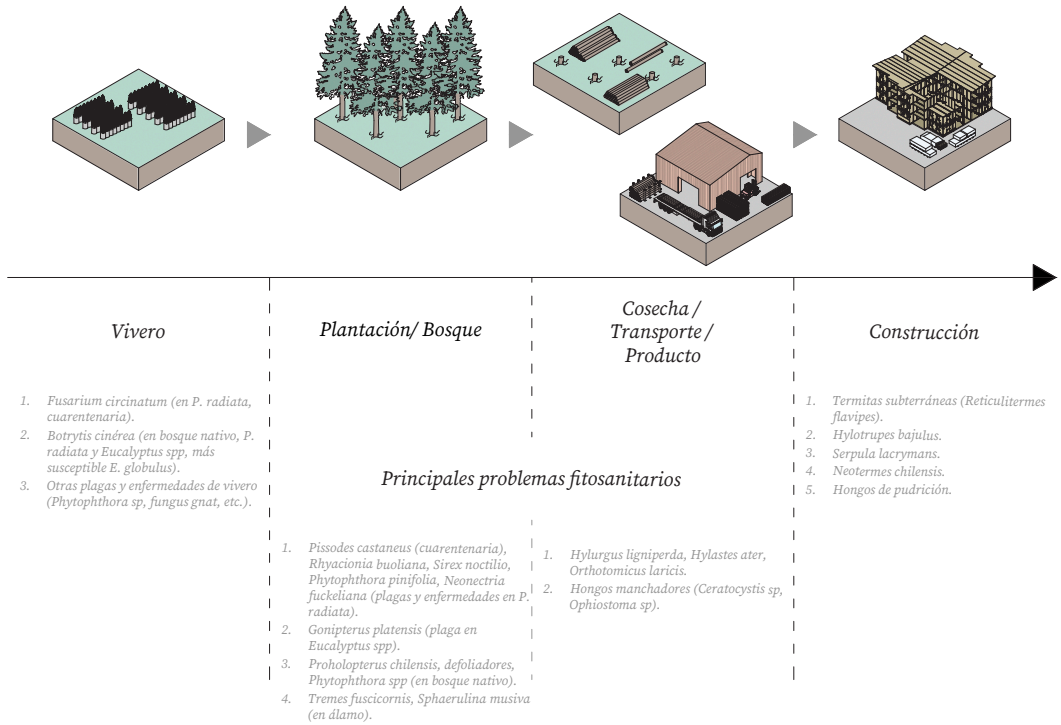


Figura 4.11 – Agentes de deterioro de la cadena de valor de la madera

siderar también otros grupos de insectos xilófagos capaces de afectar productos y estructuras madereras, ya que sus mecanismos de ataque, requerimientos ambientales y estrategias de control pueden diferir considerablemente.

En el contexto chileno, destaca particularmente *Hylotrupes bajulus*, conocido como barrenador europeo de las casas, especie de importancia cuarentenaria regulada por el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). Este coleóptero cerambícido afecta principalmente maderas secas de coníferas, especialmente pino, donde sus larvas excavan galerías internas que pueden comprometer seriamente la resistencia estructural de elementos constructivos y productos madereros. Su relevancia radica tanto en el impacto potencial sobre edificaciones y estructuras de madera, como en el riesgo fitosanitario asociado a la dispersión mediante embalajes, madera aserrada y otros productos derivados. Debido a ello, el SAG ha establecido medidas de control obligatorio y áreas bajo cuarentena destinadas a contener y erradicar esta plaga, considerada una de las más importantes a nivel mundial en maderas secas de pino en zonas templadas (Gonzalez et al 2018).

| TABLA 15 – XILÓFAGOS MARINOS

		Definición de los ataques
Tipos de xilófagos marinos	Limnoria y otros crustáceos	Ataque superficial erosivo.
		La madera se degrada desde el exterior mediante galerías poco profundas y superficiales. Este ataque presenta una apariencia de erosión o desgaste externo y provoca una pérdida progresiva de la sección de la pieza desde el exterior.
	Teredos y otros moluscos	Ataque interno con perforación mediante túneles.
		Estos organismos perforan la madera y se introducen en su interior, generando túneles largos y cilíndricos. Superficialmente, la madera puede parecer casi intacta, mientras en el interior la pieza puede encontrarse esponjosa o "hueca".

4.2.2.4 Xilófagos marinos

Los xilófagos marinos son organismos invertebrados capaces de degradar la madera expuesta a agua salada o salobre (Arango et al 2021). En la normativa chilena, específicamente en la NCh789/1, este tipo de biodeterioro considera principalmente el ataque de moluscos bivalvos de la familia Teredinidae y crustáceos isópodos de la familia Limnoriidae (Tabla 15), cuya acción se presenta bajo las condiciones correspondientes al nivel de riesgo 6, es decir, cuando la madera permanece en contacto permanente con agua salada. Este riesgo se restringe principalmente a aplicaciones marinas, donde la preservación de la madera constituye una medida fundamental para garantizar su durabilidad.

Los moluscos barrenadores generan extensas galerías en el interior de la madera, mientras que los crustáceos erosionan progresivamente su superficie, lo que reduce significativamente su resistencia mecánica y, por consiguiente, su capacidad estructural. La intensidad del ataque depende principalmente de factores ambientales como la temperatura y la salinidad del agua, los cuales regulan el crecimiento, reproducción y distribución de estos organismos (Borges et al 2014). Históricamente, estos agentes de deterioro ocasionaron importantes pérdidas en pilotes, muelles, embarcaciones y otras estructuras costeras construidas con madera sin tratamiento preservante. Sin embargo, el desarrollo de tecnologías de preservación y la incorporación de requisitos técnicos para madera destinada a servicio marino han reducido considerablemente este problema, siendo actualmente la impregnación preservante la principal estrategia para prolongar la vida útil de la madera expuesta al ambiente marino (Arango et al 2021, Treu et al 2019).

4.2.3 Agentes abióticos

Dentro de los agentes que pueden causar deterioro de las piezas de madera en las edificaciones, se encuentra la categoría de agentes abióticos, en su mayoría de carácter meteorológico, los cuales afectan de manera más directa a los elementos de madera expuestos a la intemperie. Entre estos agentes se consideran, por una parte, los efectos de la exposición al sol, asociados principalmente a la radiación ultravioleta y a la radiación infrarroja, y, por otra, los efectos del agua, incluyendo el agua dulce, el agua salada, el hielo y el agua lluvia. Asimismo, se reconocen como factores de deterioro abiótico la interacción con elementos metálicos y la aparición de manchas producto de la presencia y migración de extractivos propios del material.

4.2.3.1 Exposición al sol

En el caso de la **radiación ultravioleta (UV)**, esta afecta principalmente a las piezas de madera expuestas a la intemperie sin protección. La radiación UV provoca la degradación de las moléculas de lignina presentes en la madera, lo que conduce a la aparición de un color grisáceo en su superficie. Este fenómeno ocurre debido a que los productos resultantes de la degradación de la lignina son solubles en agua, por lo que el agua lluvia puede arrastrarlos y modificar de manera progresivamente el color del material. De manera similar, la radiación UV genera una degradación paulatina de las resinas contenidas en los productos de protección superficial o de acabado, lo que explica la necesidad de considerar periódicamente tiempos de mantenimiento y reaplicación de este tipo de productos de protección.

Si bien estos efectos no inciden en la durabilidad ni en la calidad estructural de la pieza de madera, corresponden a alteraciones de carácter principalmente estético (Touza, 2013).

En el caso de la **radiación infrarroja (IR)**, su principal efecto es el calentamiento de la superficie de la madera, lo cual, en combinación con la exposición al agua lluvia, puede generar fenómenos de deformación dimensional al provocar ciclos de hinchamiento y contracción de las piezas. Estos procesos afectan tanto a la madera como a los productos de protección que forman películas superficiales aplicadas sobre ella. Cuando las piezas de madera presentan acabados como pinturas o barnices de colores oscuros, los efectos de la radiación IR pueden intensificarse, ya que, según lo indicado en la UNE EN-927-1, la temperatura superficial de los recubrimientos de color oscuro o negro en expuestos directamente al sol puede alcanzar los 80°C, frente a los 40°C que, en condiciones similares, puede alcanzar un producto de protección de color blanco. Adicionalmente, este tipo de radiación puede provocar exudación de resinas de algunas especies de madera al alcanzarse determinadas temperaturas (Touza, 2013).

4.2.3.2 Exposición al agua

Cuando una pieza de madera se ve expuesta simultáneamente al sol y al agua lluvia, la acción combinada de estos factores, frecuentemente acompañada por el viento o por la presencia del agua en otros estados, como nieve o hielo, provoca una erosión progresiva de la superficie de la madera. Este proceso afecta principalmente a la madera de primavera, resaltando el vetado entre los anillos de crecimiento. Este fenómeno de de-

| TABLA 16 – TIPOS DE HUMEDAD

Tipo de humedad	Descripción
Condensación intersticial	Riesgo: Alto. Exposición: Puntual, pero puede expandirse. Puede originarse por capilaridad, acumulación subterránea o condensación intersticial.
Infiltración	Riesgo: Medio-Alto. Exposición: Puntual, pero puede expandirse. Ocurren por errores de diseño, fallas en sellos o barreras, o filtraciones en la cubierta.
Filtraciones	Riesgo: Medio-Alto. Exposición: Puntual, pero puede expandirse. Ocurren debido a fallas en redes de agua y/o alcantarillado, o debido a sellos defectuosos.
Condensación superficial	Riesgo: Menor. Exposición: Puntual. Suele ocurrir en zonas húmedas, en ventanas o debido a equipos de aire acondicionado.
Riego o agua directa	Riesgo: Menor. Exposición: Puntual. Cuando las piezas afectadas están expuestas permanentemente a humedad, como en jardines.

nomina **meteorización** y corresponde a un proceso de carácter superficial, sin incidencia en las propiedades estructurales del material.(Touza, 2013).

La madera al ser un material higroscópico se ve permanentemente influenciada por la presencia de agua en todos sus estados (líquido, gaseoso o sólido). Por ello, resulta fundamental considerar todas las aristas de este factor y la forma en que el contacto con el agua puede manifestarse en los elementos de madera. En este sentido, para definir el nivel de riesgo que puede enfrentar un elemento de madera en una edificación, es necesario evaluar cómo el agua o la humedad pueden afectarlo en función de su ubicación dentro de la edificación.

Evaluar e identificar el nivel de riesgo permite anticipar los requerimientos que tendrá un elemento de madera, como la necesidad de un tratamiento preservante y/o la aplicación de productos de protección, también es necesario reconocer que la humedad puede manifestarse de múltiples formas. En este sentido, la realización de inspecciones regulares, ajustadas al tipo de humedad presente, constituye una de las estrategias más eficaces para anticiparse a los problemas que esta puede generar. Por ello, resulta relevante identificar los distintos tipos de humedad y el nivel de riesgo que representan para la edificación, tal como se indica en la Tabla 15.

Si bien al identificar el nivel de riesgo de un elemento de madera es posible anticipar, en la mayoría de los casos, los tipos de humedad a los que este puede estar expuesto existen situaciones como infiltraciones o filtraciones que se producen como consecuencia de accidentes, fallas o errores en el proceso constructivo, o bien durante la vida en servicio del elemento o de la edificación. Estos eventos no siempre pueden prevenirse ni predecirse; por ello, la correcta identificación de este tipo de problemas permite actuar de manera oportuna, reparar la falla, eliminar la fuente de humedad y ejecutar los reparos necesarios en la edificación, cuando corresponda.

4.2.3.3 Factores de deterioro abióticos

La madera presenta compuestos químicos que pueden favorecer fenómenos de corrosión al entrar en contacto con elementos metálicos, como el ácido acético y el pH característico de cada especie. Considerando que la corrosión corresponde a un proceso de oxidación que requiere la presencia simultánea de oxígeno y humedad sobre la superficie del metal, un contenido de humedad superior al 20% en una pieza de madera incrementa de manera significativa el riesgo de corrosión de los elementos metálicos asociados. Para evitar este tipo de reacciones, resulta útil considerar el uso de aplicaciones metálicas de acero inoxidable, además de comprobar la compatibilidad entre el producto preservante utilizado en los elementos de madera y el elemento metálico que se desea utilizar (Touza, 2013).

La madera contiene diversas sustancias químicas conocidas como extractos, las cuales se concentran en el duramen contribuyendo a su coloración más oscura con respecto a la albura. Uno de estos extractos corresponde a los taninos, compuestos solubles en agua. Por esta razón, en especies madereras ricas en taninos expuestas a la humedad se pueden observar la aparición de manchas oscuras irregulares sobre la superficie de las piezas de madera. Este fenómeno constituye un problema de índole estética, la lixiviación de los taninos depende del grado de exposición a agentes como el agua lluvia, la cual, si bien puede atenuar o difuminar estas manchas propias de la madera, también puede provocar el manchado de otros materiales adyacentes o en contacto con ella. Para evitar este tipo de inconvenientes, en maderas ricas en taninos se debe considerar una estrategia de diseño adecuada a esta característica y considerar el uso de sustancias bloqueadoras que reaccionan con las soluciones tánicas, formando compuestos incoloros y estables (Touza, 2013).



05
Clasificación de los productos de madera para la construcción

La madera es un material que destaca por su versatilidad y capacidad de adaptación. Desde la antigüedad, ha sido utilizada por el ser humano en diversas formas: en estado natural, como elemento estructural, o transformada mediante procesos tecnológicos que han dado origen a productos de alto desempeño. Esta capacidad de responder a distintos contextos, escalas y tipos de uso ha permitido que la madera se consolide como un recurso de alto valor estratégico, especialmente en el ámbito de la construcción.

Sus propiedades físicas y mecánicas (3.2) evidencian su desempeño en diversos escenarios de aplicación, así como una maleabilidad que facilita tanto su uso artesanal como su industrialización avanzada.

En la actualidad, la industria de la construcción en madera ha experimentado una evolución significativa, integrando conocimiento científico, innovación y desarrollo tecnológico, y criterios de sostenibilidad ambiental. Por ello, comprender los distintos elementos que conforman una construcción en madera, considerando las características, clasificaciones y aplicaciones de los productos de madera y, en el marco de este documento, los criterios necesarios para su correcta preservación y protección.

Este capítulo aborda, en primer lugar, la caracterización de las especies de madera disponibles en Chile (5.1). Posteriormente, se presenta la clasificación de los distintos productos de madera (5.2), considerando tanto la madera maciza o aserrada, como los productos de ingeniería de madera, y productos reconstituídos de madera, con el objetivo de que el usuario pueda identificar el tipo de producto que será sometido a evaluación, en función de los requerimientos de preservación y durabilidad que correspondan.

5.1 Especies disponibles y sus propiedades

La diversidad de especies presentes en el territorio nacional constituye la base material de los productos de madera utilizados en la construcción. Cada especie posee atributos particulares derivados de su estructura anatómica, composición y origen, los cuales se manifiestan en variaciones de densidad, resistencia mecánica, estabilidad dimensional y durabilidad natural. Estas diferencias influyen directamente en su idoneidad para distintos usos.

En Chile, el mercado de la madera está compuesto principalmente por especies exóticas provenientes de plantaciones forestales establecidas en el territorio nacional, a las que se suman determinadas especies nativas y maderas importadas desde otros países. La caracterización de estas especies permite comprender sus propiedades inherentes, su comportamiento frente a los procesos de industrialización y establecer comparaciones entre ellas, de modo que el usuario pueda tomar decisiones informadas respecto de la especie más adecuada según los objetivos del proyecto.

Este apartado presenta una selección de especies basada en su presencia en normativas vigentes y en su disponibilidad en el mercado. A partir de estos criterios, se definió un conjunto representativo de las especies más utilizadas en el contexto de la construcción y según disponibilidad en el mercado, las cuales se desarrollan en mayor detalle en las fichas técnicas que se presentan a continuación. En el Anexo B - Especies arbóreas disponibles en Chile se expone la totalidad de las especies analizadas, así como aquellas finalmente seleccionadas para este documento.

Pino radiata - Pino insigne

Pinus radiata

El pino radiata es una especie maderera exótica conífera de hoja perenne, ampliamente utilizado en la actividad forestal de Chile. Este árbol es de copa cónica a irregular y puede alcanzar una altura entre 30 y 45 metros, mientras que su tronco es de forma recta y alcanza un diámetro entre 1 y 1,5 metros. Crece en plantaciones forestales entre las regiones de Coquimbo y Los Lagos. Es una especie de rápido crecimiento, altamente productiva y la más abundante en la silvicultura nacional.



Ilustración corte transversal células pino radiata

| CARACTERÍSTICAS

Básicas

Nombre en el exterior:	Pino de Monterrey, Pino de California
Familia:	Pinaceae
Ubicación:	Zona centro, zona sur

Físicas

Densidad normal:	478 [kg/m^3]$_{(1)}$

Higrotérmicas (NCh853)

Densidad aparente:	410 [kg/m^3]
Conductividad térmica (λ):	0,104 [W/(m^2·K)]

Durabilidad: Agentes de biodeterioro (NCh789/1)

	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Hongos de pudrición	M	S	N	N	N	-
Insectos xilófagos	N	N	N	N	N	-
Xilófagos marinos	-	-	-	-	-	S/I$_{(0)}$ N$_{(3)}$

M: Muy durable *P: Poco durable*
D: Durable *N: No durable*
S: Semidurable *S/I: Sin información*

El pino radiata es la especie que constituye la principal fuente de madera para usos estructurales, industriales y de exportación del país. Tiene desde aplicaciones estructurales hasta carpinterías. A partir de piezas, chapas y partículas de pino radiata nacen otros productos de madera.

| CATEGORÍAS DE USO COMO ELEMENTO

Uso estructural	■
Carpinterías	■
Revestimiento exterior	■
Revestimiento interior	■
Pisos interiores	■
Pisos exteriores	■
Mueblería	■

| PROTECCIÓN AMBIENTAL

Origen

Endémica	
Exótico	■
Nativo	

Categoría Vigente

- Sin protección

Protección

- Sin protección

Eucalipto Globulus

Eucalyptus globulus

El eucalipto globulus es una especie maderera exótica latifoliada, este árbol perenne, alcanza una altura entre los 30 metros y 55 metros y un diámetro de tronco entre 1 metro y 2 metros,, siendo este generalmente recto y cilíndrico. En Chile se desarrolla principalmente en plantaciones forestales entre las regiones de Coquimbo y Los Lagos. Es una especie de rápido crecimiento muy abundante en la silvicultura nacional.



Ilustración corte transversal células eucalipto globulus

| CARACTERÍSTICAS

Básicas	
Nombre en el exterior:	*Blue gum, Southern Blue Gum*
Familia:	Myrtaceae
Ubicación:	Zona Centro
Físicas	
Densidad normal:	720 $[kg/m^3]_{(2)}$
Higrotérmicas (NCh853)	
Densidad aparente:	Sin información
Conductividad térmica (λ):	Sin información

Durabilidad: Agentes de biodeterioro (NCh789/1)

	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Hongos de pudrición	M	S	N	N	N	-
Insectos xilófagos	N	N	N	N	N	-
Xilófagos marinos	-	-	-	-	-	S/I

M: Muy durable *P: Poco durable*
D: Durable *N: No durable*
S: Semidurable *S/I: Sin información*

Dentro de las aplicaciones de la madera de eucalipto globulus, se emplea en obras bajo el mar o en contacto con el agua dulce como puentes, en obras livianas y en usos rurales. En vivienda, se destina a revestimientos interiores, pisos, tableros, molduras y fabricación de muebles.

| CATEGORÍAS DE USO COMO ELEMENTO

Uso estructural	■
Carpinterías	■
Revestimiento exterior	■
Revestimiento interior	■
Pisos interiores	■
Pisos exteriores	■
Mueblería	■

| PROTECCIÓN AMBIENTAL

Origen

Endémica	
Exótico	■
Nativo	

Categoría Vigente

- Sin protección

Protección

- Sin protección

Eucalipto nitens

Eucalyptus nitens

El eucalipto nitens es una especie maderera exótica latifoliada, este árbol siempreverde es de copa cónica a alargada, puede alcanzar entre 40 metros y 70 metros de altura y su tronco 1 metro a 2 metros de diámetro, generalmente de forma cilíndrica y recto. En Chile se desarrolla en plantaciones forestales entre las regiones del Maule y de Los Lagos, especialmente en zonas de clima templado y suelos profundos. Es una especie de muy rápido crecimiento y altamente productiva.



Ilustración corte transversal células eucalipto nitens

| CARACTERÍSTICAS

Básicas

Nombre en el exterior:	*Shining gum*
Familia:	Myrtaceae
Ubicación:	Zona centro, zona sur

Físicas

Densidad normal:	600 $[kg/m^3]_{(1)}$

Higrotérmicas (NCh853)

Densidad aparente:	Sin información
Conductividad térmica (λ):	Sin información

Durabilidad: Agentes de biodeterioro (NCh789/1)

	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Hongos de pudrición	M	S	N	N	N	-
Insectos xilófagos	N	N	N	N	N	-
Xilófagos marinos	-	-	-	-	-	S/I

M: Muy durable *P: Poco durable*
D: Durable *N: No durable*
S: Semidurable *S/I: Sin información*

Dentro de las aplicaciones de la madera de eucalipto nitens, se utiliza principalmente en la industria de celulosa y papel, en menor escala en tableros reconstituidos y postes. En vivienda sus aplicaciones se reducen a componentes de muebles, revestimientos interiores y molduras.

| CATEGORÍAS DE USO COMO ELEMENTO

Uso estructural	
Carpinterías	■
Revestimiento exterior	
Revestimiento interior	■
Pisos interiores	
Pisos exteriores	
Mueblería	■

| PROTECCIÓN AMBIENTAL

Origen

Categoría Vigente

- Sin protección

Protección

- Sin protección

Pino oregón - Abeto de Douglas

Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco

El pino oregón es una especie maderera exótica conífera, de hoja perenne. Esta especie puede alcanzar entre 40 metros y 70 metros de altura, con un tronco de hasta 2 metros de diámetro, de forma cilíndrica y recta. En Chile su presencia es limitada, desarrollándose en plantaciones experimentales y forestales en la zona centro-sur y sur del país. Es una especie de crecimiento moderado con cualidades de adaptación a climas templados y húmedos, no predominante en la silvicultura nacional.



Ilustración corte transversal células pino oregón

| CARACTERÍSTICAS

Básicas

Nombre en el exterior:	*Douglas-fir, Douglas spruce*
Familia:	Pinaceae
Ubicación:	Zona sur, zona austral

Físicas

Densidad normal:	465 $[kg/m^3]_{(1)}$

Higrotérmicas (NCh853)

Densidad aparente:	Sin información
Conductividad térmica (λ):	Sin información

Durabilidad: Agentes de biodeterioro (NCh789/1)

	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Hongos de pudrición	M	S	N	N	N	-
Insectos xilófagos	N	N	N	N	N	-
Xilófagos marinos	-	-	-	-	-	S/I

M: Muy durable *P: Poco durable*
D: Durable *N: No durable*
S: Semidurable *S/I: Sin información*

Dentro de las aplicaciones que tiene la madera de pino oregón, se utiliza principalmente como madera estructural. En vivienda se utiliza en revestimientos, pisos, escaleras, molduras, puertas, ventanas y muebles. En menor escala se fabrican tableros de contrachado y chapas.

| CATEGORÍAS DE USO COMO ELEMENTO

Uso estructural	■
Carpinterías	■
Revestimiento exterior	■
Revestimiento interior	■
Pisos interiores	■
Pisos exteriores	
Mueblería	■

| PROTECCIÓN AMBIENTAL

Origen

Endémica	
Exótico	■
Nativo	

Categoría Vigente

- Sin protección

Protección

- Sin protección

Álamo

Populus spp.

El álamo es una especie maderera exótica latifoliada, de follaje caduco. Esta especie puede alcanzar una altura entre los 25 metros y 40 metros, y su tronco 1 metro de diámetro, siendo generalmente de forma cilíndrica y recto. En Chile se desarrolla principalmente en plantaciones forestales y utilizado como cortinas cortaviento, concentrándose en la zona central y centro-sur del país. Es una especie de rápido crecimiento, que abunda en zonas con buena disponibilidad de agua.



Ilustración corte transversal células álamo

| CARACTERÍSTICAS

Básicas

Nombre en el exterior:	*Poplar*
Familia:	Salicaceae
Ubicación:	Zona centro, zona centro-sur

Físicas

Densidad normal:	399 [kg/m^3]$_{(1)}$

Higrotérmicas (NCh853)

Densidad aparente:	380 [kg/m^3]
Conductividad térmica (λ):	0,091 [W/(m^2·K)]

Durabilidad: Agentes de biodeterioro (NCh789/1)

	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Hongos de pudrición	M	S	N	N	N	-
Insectos xilófagos	N	N	N	N	N	-
Xilófagos marinos	-	-	-	-	-	N

M: Muy durable *P: Poco durable*
D: Durable *N: No durable*
S: Semidurable *S/I: Sin información*

Dentro de las aplicaciones que tiene la madera de álamo, principalmente se fabrican tableros, chapas y contrachapados, y se utiliza como embalaje y cajonería. En vivienda se utiliza en revestimientos interiores, molduras, puertas livianas, tabiques y mueblería de baja solicitación.

| CATEGORÍAS DE USO COMO ELEMENTO

Uso estructural	
Carpinterías	■
Revestimiento exterior	
Revestimiento interior	■
Pisos interiores	
Pisos exteriores	
Mueblería	■

| PROTECCIÓN AMBIENTAL

Origen

Endémica	
Exótico	■
Nativo	

Categoría Vigente

- Sin protección

Protección

- Sin protección

Eucalipto regans

Eucalyptus regnans F. Muell.

El eucalipto regans es una especie maderera exótica latifoliada, de hoja perenne. Esta especie puede alcanzar una altura entre los 60 metros y 90 metros, con un tronco entre 2 metros a 3 metros de diámetro, de forma cilíndrica y recta. En Chile su presencia es limitada, se desarrolla en plantaciones experimentales y ensayos forestales en la zona centro-sur y sur del país. Es una especie de crecimiento rápido, con adaptación a climas templados y húmedos, no es predominante dentro de la silvicultura nacional.



Ilustración corte transversal células eucalipto regnans

| CARACTERÍSTICAS

Básicas	
Nombre en el exterior:	*Mountain ash*
Familia:	Myrtaceae
Ubicación:	Zona centro, zona sur
Físicas	
Densidad normal:	463 $[kg/m^3]_{(2)}$
Higrotérmicas (NCh853)	
Densidad aparente:	Sin información
Conductividad térmica (λ):	Sin información

Durabilidad: Agentes de biodeterioro (NCh789/1)

	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Hongos de pudrición	M	S/I	S/I	S/I	S/I	-
Insectos xilófagos	N	N	N	N	N	-
Xilófagos marinos	-	-	-	-	-	S/I

M: Muy durable *P: Poco durable*
D: Durable *N: No durable*
S: Semidurable *S/I: Sin información*

Dentro de las aplicaciones que tiene la madera de eucalipto regans, se utiliza principalmente en la producción de madera sólida, para uso estructural y para la fabricación de tableros y chapas. En vivienda, se utiliza en revestimientos, pisos y muebles.

| CATEGORÍAS DE USO COMO ELEMENTO

Uso estructural	■
Carpinterías	
Revestimiento exterior	■
Revestimiento interior	■
Pisos interiores	■
Pisos exteriores	■
Mueblería	■

| PROTECCIÓN AMBIENTAL

Origen

Endémica	
Exótico	■
Nativo	

Categoría Vigente

- Sin protección

Protección

- Sin protección

Pino ponderosa

Pinus ponderosa Douglas ex C. Lawson

El pino ponderosa es una especie maderera exótica conífera, de hoja perenne, puede alcanzar una altura entre los 30 metros y 50 metros, y su tronco hasta 1,5 metros y 2 metros de diámetro, siendo este de forma cilíndrica y recto. Esta especie crece en plantaciones forestales en la zona centro-sur y sur del país. Es una especie de crecimiento moderado, que destaca por su adaptación a climas templados y relativamente secos, esta especie no es predominante en la silvicultura nacional.

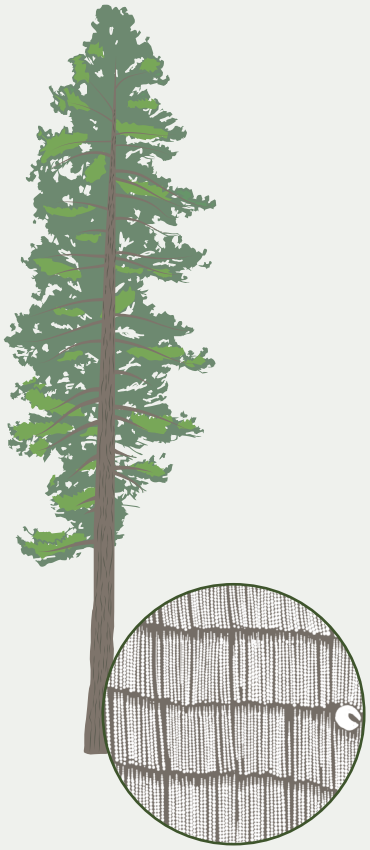


Ilustración corte transversal células pino ponderosa

| CARACTERÍSTICAS

Básicas

Nombre en el exterior:	*Ponderosa pine*
Familia:	Pinaceae
Ubicación:	Zona sur, zona austral

Físicas

Densidad normal:	Sin información

Higrotérmicas (NCh853)

Densidad aparente:	Sin información
Conductividad térmica (λ):	Sin información

Durabilidad: Agentes de biodeterioro (NCh789/1)

	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Hongos de pudrición	M	S	N	N	N	-
Insectos xilófagos	N	N	N	N	N	-
Xilófagos marinos	-	-	-	-	-	S/I

M: Muy durable *P: Poco durable*
D: Durable *N: No durable*
S: Semidurable *S/I: Sin información*

Dentro de las aplicaciones que tiene la madera de pino ponderosa, se utiliza principalmente en construcción liviana y carpintería. En vivienda se utiliza en revestimientos, puertas, ventanas, molduras, pisos y muebles. En menor escala se fabrican chapas y contrachapados de roble.

| CATEGORÍAS DE USO COMO ELEMENTO

Uso estructural	
Carpinterías	■
Revestimiento exterior	
Revestimiento interior	■
Pisos interiores	
Pisos exteriores	
Mueblería	■

| PROTECCIÓN AMBIENTAL

Origen

Endémica	
Exótico	■
Nativo	

Categoría Vigente

- Sin protección

Protección

- Sin protección

Coigüe

Nothofagus dombeyi

El coigüe es una especie maderera nativa latifoliada, este árbol siempreverde es frondoso, puede alcanzar los 40 metros de altura y su tronco 3 metros de diámetro, siendo este de forma cilíndrica y recto. Esta especie crece entre las provincias de Colchagua y Capitán Prat, se encuentra presente en varias áreas protegidas como parques y reservas nacionales. Es una especie de rápido crecimiento, muy abundante, predominante y de los árboles más altos en bosques del sur de Chile.



Ilustración corte transversal células coigüe

| CARACTERÍSTICAS

Básicas

Nombre en el exterior:	*Haya de Dombey, Dombey's Southern Beech*
Familia:	Fagaceae
Ubicación:	Zona sur, zona austral

Físicas

Densidad normal:	691 [kg/m^3]$_{(1)}$

Higrotérmicas (NCh853)

Densidad aparente:	670 [kg/m^3]
Conductividad térmica (λ):	0,145 [W/(m^2·K)]

Durabilidad: Agentes de biodeterioro (NCh789/1)

	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Hongos de pudrición	M	S	P	P	P	-
Insectos xilófagos	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	-
Xilófagos marinos	-	-	-	-	-	N

M: Muy durable *P: Poco durable*
D: Durable *N: No durable*
S: Semidurable *S/I: Sin información*

Dentro de las aplicaciones que tiene la madera de coigüe, se usa en obras como puentes, silos, estanques, durmientes, embarcaciones y en productos de chapas. En vivienda se utiliza en pisos y parquet, revestimientos, moldajes para hormigón y muebles.

| CATEGORÍAS DE USO COMO ELEMENTO

Uso estructural	■
Carpinterías	
Revestimiento exterior	■
Revestimiento interior	■
Pisos interiores	■
Pisos exteriores	
Mueblería	■

| PROTECCIÓN AMBIENTAL

Origen

Endémica	
Exótico	
Nativo	■

Categoría Vigente

- Preocupación menor

Protección

- Ley Número 20.283

Roble

Nothofagus obliqua

El roble es una especie maderera nativa latifoliada, este árbol de follaje caduco es frondoso y presenta ramas gruesas, puede alcanzar hasta los 40 metros de altura y su tronco 2 metros de diámetro. Esta especie crece desde la provincia de Cardenal Caro por la costa y desde Curicó por la precordillera andina, hasta la provincia de Llanquihue, se encuentra presente en parques y reservas nacionales. Es una especie de crecimiento inicial rápido a medio y requiere de alta luminosidad.



Ilustración corte transversal células roble

| CARACTERÍSTICAS

Básicas

Nombre en el exterior:	Roble patagónico, *Roble Beech*
Familia:	Fagaceae
Ubicación:	Zona centro, zona sur

Físicas

Densidad normal:	625 [kg/m^3]$_{(1)}$

Higrotérmicas (NCh853)

Densidad aparente:	800 [kg/m^3]
Conductividad térmica (λ):	0,157 [W/(m^2·K)]

Durabilidad: Agentes de biodeterioro (NCh789/1)

	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Hongos de pudrición	M	M	D	P	P	-
Insectos xilófagos	N	N	N	N	N	-
Xilófagos marinos	-	-	-	-	-	N

M: Muy durable *P: Poco durable*
D: Durable *N: No durable*
S: Semidurable *S/I: Sin información*

Dentro de las aplicaciones que tiene la madera de roble, se usa como madera estructural, en elementos como vigas, columnas y pies derechos. En vivienda se utiliza en pisos, parquets, tejuelas y revestimientos. También se utiliza para fabricar embarcaciones y postes.

| CATEGORÍAS DE USO COMO ELEMENTO

Uso estructural	■
Carpinterías	
Revestimiento exterior	■
Revestimiento interior	■
Pisos interiores	■
Pisos exteriores	■
Mueblería	■

| PROTECCIÓN AMBIENTAL

Origen

Endémica	
Exótico	
Nativo	■

Categoría Vigente

- Preocupación menor

Protección

- Ley Número 20.283

Raulí

Nothofagus alpina

El raulí es una especie maderera nativa latifoliada, este árbol de follaje caduco es frondoso, puede alcanzar los 40 metros y su tronco 2 metros de diámetro, siendo este de forma cilíndrica y recto. Esta especie crece entre las provincias de Curicó y Llanquihue, desde los 100 metros hasta más de 1000 metros de altitud, en ambas cordilleras, se encuentra protegida en parques nacionales. Es una especie de crecimiento rápido adaptada a temperaturas bajas y vientos.

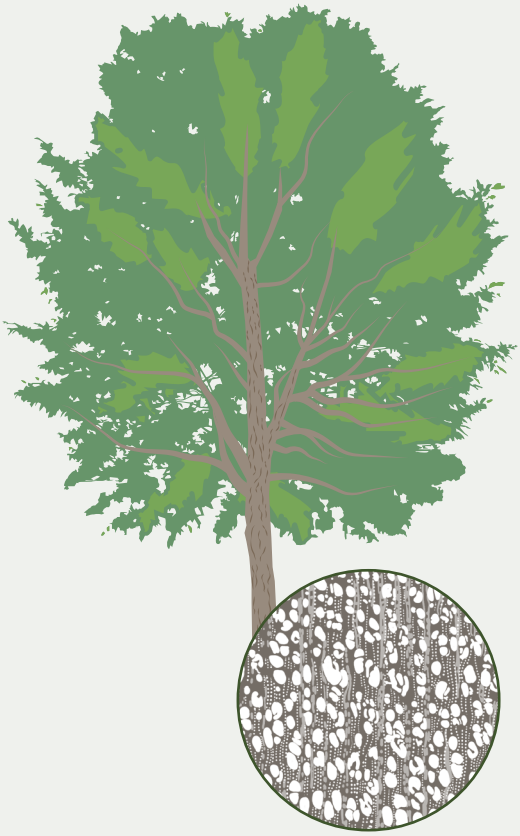


Ilustración corte transversal células raulí

| CARACTERÍSTICAS

Básicas

Nombre en el exterior:	Falsa Haya o Haya Raulí
Familia:	Fagaceae
Ubicación:	Zona centro, zona sur

Físicas

Densidad normal:	550 $[kg/m^3]_{(1)}$

Higrotérmicas (NCh853)

Densidad aparente:	580 $[kg/m^3]$
Conductividad térmica (λ):	0,121 $[W/(m^2 \cdot K)]$

Durabilidad: Agentes de biodeterioro (NCh789/1)

	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Hongos de pudrición	M	M	D	P	P	-
Insectos xilófagos	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	-
Xilófagos marinos	-	-	-	-	-	N

M: Muy durable *P: Poco durable*
D: Durable *N: No durable*
S: Semidurable *S/I: Sin información*

Dentro de las aplicaciones de la madera de raulí, se encuentra su uso en pisos, terminaciones exteriores e interiores, persianas, puertas y ventanas, tejuelas, muebles y en la fabricación de chapas y terciados.

| CATEGORÍAS DE USO COMO ELEMENTO

Uso estructural	
Carpinterías	■
Revestimiento exterior	
Revestimiento interior	■
Pisos interiores	■
Pisos exteriores	
Mueblería	■

| PROTECCIÓN AMBIENTAL

Origen

Endémica	
Exótico	
Nativo	■

Categoría Vigente

- Preocupación menor

Protección

- Ley Número 20.283

Lenga

Nothofagus pumilio

La lenga es una especie maderera nativa latifoliada, este árbol caduco de copa piramidal, puede alcanzar los 30 metros de altura y su tronco hasta 1,5 metros de diámetro, siendo este de forma cilíndrica. Esta especie crece entre las provincias de Talca y Cabo de Hornos en la provincia Antártica Chilena, desde el nivel del mar hasta los 2000 metros de altura. Es de crecimiento lento en sus primeros años y en estado adulto, en estado juvenil puede alcanzar un crecimiento moderado.

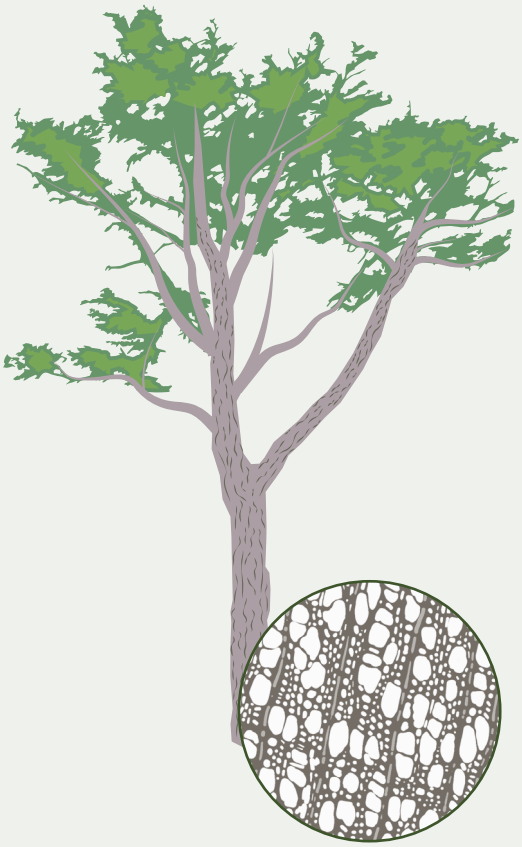


Ilustración corte transversal células lenga

| CARACTERÍSTICAS

Básicas	
Nombre en el exterior:	Haya austral, Roble de Magallanes
Familia:	Fagaceae
Ubicación:	Zona centro, zona sur
Físicas	
Densidad normal:	590 $[kg/m^3]_{(1)}$
Higrotérmicas (NCh853)	
Densidad aparente:	Sin información
Conductividad térmica (λ):	Sin información

Durabilidad: Agentes de biodeterioro (NCh789/1)

	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Hongos de pudrición	M	M	D	S	S	-
Insectos xilófagos	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	-
Xilófagos marinos	-	-	-	-	-	S/I

M: Muy durable *P: Poco durable*
D: Durable *N: No durable*
S: Semidurable *S/I: Sin información*

Dentro de las aplicaciones que presenta la madera de lenga, se encuentra su uso en muebles, revestimientos de muros interiores y en la fabricación de parquet, puertas y ventanas.

| CATEGORÍAS DE USO COMO ELEMENTO

Uso estructural	
Carpinterías	■
Revestimiento exterior	
Revestimiento interior	■
Pisos interiores	■
Pisos exteriores	
Mueblería	■

| PROTECCIÓN AMBIENTAL

Origen

Endémica	
Exótico	
Nativo	■

Categoría Vigente

- Preocupación menor

Protección

- Ley Número 20.283

Tepa

Laureliopsis philippiana

La tepa es una especie maderera nativa latifoliada, este árbol perenne puede alcanzar los 40 metros de altura y su tronco 2 metros de diámetro. Esta especie crece en la provincia de Talca, en Concepción y entre las provincias de Arauco y Aysén, habita en lugares húmedos de suelos profundos, desde el nivel del mar a los 1000 metros de altura, en ambas cordilleras. Es una especie de crecimiento medio a lento, abundante en las provincias de Llanquihue, Chiloé y Palena.



Ilustración corte transversal células tepa

| CARACTERÍSTICAS

Básicas

Nombre en el exterior:	*Laurelia*
Familia:	Monimiaceae
Ubicación:	Zona centro, zona sur

Físicas

Densidad normal:	552 $[kg/m^3]_{(1)}$

Higrotérmicas (NCh853)

Densidad aparente:	Sin información
Conductividad térmica (λ):	Sin información

Durabilidad: Agentes de biodeterioro (NCh789/1)

	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Hongos de pudrición	M	M	P	N	N	-
Insectos xilófagos	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	-
Xilófagos marinos	-	-	-	-	-	S/I

M: Muy durable *P: Poco durable*
D: Durable *N: No durable*
S: Semidurable *S/I: Sin información*

Dentro de las aplicaciones que presenta la madera de tepa, se encuentra la fabricación de tableros de terciado, puertas y ventanas, su uso en revestimientos interiores y exteriores, pisos y mueblería.

| CATEGORÍAS DE USO COMO ELEMENTO

Uso estructural	
Carpinterías	■
Revestimiento exterior	■
Revestimiento interior	■
Pisos interiores	■
Pisos exteriores	
Mueblería	■

| PROTECCIÓN AMBIENTAL

Origen

Endémica	
Exótico	
Nativo	■

Categoría Vigente

- Preocupación menor

Protección

- Ley Número 20.283

Laurel

Laurelia sempervirens

El laurel es una especie maderera nativa latifoliada endémica, este árbol siempreverde puede alcanzar los 40 metros de altura y su tronco 2 metros de diámetro. Esta especie crece entre las provincias de Cardenal Caro y Llanquihue, presente en suelos húmedos y profundos, desde el nivel del mar hasta casi 950 metros de altitud, en ambas cordilleras. Es una especie de crecimiento medio y que requiere abundante riego durante todo el año, es abundante en la zona sur de su distribución.



Ilustración corte transversal células laurel

| CARACTERÍSTICAS

Básicas	
Nombre en el exterior:	Laurel chileno, *Chilean Laurel*
Familia:	Monimiaceae
Ubicación:	Zona centro, zona sur
Físicas	
Densidad normal:	543 $[kg/m^3]_{(1)}$
Higrotérmicas (NCh853)	
Densidad aparente:	Sin información
Conductividad térmica (λ):	Sin información

Durabilidad: Agentes de biodeterioro (NCh789/1)

	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Hongos de pudrición	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	-
Insectos xilófagos	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	-
Xilófagos marinos	-	-	-	-	-	S/I

M: Muy durable *P: Poco durable*
D: Durable *N: No durable*
S: Semidurable *S/I: Sin información*

Dentro de las aplicaciones que tiene la madera de laurel, se presenta su uso en revestimientos interiores, puertas interiores, muebles de tipo económico, tinglados y molduras, también se utiliza para fabricar contrachapados. Es una madera blanda y se marca con facilidad.

| CATEGORÍAS DE USO COMO ELEMENTO

Uso estructural	
Carpinterías	
Revestimiento exterior	
Revestimiento interior	■
Pisos interiores	
Pisos exteriores	
Mueblería	■

| PROTECCIÓN AMBIENTAL

Origen

Endémica	■
Exótico	
Nativo	■

Categoría Vigente

- Preocupación menor

Protección

- Ley Número 20.283

Mañío de hojas cortas

Saxegothaea conspicua

El mañío de hojas cortas es una especie maderera nativa conífera, este árbol siempreverde es de copa frondosa, puede alcanzar una altura de 20 metros de altura y su tronco entre 0,6 metros y 1 metro de diámetro, siendo este de forma cilíndrica y recto. Esta especie crece entre las provincias de Talca y Aysén, desde el nivel del mar hasta los 1000 metros de altitud. Es una especie de crecimiento lento a moderado y se encuentra presente en varias áreas protegidas como parques y reservas nacionales.

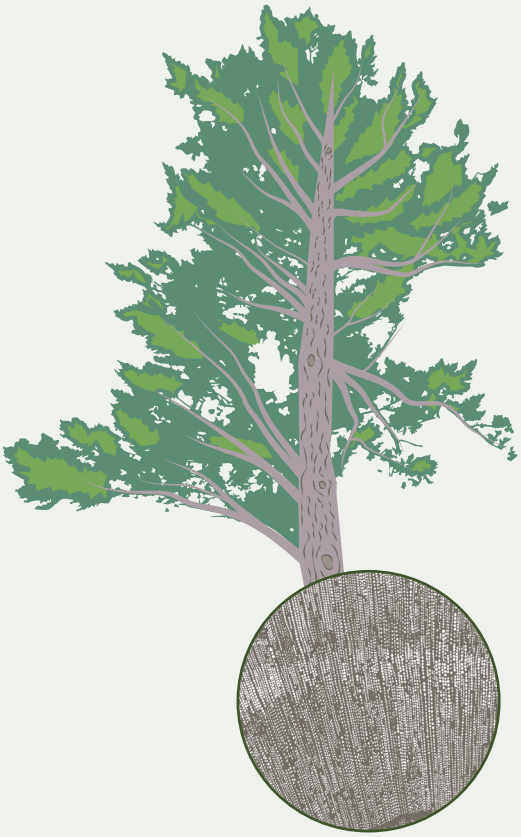


Ilustración corte transversal células mañío de hojas cortas

| CARACTERÍSTICAS

Básicas

Nombre en el exterior:	*Cloud podocarpus,* Pino amarillo
Familia:	Podocarpaceae
Ubicación:	Zona sur, zona austral

Físicas

Densidad normal:	464 $[kg/m^3]_{(1)}$

Higrotérmicas (NCh853)

Densidad aparente:	Sin información
Conductividad térmica (λ):	Sin información

Durabilidad: Agentes de biodeterioro (NCh789/1)

	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Hongos de pudrición	M	M	M	S	S	-
Insectos xilófagos	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	-
Xilófagos marinos	-	-	-	-	-	N

M: Muy durable *P: Poco durable*
D: Durable *N: No durable*
S: Semidurable *S/I: Sin información*

Los usos que se conocen para el mañio de hojas cortas se reducen a leña y para ciertas aplicaciones como pisos, mueblería y la fabricación de chapas y terciados.

| CATEGORÍAS DE USO COMO ELEMENTO

Uso estructural	
Carpinterías	■
Revestimiento exterior	
Revestimiento interior	
Pisos interiores	■
Pisos exteriores	
Mueblería	■

| PROTECCIÓN AMBIENTAL

Origen

Endémica	
Exótico	
Nativo	■

Categoría Vigente

- Preocupación menor

Protección

- Ley Número 20.283

Alerce

Fitzroya cupressoides

El alerce es una especie maderera nativa conífera, este árbol perenne es de copa alargada y estrecha, de hábito piramidal, puede alcanzar los 50 metros de altura y su tronco un diámetro superior a los 4 metros. Esta especie crece en Chile a lo largo de la Cordillera de la Costa entre las provincias de Valdivia y Chiloé y en la Cordillera de los Andes entre las provincias de Llanquihue y Palena. Es una especie de crecimiento extremadamente lento y una de las más longevas del mundo.



Ilustración corte transversal células alerce

| CARACTERÍSTICAS

Básicas

Nombre en el exterior:	*Patagonian Cypress*
Familia:	Cupressaceae
Ubicación:	Zona sur

Físicas

Densidad normal:	444 [kg/m^3]$_{(2)}$

Higrotérmicas (NCh853)

Densidad aparente:	560 [kg/m^3]
Conductividad térmica (λ):	0,134 [W/(m^2·K)]

Durabilidad: Agentes de biodeterioro (NCh789/1)

	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Hongos de pudrición	M	S	N	N	N	-
Insectos xilófagos	D$_{(3)}$	D$_{(3)}$	D$_{(3)}$	D$_{(3)}$	D$_{(3)}$	-
Xilófagos marinos	-	-	-	-	-	S/I$_{(3)}$

M: Muy durable *P: Poco durable*
D: Durable *N: No durable*
S: Semidurable *S/I: Sin información*

Sus usos se deben principalmente al aspecto de su veteado, para aplicaciones tanto en interiores como exteriores, siendo muy conocidas las tejuelas de alerce. También se realizan chapas para tableros de recubrimientos y se utiliza en la fabricación de muebles.

| CATEGORÍAS DE USO COMO ELEMENTO

Uso estructural	
Carpinterías	
Revestimiento exterior	■
Revestimiento interior	■
Pisos interiores	■
Pisos exteriores	■
Mueblería	■

| PROTECCIÓN AMBIENTAL

Origen

Endémica	
Exótico	
Nativo	■

Categoría Vigente

- En peligro

Protección

- Especie protegida (especie prohibida en la Norma EN 13556)
- Ley Núm. 20.283

5.2 Clasificación de productos de madera

La gran variedad de productos disponibles en el mercado, provenientes de la madera, responde a diferentes niveles de procesamiento, transformación y sofisticación técnica. A grandes rasgos, estos productos se pueden clasificar en función del tamaño de la pieza resultante respecto a su tamaño original, como se puede apreciar en la Figura 5.1. A medida que el grado de procesamiento de la madera es mayor, el tamaño de las piezas de madera disminuye progresivamente respecto del elemento original, lo que permite homogenizar sus propiedades, reducir o eliminar defectos propios del material, o bien evitar que estos se dispongan de forma continua y afecten negativamente su desempeño. Todo ello tiene como objetivo asegurar que el producto cumpla adecuadamente las funciones para las cuales ha sido diseñado. Sin embargo, es relevante considerar, que cuando se utilizan unidades de madera pequeñas para formar un producto de madera de mayor tamaño, generalmente es necesario utilizar algún tipo de aglomerante, los cuales tienen propiedades diferentes a la madera.

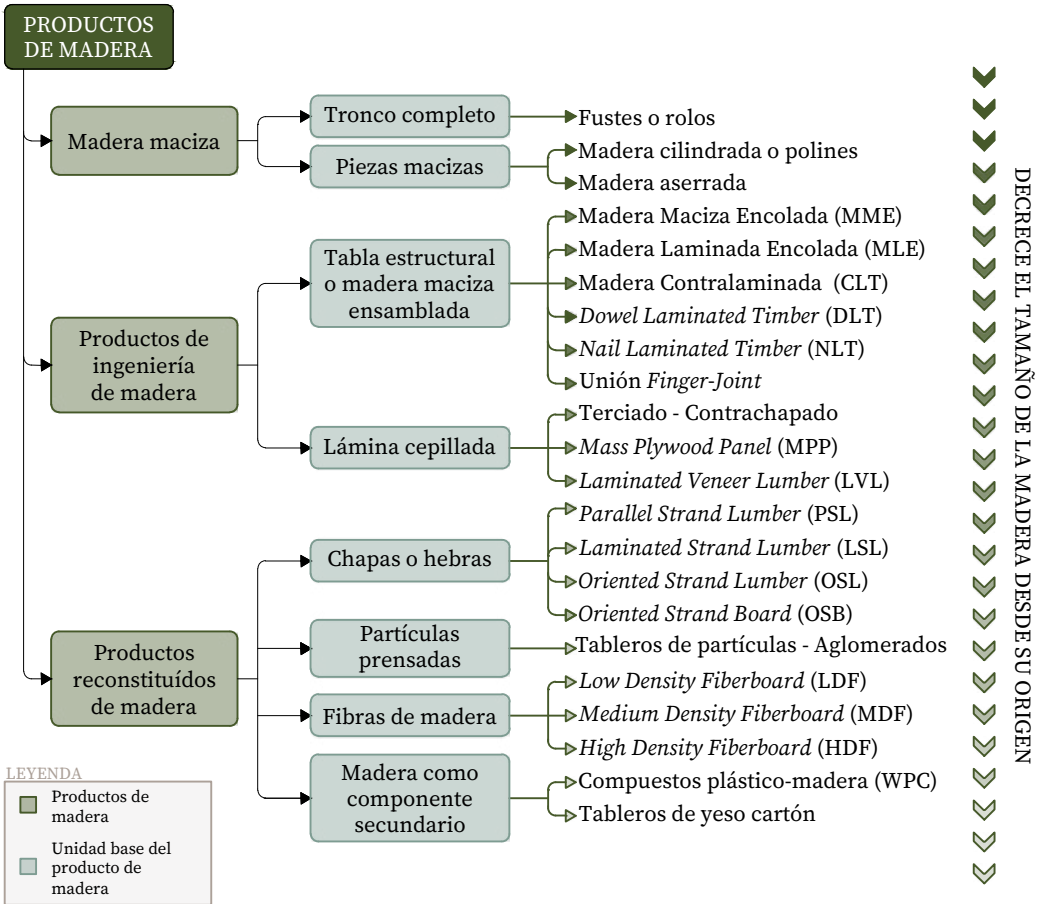


Figura 5.1 – Tamaño de los productos de madera

El siguiente esquema (5.2) presenta un desglose de las distintas familias de productos que actualmente se ofrecen en el mercado.

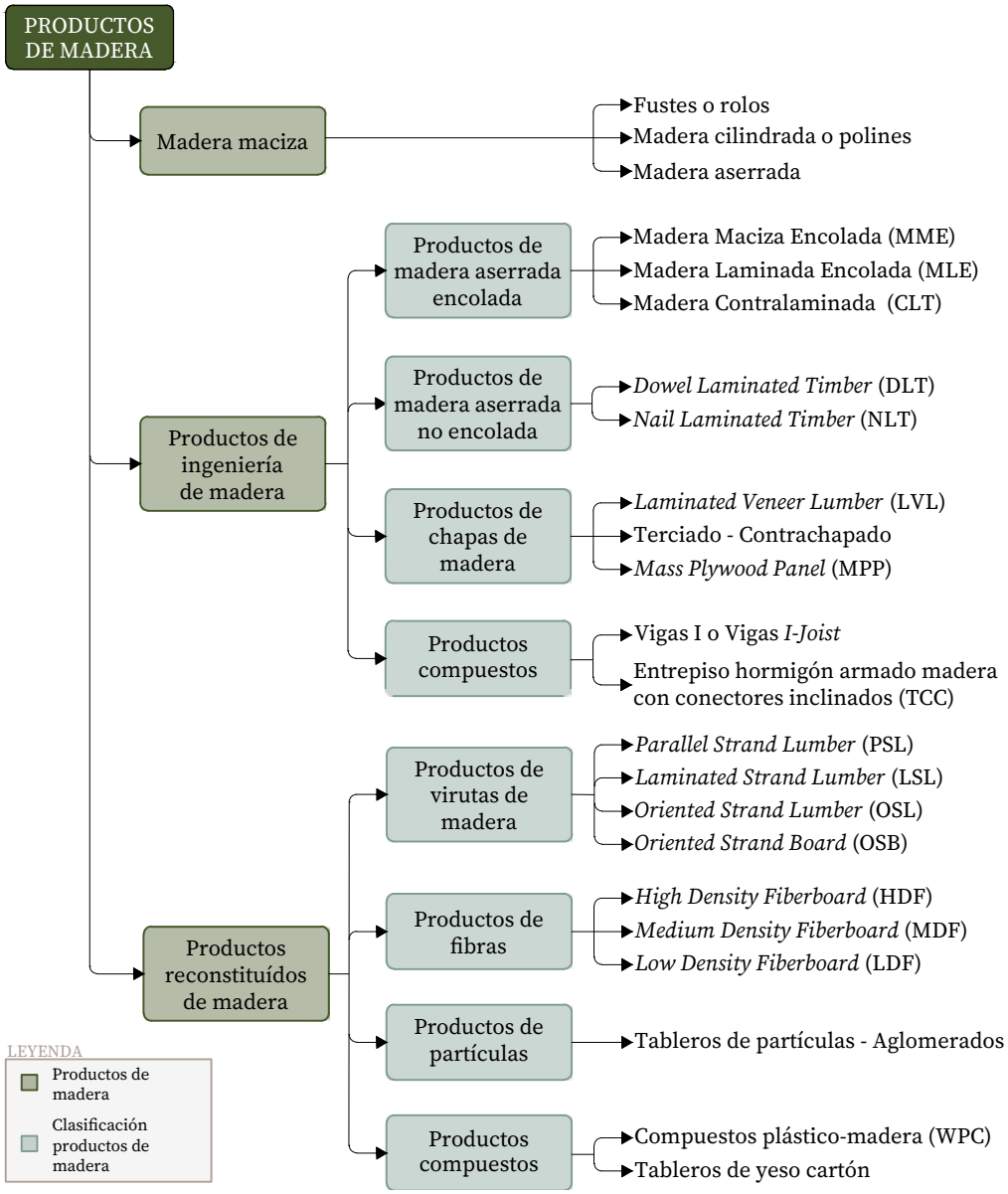


Figura 5.2 – Universo de productos en el mercado de madera.

Esta sección presentará, en su primera parte, un levantamiento general de los productos derivados de la madera. Asimismo, detallará, mediante fichas de cada producto presentadas a continuación, sus características básicas, composición, el uso de adhesivos o tipo de unión entre unidades mínimas, dimensiones estándar del producto, unidad mínima que lo compone, el tipo de uso, aplicaciones, alcance y una descripción breve.

PRODUCTO DE MADERA SÓLIDA

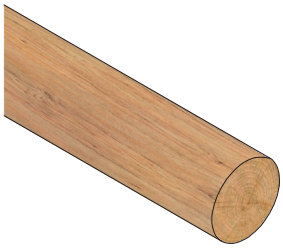
| FUSTES O ROLOS



Descripción	Tronco completo descortezado o natural
Características básicas	Tronco sin procesar (sin corteza)
Composición	Madera maciza
Adhesivos / unión	No presenta
Dimensiones estándar	L: 2m–12 m Ø variable
Unidad mínima	Tronco
Uso	Estructural
Aplicaciones	Pilotes, postes
Alcance	Rural, infraestructura, vivienda.

PRODUCTO DE MADERA SÓLIDA

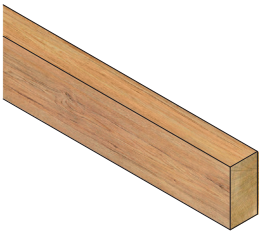
| MADERA CILINDRADA O POLINES



Descripción	Tronco mecanizado cilíndrico
Características básicas	Troncos torneados
Composición	Madera maciza
Adhesivos / unión	No presenta
Dimensiones estándar	L: 2m –6 m Ø: 6–20 cm
Unidad mínima	Pieza cilíndrica
Uso	Cercos, estructura liviana
Aplicaciones	Postes, cercos
Alcance	Rural, paisajismo.

PRODUCTO DE MADERA SÓLIDA

| MADERA ASERRADA

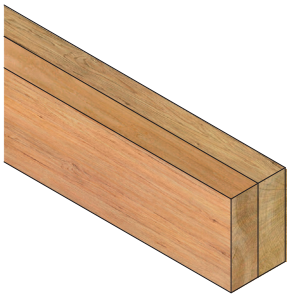


Descripción	Madera obtenida por aserrado de troncos con sección rectangular o cuadrada.
Características básicas	Piezas prismáticas
Composición	Madera maciza
Adhesivos / unión	No presenta
Dimensiones estándar	L: 1,2 m–6 m B: 25mm-100mm h: 50mm-210mm
Unidad mínima	Tabla o pieza
Uso	Estructural, carpintería
Aplicaciones	Vigas, pilares, entramados
Alcance	Vivienda y edificios de mediana altura.

Leyenda: L: Largo B: Espesor o Base h: Ancho o Altura Ø: Diámetro

PRODUCTOS DE INGENIERÍA DE MADERA - MADERA ASERRADA ENCOLADA

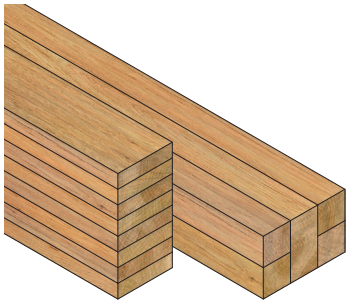
| MADERA MACIZA ENCOLADA (MME)



Descripción	Elemento estructural formado por dos a tres láminas de madera encoladas de madera lateral
Características básicas	Elemento estructural
Composición	Tablas de madera
Adhesivos / unión	Adhesivo estructural
Dimensiones estándar	L:12 m–16 m h: hasta 250mm
Unidad mínima	Láminas de 25 mm a 85 mm
Uso	Estructural
Aplicaciones	Vigas, columnas.
Alcance	Vivienda

PRODUCTOS DE INGENIERÍA DE MADERA - MADERA ASERRADA ENCOLADA

| MADERA LAMINADA ENCOLADA (MLE/GLULAM)



Descripción	Elemento estructural formado por un mínimo de 2 láminas de madera encoladas paralelamente.
Características básicas	Elemento estructural
Composición	Tablas de madera
Adhesivos / unión	Adhesivo estructural
Dimensiones estándar	L:12 m–16 m B: 70mm - 250mm h: hasta 2 m aprox.
Unidad mínima	Láminas entre 6 mm a 45 mm
Uso	Estructural
Aplicaciones	Vigas, columnas, arcos.
Alcance	Edificios, vivienda y puentes.

PRODUCTOS DE INGENIERÍA DE MADERA - MADERA ASERRADA ENCOLADA

| MADERA CONTRALAMINADA (CLT)

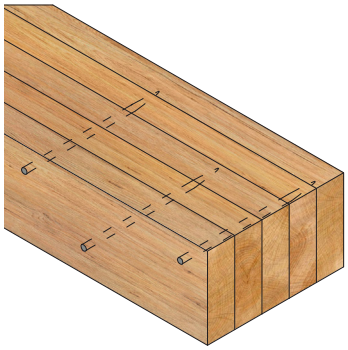


Descripción	Panel de madera contralaminada formado por 3,5,7, 9 u 11 capas simétricamente cruzadas encoladas.
Características básicas	Panel estructural macizo
Composición	Tablas de madera
Adhesivos / unión	Adhesivo estructural
Dimensiones estándar	L: hasta 20m. B: hasta 4,8m. h: 50 mm - 400 mm
Unidad mínima	Láminas entre 20 mm - 40 mm
Uso	Estructural
Aplicaciones	Muros, losas.
Alcance	Edificios y vivienda.

Leyenda: L: Largo B: Espesor o Base h: Ancho o Altura Ø: Diámetro

PRODUCTOS DE INGENIERÍA DE MADERA - MADERA ASERRADA NO ENCOLADA

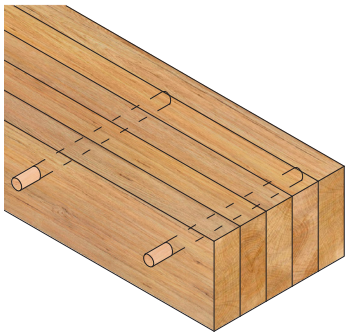
| NAIL LAMINATED TIMBER (NLT)



Descripción	Panel formado por una capa de tablas clavadas lateralmente que trabajan como elemento estructural macizo.
Características básicas	Panel estructural macizo
Composición	Tablas de madera y clavos
Adhesivos / unión	Clavos
Dimensiones estándar	L:hasta 12-15m - B: hasta 240mm
Unidad mínima	Láminas de madera
Uso	Estructural
Aplicaciones	Muros, losas
Alcance	Edificios, vivienda y forjados.

PRODUCTOS DE INGENIERÍA DE MADERA - MADERA ASERRADA NO ENCOLADA

| DOWEL LAMINATED TIMBER (DLT)

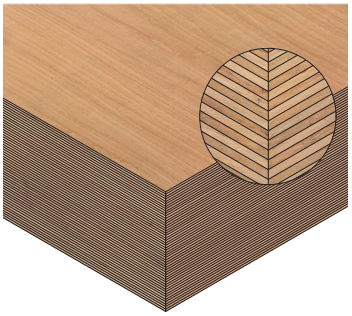


Descripción	Panel formado por una capa de tablas unidas con tarugos de madera que generan fricción estructural.
Características básicas	Panel estructural macizo
Composición	Tablas y tarugos madera
Adhesivos / unión	Tarugos madera
Dimensiones estándar	L: hasta 12-15m - B: hasta 240mm
Unidad mínima	Láminas de madera
Uso	Estructural
Aplicaciones	Muros, losas
Alcance	Edificios, vivienda y forjados.

Leyenda: L: Largo B: Espesor o Base h: Ancho o Altura Ø: Diámetro

PRODUCTOS DE INGENIERÍA DE MADERA - CHAPA DE MADERA

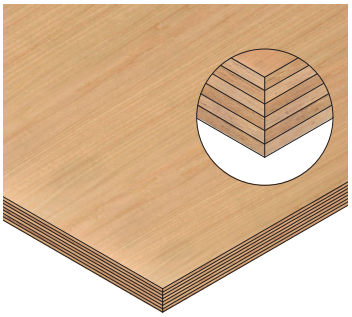
| MASS PLYWOOD PANEL (MPP)



Descripción	Panel de chapas gruesas contralaminadas encoladas
Características básicas	Panel estructural
Composición	Tablero de chapas gruesas de madera
Adhesivos / unión	Adhesivo estructural
Dimensiones estándar	Espesor 30–300 mm
Unidad mínima	Chapa
Uso	Estructural
Aplicaciones	Muros y losas
Alcance	Edificios

PRODUCTOS DE INGENIERÍA DE MADERA - CHAPA DE MADERA

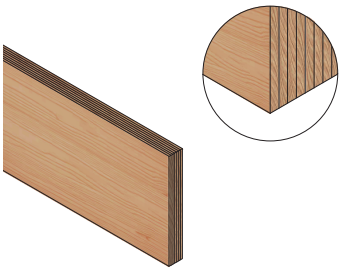
| TERCIADO O CONTRACHAPADO



Descripción	Panel de chapas de madera delgadas encoladas con fibras alternadas.
Características básicas	Tablero estructural o revestimiento
Composición	Tablero de chapas de madera
Adhesivos / unión	Adhesivo estructural
Dimensiones estándar	Espesor 3–30 mm
Unidad mínima	Chapa
Uso	Estructural o revestimiento
Aplicaciones	Muros y losas
Alcance	Vivienda, muebles

PRODUCTOS DE INGENIERÍA DE MADERA - CHAPA DE MADERA

| LAMINATED VENEER LUMBER (LVL)

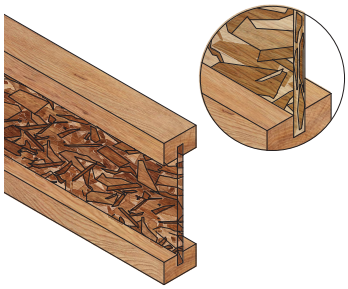


Descripción	Madera microlaminada estructural compuesta por chapas encoladas paralelas.
Características básicas	Elemento o tablero estructural
Composición	Tablero de chapas de madera microlaminada paralelas
Adhesivos / unión	Adhesivo estructural
Dimensiones estándar	Espesor 25–75 mm
Unidad mínima	Chapa microlaminada de 3 mm
Uso	Estructural
Aplicaciones	Vigas, columnas y tableros
Alcance	Edificios

Leyenda: L: Largo B: Espesor o Base h: Ancho o Altura Ø: Diámetro

PRODUCTOS DE INGENIERÍA DE MADERA - PRODUCTOS COMPUESTOS

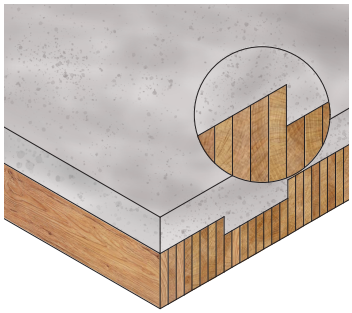
| VIGAS I / I-JOIST



Descripción	Viga liviana en forma de I con alma de OSB y alas de láminas de madera.
Características básicas	Elemento compuesto
Composición	Vigas de alas madera o LVL y alma de OSB
Adhesivos / unión	Adhesivo industrial
Dimensiones estándar	L: 12 m- 18 m B alas: 38 mm - 63 mm h alma: 200 mm - 400 mm
Unidad mínima	Láminas de madera aserrada y chapas de madera
Uso	Estructural
Aplicaciones	Vigas de entrepiso
Alcance	Edificios y vivienda.

PRODUCTOS DE INGENIERÍA DE MADERA - PRODUCTOS COMPUESTOS

| TIMBER CONCRETE COMPOSITE (TCC)

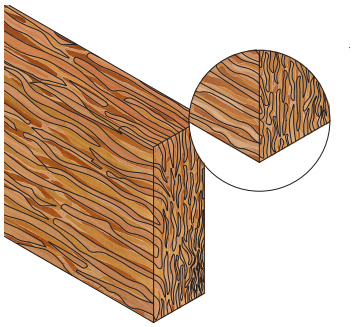


Descripción	Sistema híbrido donde madera y hormigón trabajan conjuntamente mediante conectores.
Características básicas	Sistema compuesto
Composición	Losa de madera y hormigón
Adhesivos / unión	Conectores metálicos
Dimensiones estándar	Losa de hormigón: 80 mm - 120 mm Madera: Vigas cada 60 cm - 120 cm o paneles de losa
Unidad mínima	Lámina de madera
Uso	Estructural
Aplicaciones	Losas mixtas
Alcance	Edificios

Leyenda: L: Largo B: Espesor o Base h: Ancho o Altura Ø: Diámetro

PRODUCTOS RECONSTITUIDOS DE MADERA - CHAPAS O HEBRAS

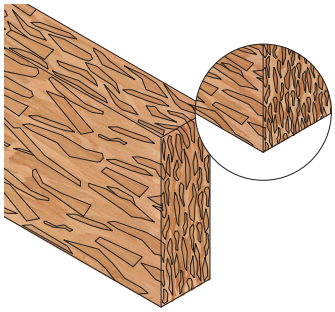
| PARALLEL STRAND LUMBER (PSL)



Descripción	Pieza estructural hecha con astillas de esbeltez alta orientadas prensadas con resina.
Características básicas	Viga o columna
Composición	Vigas de astillas de esbeltez alta orientadas
Adhesivos / unión	Adhesivo industrial
Dimensiones estándar	L: 3 m - 20 m B: 45 mm - 290 mm h: 45 mm - 600 mm
Unidad mínima	Astillas de alta esbeltez
Uso	Estructural
Aplicaciones	Vigas, columnas
Alcance	Edificios

PRODUCTOS RECONSTITUIDOS DE MADERA - CHAPAS O HEBRAS

| LAMINATED STRAND LUMBER (LSL)

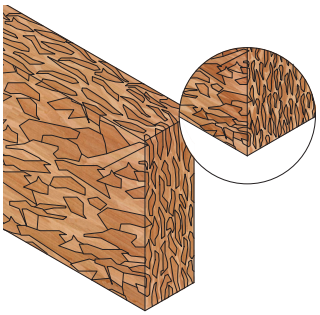


Descripción	Pieza estructural hecha con astillas de esbeltez media orientadas prensadas con resina.
Características básicas	Viga o columna
Composición	Vigas de astillas de esbeltez media orientadas
Adhesivos / unión	Adhesivo industrial
Dimensiones estándar	L: 2.4 m - 9 m B: 38 mm - 140 mm h: 90 mm - 400 mm
Unidad mínima	Astillas de esbeltez media
Uso	Estructural
Aplicaciones	Vigas, vigas secundarias y columnas
Alcance	Vivienda

Leyenda: L: Largo B: Espesor o Base h: Ancho o Altura Ø: Diámetro

PRODUCTOS RECONSTITUIDOS DE MADERA - CHAPAS O HEBRAS

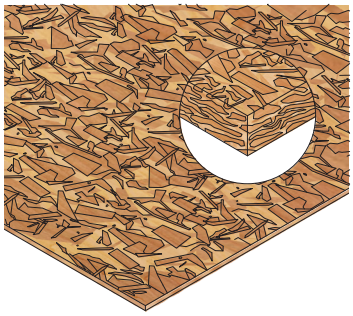
| ORIENTED STRAND LUMBER (OSL)



Descripción	Pieza estructural hecha con astillas orientadas prensadas con resina.
Características básicas	Viga
Composición	Vigas de astillas de baja esbeltez orientadas
Adhesivos / unión	Adhesivo industrial
Dimensiones estándar	L: hasta 4m B: 38 mm -140 mm h: 9 mm - 22 mm
Unidad mínima	Astillas de baja esbeltez
Uso	Estructural
Aplicaciones	Vigas
Alcance	Vivienda

PRODUCTOS RECONSTITUIDOS DE MADERA - CHAPAS O HEBRAS

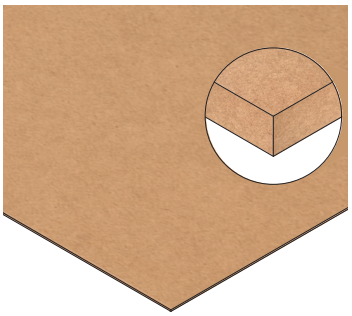
| ORIENTED STRAND BOARD (OSB)



Descripción	Tablero estructural compuesto por capas de astillas largas orientadas prensadas.
Características básicas	Tablero estructural
Composición	Tablero de astillas orientadas
Adhesivos / unión	Adhesivo industrial
Dimensiones estándar	L: 2.44 m B: 1.22 m h: 9 mm - 22 mm
Unidad mínima	Astillas
Uso	Estructural
Aplicaciones	Muros y losas
Alcance	Vivienda

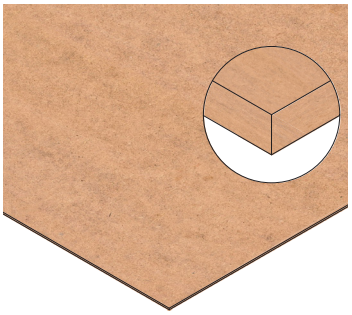
Leyenda: L: Largo B: Espesor o Base h: Ancho o Altura Ø: Diámetro

PRODUCTOS RECONSTITUIDOS DE MADERA - FIBRAS DE MADERA
| HDF



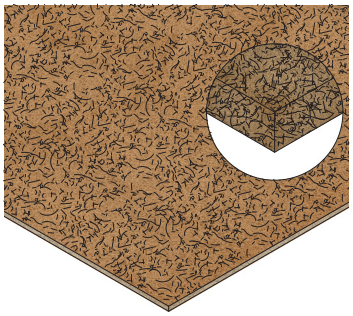
Descripción	Tablero de fibras de madera de alta densidad prensadas.
Características básicas	Tablero no estructural
Composición	Fibras de alta densidad
Adhesivos / unión	Adhesivo industrial
Dimensiones estándar	L: 1.22 m B: 2mm - 8mm h: 2.44 m
Unidad mínima	Fibras de madera
Uso	Revestimiento
Aplicaciones	Pisos laminados
Alcance	Interior

PRODUCTOS RECONSTITUIDOS DE MADERA - FIBRAS DE MADERA
| MDF



Descripción	Tablero de fibras de madera de densidad media prensadas.
Características básicas	Tablero no estructural
Composición	Fibras de densidad media
Adhesivos / unión	Adhesivo industrial
Dimensiones estándar	L: 1.22 m B: 3mm - 25mm h: 2.44 m
Unidad mínima	Fibras de madera
Uso	Carpintería
Aplicaciones	Muebles, molduras
Alcance	Interior

PRODUCTOS RECONSTITUIDOS DE MADERA - FIBRAS DE MADERA
| LDF

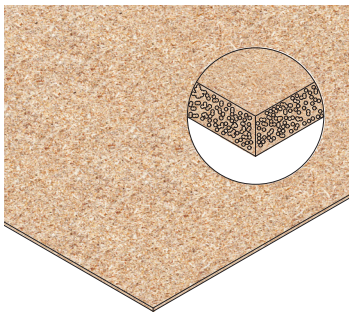


Descripción	Tablero liviano de fibras de madera de baja densidad.
Características básicas	Tablero no estructural
Composición	Fibras de baja densidad
Adhesivos / unión	Adhesivo industrial
Dimensiones estándar	L: 1.22 m B: 9mm - 18mm h: 2.44 m
Unidad mínima	Fibras de madera
Uso	Aislación
Aplicaciones	Paneles interiores
Alcance	Interior

Leyenda: L: Largo B: Espesor o Base h: Ancho o Altura Ø: Diámetro

PRODUCTOS RECONSTITUIDOS DE MADERA - PARTÍCULAS PRENSADAS

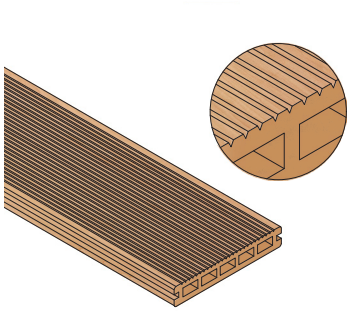
| TABLERO DE PARTÍCULAS



Descripción	Tablero fabricado con partículas de madera prensadas con resinas.
Características básicas	Tablero no estructural
Composición	Tablero de partículas madera
Adhesivos / unión	Adhesivo industrial
Dimensiones estándar	L: 1.22 m o 1.83 m B: 15mm - 25 mm h: 2.44 m o 2.5 m
Unidad mínima	Partícula de madera
Uso	Paneles para mobiliarios
Aplicaciones	Mobiliario
Alcance	Interior

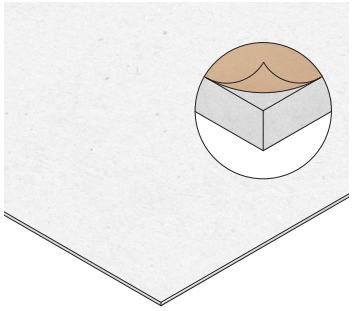
Leyenda: L: Largo B: Espesor o Base h: Ancho o Altura Ø: Diámetro

PRODUCTOS RECONSTITUIDOS DE MADERA - MADERA COMO COMPONENTE SECUNDARIO
| WPC



Descripción	Compuesto de plástico y fibras de madera usado en elementos exteriores.
Características básicas	Tabla o panel no estructural
Composición	Tabla o panel de fibras de madera y plástico
Adhesivos / unión	Adhesión propia de los compuestos plásticos
Dimensiones estándar	Perfiles variables según molde de extrusión
Unidad mínima	Fibras de madera
Uso	Revestimiento
Aplicaciones	Deck, fachadas
Alcance	Revestimientos y mobiliario exterior

PRODUCTOS RECONSTITUIDOS DE MADERA - MADERA COMO COMPONENTE SECUNDARIO
| YESO CARTÓN



Descripción	Panel de yeso revestido en cartón usado en tabiques interiores.
Características básicas	Panel constructivo no estructural
Composición	Panel de dos capas de cartón, con un núcleo de yeso y aditivos opcionales
Adhesivos / unión	Adhesión industrial
Dimensiones estándar	L: 1.2 B: 9.5 mm - 15 mm h: 2.4 m
Unidad mínima	Capas de cartón
Uso	Tabiquería o panelizado
Aplicaciones	Muros y losas
Alcance	Terminaciones

Leyenda: L: Largo B: Espesor o Base h: Ancho o Altura Ø: Diámetro



06
Evaluación del riesgo: el producto de madera en servicio

Una vez clasificadas las distintas especies madereras y los productos de madera, junto con sus características específicas, abordadas en el capítulo anterior (5), el siguiente paso consiste en evaluar su desempeño en servicio. Esta evaluación es aplicable tanto para elementos estructurales como a elementos de terminación, de acuerdo con los requerimientos establecidos en la normativa vigente (6.3).

Cabe mencionar que, al evaluar el riesgo, el análisis se realiza sobre el **producto de madera en su condición de elemento constructivo** (o elemento de madera), es decir, cuando este ya cumple un rol estructural o arquitectónico definido dentro de la edificación. Asimismo, dicha evaluación considera que la edificación se encuentra emplazada en una ubicación geográfica específica, lo que implica una exposición determinada a condiciones climáticas particulares y a agentes de biodeterioro asociados a dicho contexto.

Por lo tanto, al especificar un elemento de madera, es relevante comprender sus características de durabilidad, considerando tanto aquellas inherentes a la especie maderera (durabilidad natural), como las adquiridas mediante la aplicación de tratamientos preservantes (durabilidad adquirida). Estas consideraciones deben complementarse con las propiedades físicas y morfológicas del producto de madera, con el fin de asegurar que el elemento cumpla adecuadamente con los requerimientos para los cuales fue concebido y alcance la vida útil proyectada en servicio.

El objetivo de este capítulo es entregar al usuario la información necesaria para comprender la evaluación de riesgo de los elementos de madera, considerando experiencias nacionales e internacionales. Esto permite ampliar el alcance de la normativa nacional incorporando definiciones más precisas provenientes de países con mayor trayectoria en el uso y preservación de la madera.

Uno de los objetivos principales de la evaluación del riesgo es determinar si los productos de madera que componen un elemento constructivo de madera necesitan o no un tratamiento preservante. Este tema se aborda en detalle en el *Tomo II: Manual de preservación de la Madera: Tratamientos y Control para la Durabilidad de Edificaciones en Madera*.

El presente capítulo abordará los niveles de riesgo asociados a los elementos de madera, considerando tanto la condición de uso como la presencia de agentes biológicos de deterioro (6.1). Una vez definido el nivel de riesgo, se deberá verificar la categoría de durabilidad correspondiente según la NCh819, en función de la especie de madera seleccionada (6.2). Finalmente, se revisarán los requerimientos normativos asociados a la durabilidad y preservación que cada elemento constructivo de madera podrá necesitar, o no, dependiendo del nivel de riesgo y de la durabilidad natural de la madera seleccionada (6.3).

6.1 Niveles de riesgo

Los niveles de riesgo valoran las condiciones de uso, las cuales, a su vez, describen las incidencias derivadas de la ubicación del elemento, tanto en su posición espacial como geoespacial. La primera hace referencia a la posición del elemento de madera dentro de la propia edificación, por ejemplo, en cimientos, entrepisos, en la techumbre, entre otros. La segunda alude a las condiciones geoespaciales del lugar donde se emplaza la edificación. Estas condiciones pueden expresarse como zonificaciones que identifican variables, como el grado de humedad ambiental, la presencia de colonias de termitas, la orientación y los efectos de la radiación solar sobre el elemento o, por el contrario, las situaciones en que la falta de exposición impide el secado y perpetúa la humedad, u otros factores propios del entorno que puedan incidir en la durabilidad del elemento.

Con el objetivo de especificar con mayor exactitud los distintos niveles de riesgo asociados al uso de elementos de madera, se propone establecer una equivalencia entre las clasificaciones utilizadas en distintas normativas nacionales e internacionales.

Por una parte, existen clasificaciones basadas en condiciones de servicio, las cuales describen el ambiente higrotérmico al que estará expuesto el elemento estructural y se utilizan principalmente para definir su comportamiento en servicio y los parámetros de cálculo estructural. En este grupo se encuentran las condiciones de servicio definidas en la NCh1198, NCh2148 y *service classes* del Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1).

Por otra parte, existen clasificaciones orientadas a describir las condiciones de exposición ambiental de la madera y la probabilidad de deterioro biológico. Dentro de este grupo se incluyen las "condiciones de uso" definidas en la NCh819, las "*Use Categories*" de la normativa estadounidense de la *American Wood Protection Association*, las "*Hazard Classes*" de la normativa australiana y neozelandesa, y las "Clases de uso" establecidas en la EN 335.

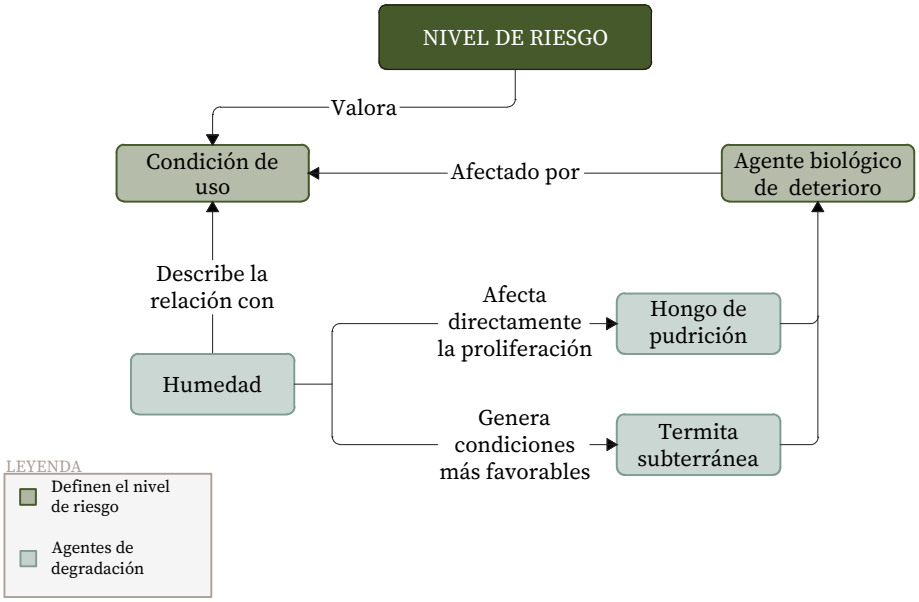


Figura 6.1 – Niveles de riesgo

| TABLA 17 - EQUIVALENCIA ENTRE NIVEL DE RIESGO, CONDICIÓN DE SERVICIO Y CLASE DE USO

Nivel de riesgo NCh819:2019	Condición de servicio NCh2165:2023 Anexo F	Clase de uso UNE-EN335:2013	Clases de riesgo AS/NZS 1604.1:2021	Categorías de uso AWPA 2020 Book of Standards
Riesgo 1 (R1)	Condición de servicio 1	Clase de uso 1	H1	UC1
			H1.2a	
Riesgo 2 (R2)	Condición de servicio 2	Clase de uso 2	H2	UC2
			H2 F	
			H2 S	
Riesgo 3 (R3)	-	Clase de uso 3.1	H3	UC3A
	Condición de servicio 3	Clase de uso 3.2	H3 A	UC3B
			H3 Fencing	
Riesgo 4 (R4)	-	Clase de uso 4	H4	UC4A
				UC4B
				UC4C
Riesgo 5 (R5)	-	-	H5	-
Riesgo 6 (R6)	-	Clase de uso 5	H6	UC5A
				UC5B
				UC5C

NOTA: Equivalencia en base a descripciones cuantitativas y cualitativas incluidas en cada norma.

6.1.1 Condición de uso

Para realizar dicha equivalencia, es necesario definir previamente los parámetros que determinarán cada condición de uso. Para ello, se deben considerar las siguientes categorías:

TABLA 18 – ESTRUCTURA PARA DEFINIR LA CONDICIÓN DE USO

Leyenda	Significado	Condición
U	Ubicación en la edificación	Interior
		Exterior
P	Posición respecto al suelo	Sobre el nivel del suelo
		En contacto con el suelo
		En contacto con agua dulce
		En contacto con agua salada
E	Exposición a la intemperie	No (condición interior o completamente protegida de agentes climáticos)
		Parcialmente expuesto
		Expuesto directamente
F	Frecuencia de humidificación	No (ambiente seco o protegido)
		Ocasional
		Permanente
C	Capacidad de secado	Buena
		Regular
		Mala

La Tabla 19 presenta, para cada nivel de riesgo, las opciones o variables que un elemento puede adoptar según la categoría correspondiente y el nivel de riesgo al que estará expuesto en servicio. Se puede presentar que un elemento esté sujeto a una o más condiciones específicas, además de otras con características particulares (en notas).

TABLA 19 – PARÁMETROS PARA DEFINIR LA CONDICIÓN DE USO

Categorías		Condición	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Condición de uso	Ubicación en la edificación	Exterior	✗	✗	✓	✓	✓	✓
		Interior	✓	✓	✓	✗	✗	✗
	Posición respecto al suelo	Sobre el nivel de suelo	✓	✓	✓	✗	✗	✗
		En contacto con el suelo	✗	✗	✗	✓	✓	✗
		En contacto con agua dulce	✗	✗	✗	✓(1)	✓(2)	✗
		En contacto con agua salada	✗	✗	✗	✗	✗	✓
	Exposición a la intemperie	No (condición interior o completamente protegida de agentes climáticos)	✓	✓	✗	✗	✗	✗
		Parcialmente expuesto (protegido por alero, revestimiento, cubierta)	✗	✗	✓	✓	✓	✓
		Expuesto directamente	✗	✗	✓	✓	✓	✓
	Frecuencia de humidifación	No (ambiente seco o protegido)	✓	✗	✗	✗	✗	✗
		Ocasional	✗	✓	✓	✓	✓	✓
		Permanente	✗	✗	✗	✓	✓	✓
	Capacidad de Secado	Buena	–(4)	✓(3)	✓(3)	✓(2)	✓	✓
		Regular	–(4)	✓(3)	✓(3)	✓(2)	✓	✓
		Mala	–(4)	–(5)	–(5)	–(5)	✓	✗
Agente biológico de deterioro		Hongos de Pudrición	✗	✓	✓	✓	✓	✓
		Termita subterránea	✓	✓	✓	✓	✓	✗
		Xilófagos marinos	✗	✗	✗	✗	✗	✓

Notas:

1) Contacto esporádico.

2) Contacto prolongado a ciclos largos de humedad

3) La capacidad de secado es una respuesta directa frente a la frecuencia de humidificación; por lo tanto, constituye una decisión proyectual que debe evaluar el profesional responsable al diseñar un elemento en ese nivel de riesgo.

4) No se requiere capacidad de secado cuando no existe riesgo real de humidificación.

5) Si existe frecuencia de humidificación y no se garantiza la aislación adecuada o capacidad de secado, deben implementarse medidas de control o protección.

Como resultado de la combinación de los niveles de riesgo establecidos en distintas normativas internacionales y considerando la categorización de las variables según las condiciones de uso y los agentes biológicos de deterioro, se presenta la siguiente tabla, que sintetiza los resultados de este análisis.

| TABLA 20 - DESCRIPCIÓN DE LOS NIVELES DE RIESGO (BASADO EN NCH819)

	Cuantitativa	Cualitativa		Descripción	Ejemplos
		Condición de uso	Agentes biológicos de deterioro		
Riesgo 1 (R1)	**Límite superior:** HR interior =65% HS=12% **Promedio anual:** HR=50% HS=10%	**U:** Interior **P:** Sobre el nivel del suelo **E:** No (condición interior o completamente protegida de agentes climáticos) **F:** No (ambiente seco o protegido) **C:** No requiere[1]	• Termita subterránea	Elementos dentro de una solución constructiva protegidos y aislados de la humedad ambiental, o ubicados en espacios interiores donde las condiciones higrotérmicas se mantienen controladas, ya sea por estrategias pasivas (envolvente eficiente) o activas (climatización), generando ambientes secos y sin fuentes relevantes de humedad.	**Elemento protegido:** • Cercha protegida completamente en un entretecho • Muros de CLT revestidos y aislados dentro de tabiques interiores. • Vigas de entrepiso ubicadas dentro de un sistema constructivo hermético y seco. **Elemento en condición interior:** • Elementos de madera visibles dentro de oficinas donde el aire interior se mantiene seco. • Revestimientos interiores de madera en recintos climatizados sin presencia significativa de vapor.
Riesgo 2 (R2)	**Límite superior:** HR interior=85% HS=20% **Promedio anual:** HR=75% HS=16%	**U:** Interior **P:** Sobre el nivel del suelo **E:** No (condición interior o completamente protegida de agentes climáticos) **F:** Ocasional **C:** Buena/ Regular[2]	• Hongos de pudrición • Termita subterránea	Elementos ubicados en espacios interiores protegidos, pero sujetos a humedad ocasional, generalmente por la actividad humana (baños, cocinas, lavanderías) o por alzas temporales de vapor, sin exposición permanente. Se recomienda que exista una adecuada capacidad de secado. También puede diagnosticarse como riesgo 2 cuando la edificación no presenta una buena capacidad de secado.	**Elemento protegido:** • CLT interior revestido dentro de un baño con ventilación adecuada. • Pie derecho dentro de un tabique, pero próximos a zonas húmedas. **Elemento expuesto:** • Madera interior expuesta en cocinas o logias con aumentos esporádicos de humedad. • Cubiertas estructurales de piscinas. • Madera cercana a ventanas donde se producen condensaciones puntuales en invierno.
Riesgo 3 (R3)	**Límite superior:** HR exterior=95% HS=24% **Promedio anual:** HR=85% HS=20%	**U:** Exterior/ Interior **P:** Sobre el nivel del suelo **E:** Parcialmente expuesto (protegido por alero, revestimiento, cubierta)/ Expuesto directamente **F:** Ocasional **C:** Buena/ Regular[2]	• Hongos de pudrición • Termita subterránea	Elementos ubicados en zonas exteriores parcialmente expuestas o expuestas directamente a la intemperie. Si bien la frecuencia de humectación es ocasional, la magnitud depende de la magnitud y variabilidad de la humedad relativa del lugar. Se requiere una capacidad de secado buena o regular para evitar degradación del material.	**Elementos parcialmente expuestos:** • Vigas bajo aleros. • Revestimiento exterior protegido por cubierta. **Elementos expuestos directamente:** • Pisos de terrazas. • Tejuelas de madera. • Celosías.

| TABLA 20 - DESCRIPCIÓN DE LOS NIVELES DE RIESGO (BASADO EN NCH819) - CONTINUACIÓN

	Cuantitativa	Cualitativa		Descripción	Ejemplos
		Condición de uso	Agentes biológicos de deterioro		
Riesgo 4 (R4)	HR= No aplica para la condición de uso HS= depende de la fuente de humedad con la cual mantiene contacto	**U:** Exterior **P:** En contacto con el suelo/ En contacto con agua dulce[3] **E:** Parcialmente expuesto (protegido por alero, revestimiento, cubierta)/ Expuesto directamente **F:** Ocasional/ Permanente **C:** Buena/ Regular[2]	• Hongos de pudrición • Termita subterránea	Elementos exteriores en contacto directo con el suelo o con agua dulce de manera esporádica. El contacto con fuentes de humedad ocurre por períodos más acotados y puede presentar mejores condiciones de secado que en el riesgo 5.	• Postes revestidos en jardines, pero sujetos a riego frecuente. • Madera enterrada o semienterrada en contacto directo con suelo natural. • Pasarelas o senderos sobre zonas húmedas o encharcadas.
Riesgo 5 (R5)	HR= No aplica para la condición de uso HS= depende de la fuente de humedad con la cual mantiene contacto	**U:** Exterior **P:** En contacto con el suelo/ En contacto con agua dulce[4] **E:** Parcialmente expuesto (protegido por alero, revestimiento, cubierta)/ Expuesto directamente **F:** Ocasional/ Permanente **C:** Buena/ Regular[2]	• Hongos de pudrición • Termita subterránea	Elementos en el exterior que mantienen contacto frecuente o permanente con suelo húmedo o con agua dulce, ya sea por inmersión parcial, inundación estacional o acumulación de agua. Corresponde a situaciones donde la madera permanece húmeda durante largos períodos.	• Muelle de madera en un lago o río de agua dulce. • Pilotes o apoyos de madera en una pasarela sobre humedal. • Elementos estructurales exteriores emplazados en zonas donde el agua dulce se acumula regularmente. • Estructuras de madera en bordes de ríos o lagos que experimentan inundación periódica.
Riesgo 6 (R6)	HR= No aplica para la condición de uso HS= depende de la fuente de humedad con la cual mantiene contacto	**U:** Exterior **P:** En contacto con agua salada **E:** Parcialmente expuesto (protegido por alero, revestimiento, cubierta)/ Expuesto directamente **F:** Ocasional/ Permanente **C:** Buena/ Regular[2]	• Hongos de pudrición • Xilófagos marinos	Elementos ubicados en el exterior en contacto directo o indirecto con agua salada, ya sea por inmersión o salpicadura frecuente. Corresponde a situaciones donde la acción combinada de humedad salina, mareas y xilófagos marinos genera condiciones de deterioro más severas, especialmente para elementos sumergidos o cercanos a zonas de oleaje.	• Pilotes de muelles o embarcaderos directamente sumergidos en agua de mar. • Estructuras de borde costero sometidas a salpicadura de olas y ciclos de marea diarios. • Plataformas, pasarelas o defensas costeras expuestas a xilófagos marinos y humedad salada permanente.

HR interior : humedad relativa del aire al interior de la edificación.

HR exterior: humedad relativa del aire al exterior de la edificación.

Hs : contenido de humedad de la madera en servicio.

Notas:

1) No se requiere capacidad de secado cuando no existe riesgo real de humidificación.

2) La capacidad de secado es una respuesta directa frente a la frecuencia de humidificación; por lo tanto, constituye una decisión proyectual que debe evaluar el profesional responsable al diseñar un elemento en ese nivel de riesgo.

3) Contacto esporádico.

4) Contacto prolongado a ciclos largos de humedad

5) Basado en NCh819:2019, NCh2148:2013, prEN1995-1-1:2023 y UNE-EN335:2013

6) Es importante diferenciar intemperie de exterior: intemperie hace referencia explícita a exposición a la lluvia y a la luz solar. Es posible una condición al exterior no expuesta a la intemperie.

Como se mencionó anteriormente, uno de los aspectos transversales a todos los niveles de riesgo es la interacción de la madera con el agua en sus distintos estados, tal como se detalló en la Tabla 14. Con el fin de sintetizar esta relación y facilitar la clasificación, a continuación, se presenta un diagrama de flujo para la asignación del nivel de riesgo, de acuerdo con lo establecido en la NCh819.

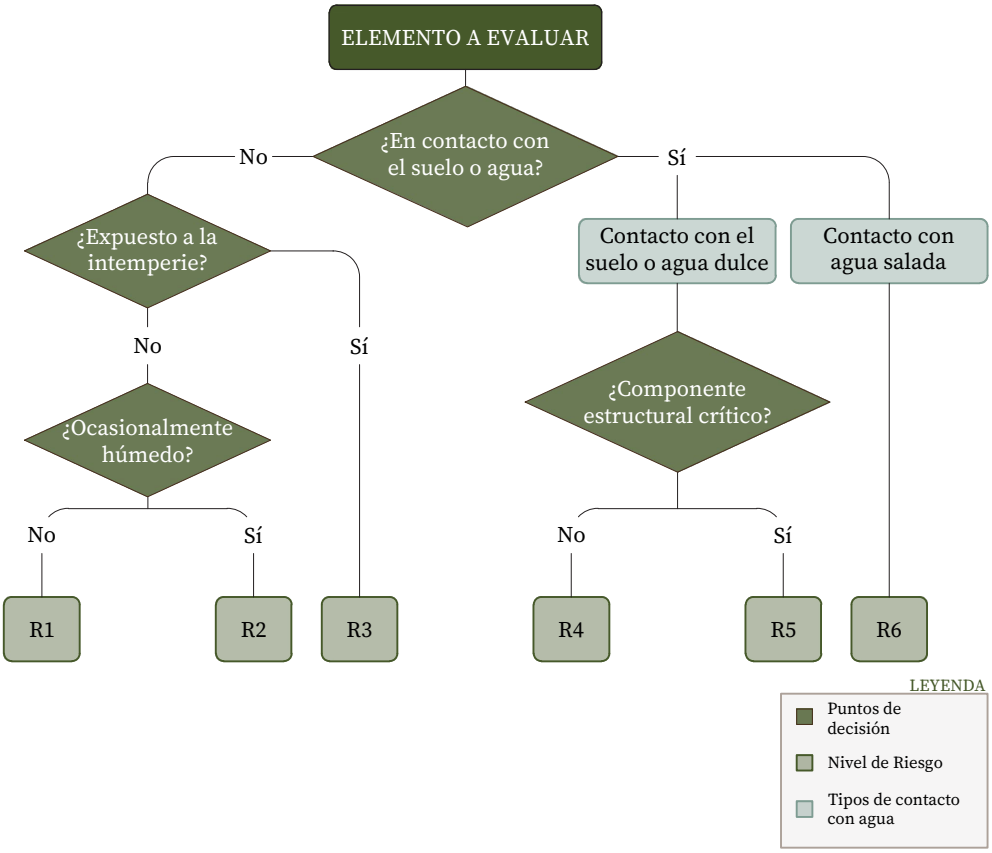


Figura 6.2 – Diagrama de flujo para la asignación de nivel de riesgo

6.2 Categoría de durabilidad según el nivel de riesgo

La normativa incluye tablas específicas para distintos tipos de agentes de deterioro: una para hongos de pudrición, otra para termita subterránea y una para xilófagos marinos. Esta última no se abordará en el presente documento, debido a que el enfoque se centra en la edificación en madera.

TABLA 21 - CATEGORÍA DE DURABILIDAD SEGÚN HONGOS DE PUDRICIÓN

Especie maderera		Categoría para nivel de riesgo definido en NCh819			
Nombre común	Nombre científico	R1	R2	R3	R4–R5
Álamo	*Populus spp*	M	S	N	N
Aromo del país	*Acacia dealbata (LINK)*	M	M	D	N
Canelo	*Drimys winteri FORST*	M	M	N	N
Ciprés macrocarpa	*Cupressus macrocarpa Hartw.*	M	M	S	N
Coihue	*Nothofagus dombeyi (MIRB)BL*	M	S	P	P
Eucalipto regnans	*Eucalyptus regnans F. Muell.*	M	S/I	S/I	S/I
Eucalipto nitens	*Eucalyptus nitens Deane et Maiden*	M	S	N	N
Eucalipto globulus	*Eucalyptus globulus LABILL.*	M	S	N	N
Lenga	*Nothofagus pumilio (POEPP. ET ENDL.) KRASSER*	M	M	D	S
Mañío	*Saxegothaea conspicua LINDL. | Podocarpus nubigenus LINDL.*	M	M	M	S
Pino oregón	*Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco*	M	S	N	N
Pino ponderosa	*Pinus ponderosa Douglas ex C. Lawson*	M	S	N	N
Pino radiata	*Pinus radiata D.DON*	M	S	N	N
Raulí	*Nothofagus alpina (POEPP. ET ENDL.) OERST*	M	M	D	P
Roble	*Nothofagus obliqua (MIRB) BL*	M	M	D	P
Tepa	*Laureliopsis philippiana LOOSER*	M	M	P	N

M: Muy durable
D: Durable
S: Semidurable
P: Poco durable
N: No durable
S/I: Sin información

NOTA 1: *Según NCh819, para la condición de riesgo R1 no existen condiciones para el desarrollo de hongos como agente de biodeterioro.*

NOTA 2: *Para las condiciones de riesgo R2, R3 y R4 no existe información experimental. La clasificación es en base a experiencia empírica y antecedentes del Comité Técnico.*

NOTA 3: *La clasificación entregada para las especies coihue, raulí y roble corresponde a madera proveniente de renovales. Maderas de estas especies provenientes de bosques primarios presentan una mayor durabilidad.*

| TABLA 22 - CATEGORÍA DE DURABILIDAD SEGÚN TERMITA SUBTERRÁNEA

Especie maderera		Categoría para nivel de riesgo definido en NCh819
Nombre común	Nombre científico	R1-R2-R3-R4-R5
Álamo	*Populus spp*	N
Aromo del país	*Acacia dealbata (LINK)*	S/I
Canelo	*Drimys winteri FORST*	N
Ciprés macrocarpa	*Cupressus macrocarpa Hartw.*	S/I
Coihue	*Nothofagus dombeyi (MIRB)BL*	S/I
Eucalipto regnans	*Eucalyptus regnans F. Muell.*	N
Eucalipto nitens	*Eucalyptus nitens Deane et Maiden*	N
Eucalipto globulus	*Eucalyptus globulus LABILL.*	N
Lenga	*Nothofagus pumilio (POEPP. ET ENDL.) KRASSER*	S/I
Mañío	*Saxegothaea conspicua LINDL. | Podocarpus nubigenus LINDL.*	S/I
Pino oregón	*Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco*	N
Pino ponderosa	*Pinus ponderosa Douglas ex C. Lawson*	N
Pino radiata	*Pinus radiata D.DON*	N
Raulí	*Nothofagus alpina (POEPP. ET ENDL.) OERST*	N
Roble	*Nothofagus obliqua (MIRB) BL*	N
Tepa	*Laureliopsis philippiana LOOSER*	S/I

N: No durable
S/I: Sin información

6.3 Requerimientos normativos generales

En Chile, la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (OGUC) establece los requerimientos y las normativas de carácter obligatorio que deben cumplirse en toda edificación. En relación con la durabilidad de la madera, se indican los tipos de elementos que deben cumplir exigencias específicas en esta materia, con el objetivo de que puedan resistir en el tiempo y mantener su función en la edificación.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo que describe los distintos pasos que el usuario debe seguir para cumplir con los requerimientos normativos. Cada una de estas etapas se encuentra regulada por normativas específicas y requiere determinados datos de entrada, los cuales son necesarios durante el proceso.

El proceso para la verificación normativa comienza con determinar a qué elementos de madera se aplican los requerimientos normativos. La OGUC, en el "*Título 5: De la construcción, Capítulo 6: Condiciones mínimas de elementos de construcción no sometidos a cálculo de estabilidad*", específicamente en el Artículo 5.6.8, establece la obligatoriedad de cumplir con los requisitos normativos de durabilidad para elementos estructurales, exigiendo un tratamiento preservante conforme a la norma NCh819, cuando la categoría de durabilidad, determinada según la NCh789/1, corresponda a la categoría "No durable".

Las normas citadas en este artículo son:

i. NCh789/1 Maderas – Parte 1 – Durabilidad de la madera

ii. NCh819 Madera preservada - Clasificación según riesgo de deterioro en servicio y muestreo

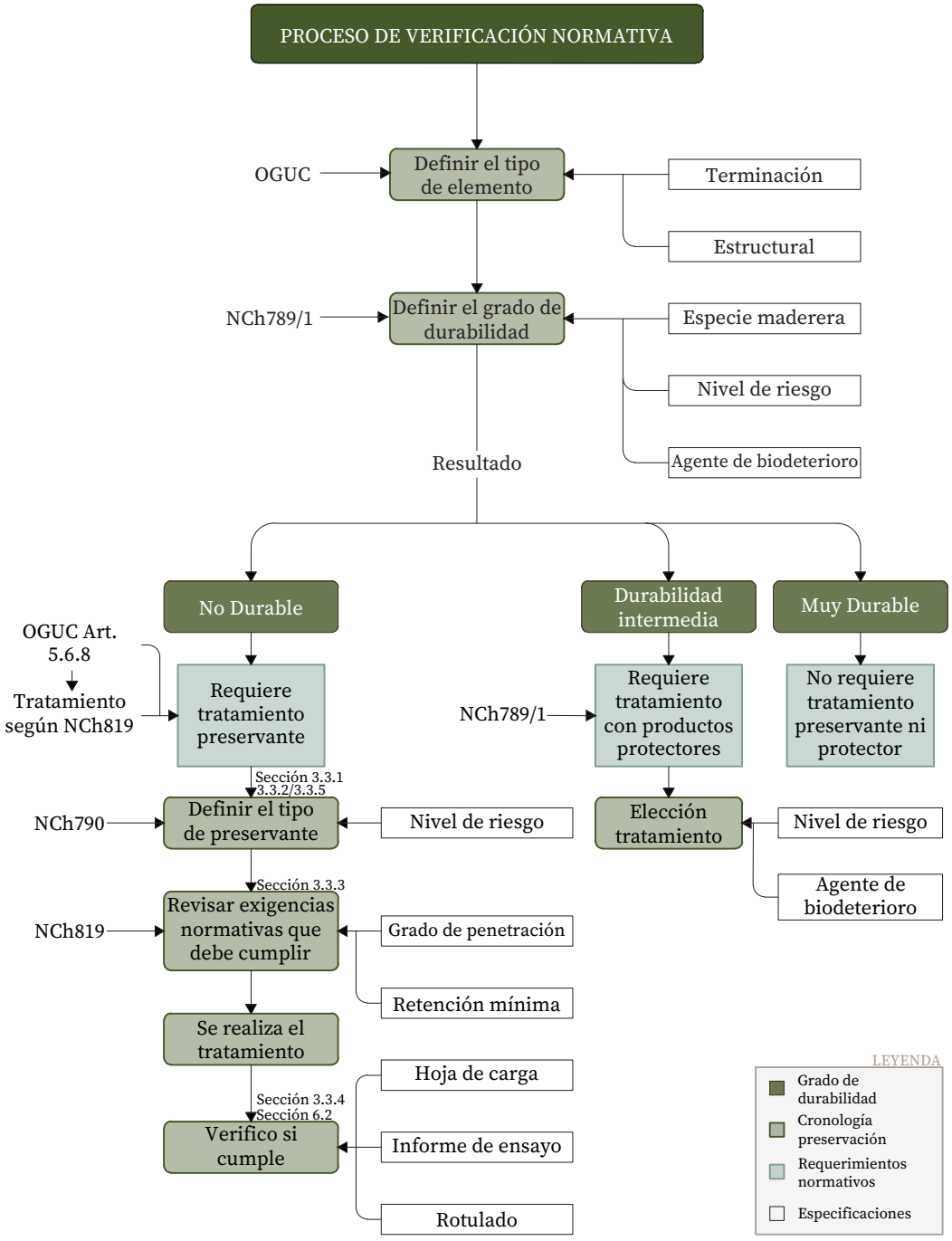


Figura 6.3 – Diagrama de flujo requerimientos normativos

Por otro lado, en el artículo 5.3.2 de la OGUC, "*Título 5: De la construcción, Capítulo 3: Clasificación de las construcciones*", se menciona que:

> **Artículo 5.3.2 – OGUC**
>
> *"Las construcciones con estructura soportante de madera y las prefabricadas de madera a que se refieren las clases E y H, deberán cumplir con las disposiciones del artículo 5.6.8 de esta Ordenanza. Igualmente las piezas o elementos de madera, ya sea estructural o de terminación, sometidos o no a cálculo estructural que contengan las demás clases de construcción, deberán cumplir con las disposiciones de los artículos 5.6.6 y 5.6.8 de esta Ordenanza."*
>
> *NOTA:*
> - *Clase E: Construcciones con estructura soportante de madera. Paneles de madera, de fibrocemento, de yeso-cartón o similares, incluidas las tabiquerías de adobe. Entrepisos de madera.*
> - *Clase H: Construcciones prefabricadas de madera. Paneles de madera, yesocartón, fibrocemento o similares.*

Este artículo vincula directamente las estructuras soportantes de madera con el cumplimiento del artículo 5.6.8 y extiende esta exigencia a los elementos de madera de terminación, que no son estructurales ni están sometidos a cálculo. Por lo tanto, los requerimientos de durabilidad no solo se aplican a los elementos estructurales, sino también a cualquier elemento de madera presente en la edificación, independientemente de su función o sistema constructivo predominante.

Si bien se presentan exigencias a los elementos de terminación, la NCh819 en el Anexo A categoriza los diferentes elementos de madera según el nivel de riesgo de deterioro al que se enfrentan, donde se mencionan maderas no estructurales de uso exterior en la construcción, en las que la necesidad de preservarlos está asociada a aquellos elementos que se ubican al menos en una condición de riesgo 3, es decir, elementos por encima del suelo y expuestos a la intemperie, tal como lo demuestra la Figura 6.4. Por lo tanto, para elementos de terminación en riesgos R1 o R2, la aplicación de estrategias de diseño o protección superficial debería ser suficiente para satisfacer las exigencias de durabilidad.

Una vez definido si la función del elemento es estructural o de terminación, considerando las particularidades previamente mencionadas, la segunda etapa consiste en determinar la categoría de durabilidad de la especie maderera que conforma la pieza o producto de madera. Esto permitirá establecer si esta debe recibir un tratamiento preservante o de protección, o si no es necesario aplicar un tratamiento.

Para evaluar la categoría de durabilidad de un elemento de madera, se considera lo establecido en la NCh789/1. Esta normativa indica que, para asignar la categoría de durabilidad, es necesario cruzar distintos factores determinantes, como la especie maderera, el nivel de riesgo y los agentes de biodeterioro a los que está expuesto el elemento de madera.

El cruce de estos factores se presenta en el Anexo A (informativo) de la NCh789/1, a través de tres tablas, una para cada agente de biodeterioro: hongos de pudrición, termita subterránea y xilófagos marinos. Estas tablas permiten determinar la categoría de durabilidad (6.2) de la especie maderera, considerando el nivel de riesgo definido en la NCh819.

Por lo tanto, una especie maderera puede clasificarse en distintas categorías de durabilidad. Por ejemplo, el roble, según el Anexo A de la NCh789/1, se puede considerar muy durable, poco durable o no durable frente a hongos de pudrición, dependiendo del nivel de riesgo al que se encuentra expuesto.

Sin embargo, si el mismo elemento de roble se encuentra en una zona con presencia de termita subterránea, se clasifica en la categoría 5, "No durable", para todos los niveles de riesgo, según la tabla correspondiente. En estos casos, cuando una pieza de madera está expuesta simultáneamente a más de un agente de biodeterioro, prevalecerá siempre la condición de durabilidad más desfavorable.

Es responsabilidad del proyectista identificar el nivel de riesgo al que puede estar expuesto cada elemento de madera y, en función de ello, determinar cuáles requieren tratamiento preservante, el tipo de producto que debe aplicarse y las especificaciones que deben cumplir las piezas o productos tratados, a fin de satisfacer las exigencias normativas y alcanzar la durabilidad esperada. Contar con estos conocimientos permite, por un lado, que quien realiza el tratamiento pueda verificar si la retención mínima de producto y la penetración son adecuadas o si es necesario realizar ajustes; por otro lado, permite al distribuidor o cliente final asegurarse de que la madera no esté subprotegida ni sobreprotegida, evitando riesgos de biodeterioro o sobrecostos innecesarios del producto.

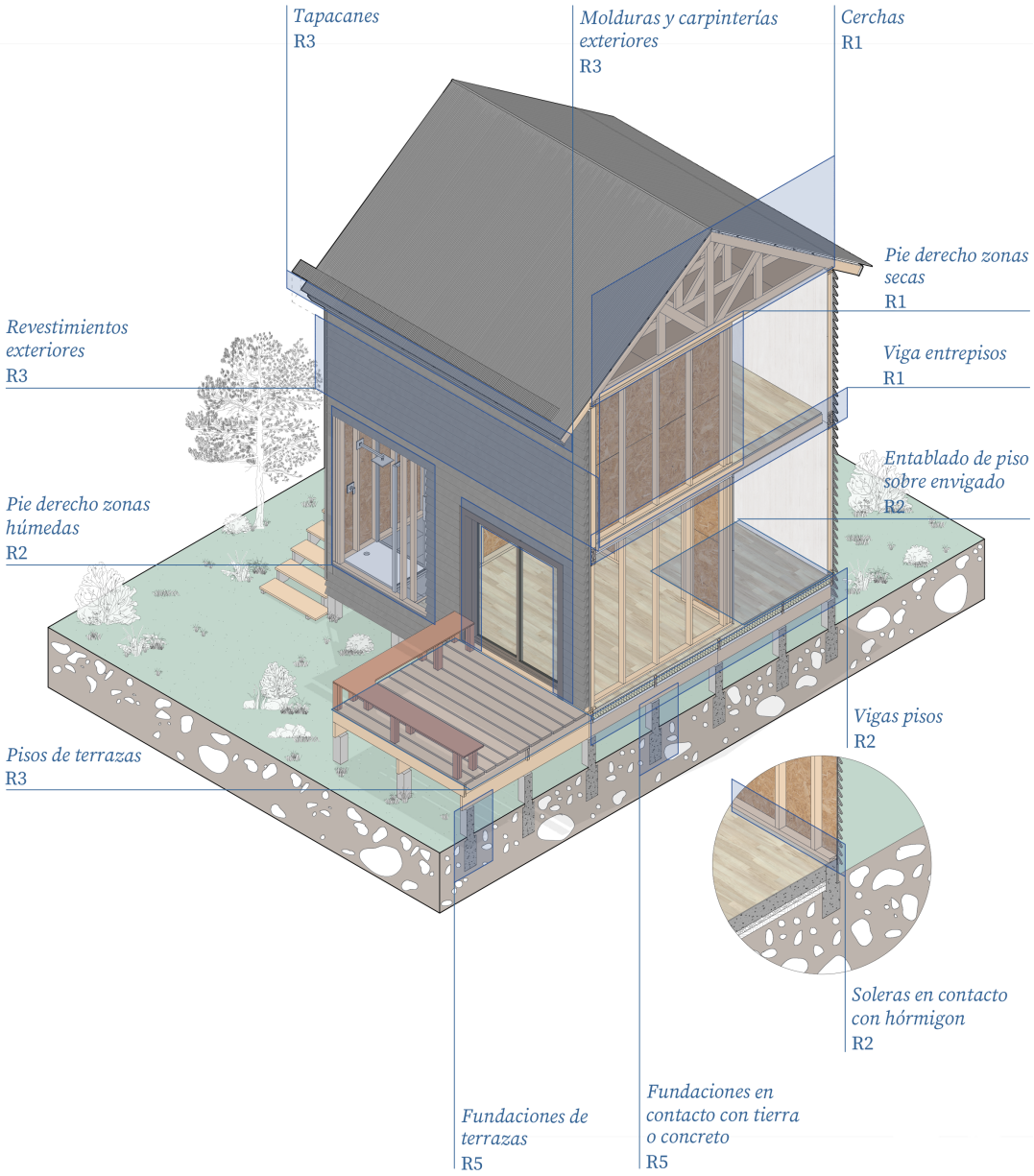


Figura 6.4 – Elementos que deben ser preservados

Posteriormente, ya habiendo determinado la categoría de durabilidad, se deben aplicar las medidas correspondientes dependiendo de dicha categoría. Para la categoría de mayor durabilidad ("Muy durable"), se podría no realizar un tratamiento preservante; para las categorías intermedias, debe tratarse con productos protectores, según la condición de servicio y el agente de biodeterioro específico; y, por último, como lo indica el artículo 5.6.8 de la OGUC, se establece que, al asignar la última categoría de durabilidad, "No durable", la madera debe haber sido preservada conforme a lo indicado en la norma NCh819.

Esta norma define el tipo de proceso al que deben someterse las piezas o productos de madera, como en el caso del pino radiata, entre otras especies. En sus alcances y campos de aplicación, esta norma indica:

> *"1.2 Esta norma se aplica para la preservación de madera de pino radiata y de otras especies, coníferas o latifoliadas, mediante procesos de impregnación industrial."*

Por lo tanto, es obligatorio aplicar un tratamiento preservante a los productos o piezas de un elemento de madera que se encuentren en categoría "No durable" mediante un proceso de impregnación industrial. Dicho tratamiento preservante tiene como finalidad contrarrestar su condición de "No durable", mediante el cumplimiento de las exigencias normativas del tratamiento preservante, asegurando que la pieza o los productos de madera tratados alcancen el desempeño en servicio esperado.

Cabe mencionar que, aunque una especie maderera se clasifique como "No durable" y, por lo tanto, deba someterse a un proceso de impregnación industrial, algunas especies, debido a su morfología celular y otras características intrínsecas, no poseen la impregnabilidad suficiente para cumplir con las exigencias establecidas para el tratamiento preservante.

6.3.1 Requisitos de humedad para la madera en servicio

El contenido de humedad de la madera en servicio tiene una incidencia doble: determina las condiciones que habilitan la proliferación de los agentes de deterioro clasificados en la Tabla 14 y cómo afecta el desempeño estructural y dimensional de los elementos. Por ello, la normativa exige controlar dos parámetros: el contenido de humedad de la madera y la humedad relativa del aire en el entorno de servicio.

Cabe precisar que el vapor de agua presente en el aire no eleva por sí solo el contenido de humedad de la madera hasta niveles críticos. El mayor riesgo se presenta cuando ese vapor condensa—ya sea por condensación intersticial al interior de la envolvente o de manera superficial — y permanece en contacto con el material durante un período prolongado. Por otro lado, desde el punto de vista estructural, las variaciones de contenido de humedad generan ciclos de hinchamiento y contracción que inducen tensiones internas en las piezas y comprometen la integridad de las uniones.

Cuando Cuando una pieza de madera es puesta en servicio, tiende a alcanzar un contenido de humedad denominado **humedad de equilibrio higroscópico (HEH)**, que corresponde al contenido de humedad que la madera adquiere para una determinada combinación de condiciones higrotérmicas (temperatura y humedad relativa), producto del intercambio de vapor de agua con la atmósfera que la rodea (Figura 6.5). Por esta razón, se requiere que la madera y sus productos derivados sean secados previamente a su instalación en obra, hasta alcanzar un contenido de humedad cercano al HEH previsto para el lugar donde prestarán servicio, con el fin de limitar las deformaciones higroscópicas posteriores a la instalación y reducir el riesgo de germinación y desarrollo de hongos de pudrición.

La OGUC establece los rangos de contenido de humedad en que deben servir los elementos de madera —estructurales o de terminación— en función de la zona climático-habitacional donde se emplaza la edificación. En el Artículo 5.6.8, Título 5 "De la Construcción", Capítulo 6 "Edificaciones de madera", se señala que los elementos de madera deben cumplir los límites establecidos en la Tabla 23, de acuerdo con la zona climático-habitacional definida en la NCh1079.

Complementariamente, la NCh1198 establece requerimientos específicos sobre el contenido de humedad de los elementos estructurales. Según su apartado 5.4, para maderas expuestas a la intemperie o a recintos cubiertos abiertos, la humedad de equilibrio debe corresponder a la establecida por región geográfica en el Anexo D de la NCh1198. Para elementos en condiciones de servicio al interior de edificaciones —recintos cubiertos cerrados con calefacción continua, intermitente o sin

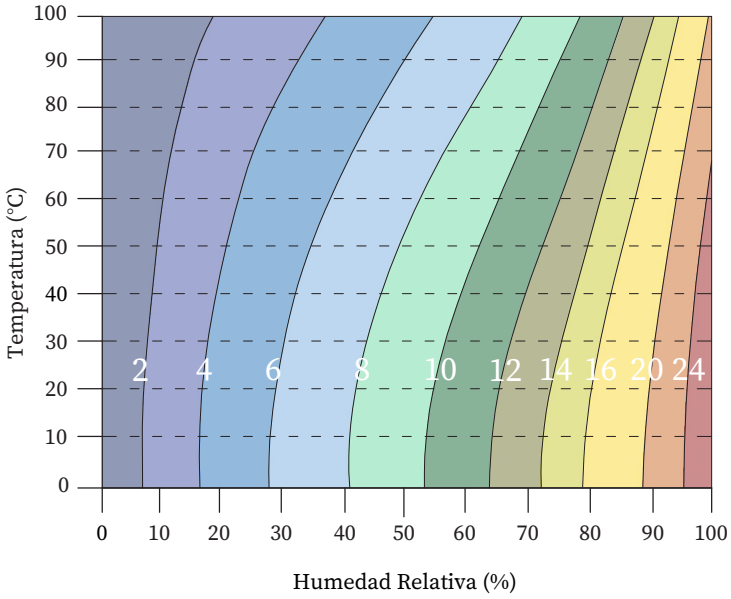


Figura 6.5 – Humedad en madera en servicio

calefacción— se establece un contenido de humedad máximo de 12%, y de 9% en recintos con calefacción continua, con una tolerancia de ±3% con el objetivo de aproximarse a la humedad de equilibrio del lugar geográfico en el que se ubica la edificación.

Las definiciones de condición de servicio establecidas en la NCh1198 operan como marco general de referencia, sin abarcar la totalidad de las situaciones de uso posibles. Para elementos con normativa de producto específica —como la madera laminada encolada, regida por la NCh2148 y la NCh2165— corresponde aplicar las condiciones de servicio definidas en esas normativas, de mayor alcance y precisión.

Los rangos establecidos por la OGUC y la NCh1198 definen las condiciones mínimas de contenido de humedad que debe cumplir la madera en servicio. Más allá de ese umbral normativo, el control efectivo de la humedad a lo largo de la vida útil depende de decisiones de diseño de la envolvente que inciden en cómo el edificio gestiona los flujos higrotérmicos, materia que se desarrolla en el Tomo III: Atlas de Detalles Constructivos para la Durabilidad en Madera.

TABLA 23– ZONA CLIMÁTICO-HABITACIONAL/ HUMEDAD PERMITIDA PARA ELEMENTOS DE MADERA (OGUC, 2024)

Zona climático-habitacional	Humedad permitida	
	Mínima%	Máxima %
Norte litoral	11	18
Norte desértica	5	9
Norte valle transversal	11	16
Central litoral	11	17
Central interior	9	20
Sur litoral	12	22
Sur interior	12	22
Sur extremo	11	22

NOTA:
- La NCh1079 define una novena zona climático-habitacional, la zona Andina, que no está contemplada en esta tabla de humedad permitida establecida por la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones.

07
Anexo

7.1 Anexo A - Especies arbóreas disponibles en Chile

El presente Anexo reúne el universo de 58 especies arbóreas analizadas en la elaboración de este manual, clasificadas según su origen y disponibilidad en el mercado nacional. El análisis contempló tres grupos: especies nativas de Chile, especies exóticas con producción forestal establecida en el país, y especies importadas que se comercializan en el mercado nacional sin producción local.

La selección de las 15 especies para las que se desarrollaron fichas de caracterización en el Capítulo 5 respondió a dos criterios principales: disponibilidad comercial en volúmenes que permitan su uso en proyectos de construcción, y aplicabilidad a elementos constructivos estructurales o de terminación. Se consideró además la representatividad del universo, incorporando tanto especies nativas como exóticas, coníferas y latifoliadas, de modo que las fichas reflejen la diversidad de opciones disponibles para el proyectista en el contexto nacional.

Las especies no seleccionadas corresponden a aquellas con disponibilidad limitada en el mercado, con restricciones de uso derivadas de su estado de conservación, o cuya aplicación en construcción es marginal respecto a las incluidas.

La tabla presenta, para cada especie, su origen, los usos constructivos identificados, la disponibilidad estimada en el mercado nacional y su estado de conservación según la clasificación vigente. Las especies con ficha de caracterización (√) se presentan en primer lugar.

Referencias de usos:

U: Uso estructural

C: Carpinterías (puertas, ventanas, molduras)

Re: Revestimiento exterior

Ri: Revestimiento interior

P: Pisos interiores

Pe: Pisos exteriores (decking)

M: Mueblería

Referencias de estado de conservación (IUCN / RCE):

LC: Preocupación menor

NT: Casi amenazada

VU: Vulnerable

EN: En peligro

CR: En peligro crítico

Sp: Sin peligro (especie exótica, no evaluada bajo RCE)

—: Sin datos

| ESPECIES SELECCIONADAS PARA FICHA DE CARACTERIZACIÓN

Nombre común	Nombre científico	Origen	Usos	Disponibilidad mercado	Estado conservación	Ficha
Pino radiata (pino insigne)	Pinus radiata	Exótico	U / C / Re / Ri / P / Pe / M	Media	Sp	✓ pg. XX
Eucalipto globulus	Eucalyptus globulus	Exótico	U / C / Re / Ri / P / Pe / M	Alta	Sp	✓ pg. XX
Eucalipto nitens	Eucalyptus nitens	Exótico	U / Re / Ri / P / Pe / M	Muy baja	Sp	✓ pg. XX
Pino oregón	Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco	Exótico	U / C / Re / Ri / P / M	Muy alta	Sp	✓ pg. XX
Álamo	Populus spp	Exótico	C / Ri / P / M	Baja	Sp	✓ pg. XX
Eucalipto regnans	Eucalyptus regnans F. Muell.	Exótico	U / Re / Ri / P / Pe / M	Alta	Sp	✓ pg. XX
Pino ponderosa	Pinus ponderosa Douglas ex C. Lawson	Exótico	C / Ri / M	Alta	Sp	✓ pg. XX
Coihue	Nothofagus dombeyi	Nativo	U / Re / Ri / P / M	Alta	LC	✓ pg. XX
Roble (Pellin)	Nothofagus obliqua	Nativo	U / Re / Ri / P / Pe / M	Media	LC	✓ pg. XX
Raulí	Nothofagus alpina	Nativo	C / Ri / P / M	Muy alta	LC	✓ pg. XX
Lenga	Nothofagus pumilio	Nativo	C / Ri / P / M	Alta	LC	✓ pg. XX
Tepa	Laureliopsis philippiana	Nativo	Ri / M	Alta	LC	✓ pg. XX
Laurel	Laurelia sempervirens	Nativo	Ri / M	Alta	LC	✓ pg. XX
Mañío	Saxegothaea conspicua	Nativo	Re / Ri / M	Alta	LC	✓ pg. XX
Alerce	Fitzroya cupressoides	Nativo	Re / Ri / P / Pe / M	Alta	EN	✓ pg. XX

| ESPECIES DISPONIBLES EN CHILE NO SELECCIONADAS

Nombre común	Nombre científico	Origen	Usos	Disponibilidad mercado	Estado conservación	Ficha
Ciprés macrocarpa	Cupressus macrocarpa Hartw.	Exótico	C / Re / Ri / M	Baja	Sp	-
Ciprés de la cordillera, Cedro	Austrocedrus chilensis (NCH1198)	Nativo	C / Re / Ri / M	Baja	VU (XV-VI); NT (VII-XII)	-
Ulmo	Eucryphia cordifolia	Nativo	U / Re / Ri / P / M	Muy baja	LC	-
Tineo	Weinmannia thrischosperma	Nativo	Ri / M	Muy baja	LC	-
Ciprés de las Guaitecas	Pilgerodendron uvifera	Nativo	C / Re / Ri / M	No Disponible	LC	-
Canelo	Drimys winteri FORST	Nativo	Ri / M	No Disponible	EN (XV-VI); LC (VII-XII)	-
Avellano	Gevuina avellana	Nativo	Ri / M	Muy baja	LC	-
Lingue	Persea lingue	Nativo	C / Ri / P / M	Media	VU (XV-VI); LC (VII-XII)	-
Olivillo	Aextoxicon punctatum	Nativo	Ri / P / M	Muy baja	EN (XV-VI); LC (VII-XII) (4)	-
Roble del Maule	Nothofagus glauca	Nativo	U / Re / Ri / P / M	Muy baja	NT	-
Coigüe de Chiloé	Nothofagus nítida	Nativo	U / Re / Ri / P / M	Muy baja	LC	-
Coigüe de Magallanes	Nothofagus betuloides	Nativo	U / Re / Ri / P / M	Muy baja	LC	-
Aromo del país	Acacia dealbata	Exótico	Re / Pe	Baja	Sp	-
Mañío hojas punzantes	Podocarpus nubigenus	Nativo	Re / Ri / M	Muy baja	LC	-
Algarrobo	Prosopis chilensis	Nativo	P / Pe / M	No Disponible	VU	-
Ciruelillo. Notro. Fosforito	Embothrium coccineum	Nativo	Ri / M	Muy baja	LC	-
Peumo	Cryptocarya alba	Nativo	Ri / M	No Disponible	LC	-
Arrayán	Luma apiculata	Nativo	Ri / M	No Disponible	LC	-

| ESPECIES IMPORTADAS

Nombre común	Nombre científico	Origen	Usos	Disponibilidad mercado	Estado conservación	Ficha
Cedro	Cedrela odorata	Importado	C / Ri / M	Alta	-	-
Okume / Mara Clara	Aucoumea klaineana	Importado	C / Ri / M	Media	-	-
Mara Macho	Cedrelinga catenaeformis	Importado	C / Ri / M	Muy baja	-	-
Mara o Caoba	Swietenia macrophylla	Importado	C / Ri / P / M	Baja	-	-
Abeto Douglas	Pseudotsuga menziesii	Importado	U / C / Ri / M	Baja	-	-
Roble Americano	Quercus alba	Importado	Ri / P / M	Alta	-	-
Jequitiba	Cariniana legalis	Importado	Ri / P / M	Baja	-	-
Nogal	Juglans regia	Importado	Ri / P / M	Muy baja	-	-
Castaño	Castanea sativa	Importado	C / Ri / P / M	Alta	-	-
Fresno Europeo (incluye el Frances)	Fraxinus excelsior	Importado	U / C / Ri / P / M	Alta	-	-
Cumala	Virola surinamensis	Importado	C / Ri / M	Baja	-	-
Sequoia	Sequoia sempervirens	Importado	C / Re / Ri / M	Baja	-	-
larix o Alerce Europeo	Larix decidua	Importado	U / C / Re / Ri / P / Pe / M	Muy baja	-	-
Aromo Australiano	Acacia melanoxylon	Importado	C / Ri / M	Muy baja	-	-
Encina	Quercus ilex	Importado	U / P / Pe / M	Alta	-	-
Ciprés	Cupressus sempervirens	Importado	C / Re / Ri / M	Media	-	-
Marupa	Simarouba amara	Importado	C / Ri / M	Muy baja	-	-
Tilo	Tilia cordata	Importado	C / Ri / M	Muy baja	-	-
Roble Rojo	Quercus rubra	Importado	C / Ri / P / M	Muy baja	-	-
Arce blando	Acer saccharinum	Importado	C / Ri / P / M	Muy baja	-	-
Haya Rosada	Fagus sylvatica	Importado	Ri / P / M	Baja	-	-
Nogal Americano	Juglans nigra	Importado	Ri / P / M	Muy baja	-	-
Abedul	Betula pendula	Importado	U / C / Ri / M	Muy baja	-	-
Khaya	Khaya anthotheca	Importado	U / C / Ri / P / M	Muy baja	-	-
Teca	Tectona grandis	Importado	Re / P / Pe / M	Muy baja	-	-

Referencias

Capítulo 3

Aloni, R. (2021). *Vascular differentiation and plant hormones*. Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-030-53202-4_3

Archer, K.; Lebow, S. (2006). Chapter 9: *Wood preservation. In: Primary wood processing: principles and practice* (Walker, C. F. Editor). 2nd Edition. Springer.

Barnett, J.R.; Bonham, V. A. (2004). Cellulose microfibril angle in the cell wall of wood fibres. *Biol. Rev.* ,79, 461-472. https//doi.org/10.1017/S1464793103006377

Butto, V.; Deslauriers, A.; Rossi, S.; Rozenberg, P.; Shishov, V.; Morin, H. (2020). The role of plant hormones in tree-ring formation. *Trees*, 34, 315-335. https://doi.org/10.1007/s00468-019-01940-4

Chauhan, S.; Donnelly, R.; Huang, C-L.; Nakada, R.; Yafang, Y.; Walker, J. (2006). Chapter 5: Wood quality: In context. In: *Primary wood processing. Principles and practices* (Walker, C. F. Editor). 2nd Edition. Springer.

Clair, B.; Thibaut, B. (2014). Chapter 6: Physical and mechanical properties of reaction wood. In: *The biology of reaction wood* (Gardiner, B.; Barnett, J.; Saranpää, P.; Gril, J. Eds). Springer Series in Wood Science, Springer.

De Micco, V.; Balzano, A.; Wheeler, E. A.; Baas, P. (2016). Tyloses and gums: A review of structure, function and occurrence of vessel occlusions. *IAWA Journal*, 37(2), 186-205. https://doi.org/10.1163/22941932-20160130

Díaz-Vaz, J. E. (2003). *Anatomía de maderas*. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile.

Donaldson, L. A.; Singh, A. P. (2016). Reaction wood. In: *Secondary xylem biology*. Origins, functions, and applications (Kim, Y. S., Funada, R. & Singh, A. P. Eds). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802185-9.00006-1.

Esau, K. (2006). *Esau's plant anatomy.* (Evert, R. F. Editor). John Wiley & Sons,

Fernández, M. P.; Cornejo, B. (2016). Is the flowering event and corresponding maturity phase in trees related to radial wood density changes?. *Trees* 30, 859-870

Fernández, M. P.; Meléndez-Miguélez, M. (2016). How environmental variables are related to shoot and foliage development and wood ring formation: an integrated analysis for functional-structural modeling purposes. In: *Proceeding of the World Conference on Timber Engineering 2026*, August 22-25 2016, Vienna, Austria.

Guindos, P. (2019). *Fundamentos del Diseño y la Construcción con Madera.*

Forest Products Laboratory (2021). *Wood Handbook – wood as engineering material*. General Technical Report FPL-GTR-282. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 543 p.

Jozsa, L.A.; Middleton, G. R. (1994). *A discussion of wood quality attributes and their practical implications.* Special Publicaction No. SP-34. Forintek Canada Corp., Vancouver.

Guerriero G., Sergeant K., Hausman J. F. (2014). Wood biosynthesis and typologies: a molecular rhapsody. *Tree Physiology,* 34, 839-855

Haygreen, J. G.; Bowyer, J. L. (1996). *Forest products and wood science. An introduction.* (3rd Edition). Iowa State University Press / AMES.

IAWA Committee (1989). IAWA list of microscopic features for hardwood identification. Wheeler, E. A.; Baas, P.; Gasson, P. E. (Eds). *IAWA Bulletin* n.s. 10(3), 2019-332.

IAWA Committee (2004). IAWA list of microscopic features for softwood identification. Richter, H.G.; Grosser, D.; heinz, I.; Gasson, P. E. (Eds.) *IAWA Journal,* 25(1), 1-70

Kumar M., Campbell L., Turner S. (2015). Secondary cell walls: biosynthesis and manipulation. *J Exp Bot* 67:515–531

Larson, P. R. (1994). *The vascular cambium: development and structure*. Springer Series in Wood Science. Springer.

Larson, P.R., Kretschmann, D.E., Clark, A. III, and Isenbrands, J.G. (2001). *Formation and properties of juvenile wood in Southern pines: A Synopsis.* USDA General Technical Report FPL-GTR–129. U.S. Government Printing Office, Washington, DC.

Lebow, S. (2010). Chapter 15: Wood Preservation. In: Wood Handbook: *Wood as an engineering material.* USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL- GTR-190

Mäkelä, A. (2002). Derivation of stem taper from the pipe theory in a carbon balance framework. *Tree Physiology* 22, 891–905

Martín, J.A.; López, R. (2023). Biological deterioration and natural durability of wood in Europe. *Forests*, 14, 283. **https://doi.org/ 10.3390/f14020283**

Maclean, J. D. (1953). Preservative treatment of wood by pressure methods. Washington: U. S. Govt. Print. Off.j

Niklas, K. J.; Spatz, H. C. (2012). *Plant physics.* University of Chicago Press.

Novák O, Napier R, Ljung K (2017) Zooming in on plant hormone analysis: tissue-and cell-specific approaches. Annu. Rev. Plant. Biol. 68, 323–348

Panshin A.J., De Zeeuw C. (1980). *Textbook of wood technology: structure, identification, properties, and uses of the commercial woods of the United States and Canada*. 4th ed. New York McGraw-Hill. 722 pp.

Richter, C. (2015). *Wood characteristics. Description, causes, prevention, impact on use and technological adaptation*. Springer.

Ross, R. J.; Anderson, J. R. (2021). *Wood handbook. Wood as an engineering material.* USDA Forest Products Lab. Gen. Tech. Report. FPL-GTR-282.

Ruel, K.; Chevalier-Billosta, V.; Guillemin, F.; Berrio Sierra, J.; Joseleau, J-P. (2006). The wood cell wall at the ultrastructural scale – formation and topochemical organization. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 8(2), 107-116

Schweingruber, F. H.; Börner, A.; Schulze, E-D. (2011). *Atlas of stem anatomy in herbs, shrubs and trees*. Springer.

Shinozaki, K.; Yoda, K.; Hozumi, K.; Kira, T. (1964). A quantitative analysis of plant form – the Pipe Model Theory. *Japanese Journal of Ecology* 14(3), 97-105

Shulsky, R.; Jones, P. D. (2019). *Forest products and wood science: an introduction*. Seventh edition. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, Inc.

Schmitt, U.; Koch, G.; Hietz, P.; Tholen, D. (2023). Chapter 3: Wood biology. In: *Springer Handbook of Wood Science and Technology.* Niemz,P.; Teischinger, A.; Sandberg, D. (Eds.). Springer.

Siau, J. F. (1984) *Transport processes in wood.* New York: Springer-Verlag. ISBN 0387125744

Sjöström, E. (1993). *Wood chemistry: Fundamentals and applications* (2nd ed.). Academic Press. **https://doi.org/10.1016/C2009-0-03289-9**

Sponsel, V.M., Hedden, P. (2010). Gibberellin Biosynthesis and Inactivation. In: Davies, P.J. (eds) *Plant Hormones.* Springer, Dordrecht. **https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2686-7_4**

Tabet, T. A.; Aziz, F. A. (2013). Chapter 5: Cellulose microfibril angle in wood and its dynamic mechanical significance. En: *Cellulose - Fundamental aspects.* Van de Ven, T. G. y Godbout, L. (Eds). IntechOpen. **https//dx.doi.org/10.5772/51105**

USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory, & General Technical Report FPL-GTR-190. (2010). *Wood Handbook, Wood as an Engineering Material*. **www.fpl.fs.fed.us.**

Wagemann, G. (1949). Maderas chilenas. Contribución a su anatomía e identificación. *Lilloa XVI*, 263-375.

Walker, J. C. F. (2006). *Primary wood processing. Principles and practices*. 2nd Edition. Dordrecht, The Netherlands: Springer, c2006. ISBN 1402043929.

Werner, T.; Schmülling, T. (2009). Cytokinin action in plant development. *Current Opinion in Plant Biology* 12, 527-538

Young, T., Lebow, P., Lebow, S., Taylor, A. (2019). SPC Wood Handbook for the Treated Wood Industries. Knoxville, TN: University of Tennessee Institute of Agriculture, Center for Renewable Carbon. 78 p.

Zobel, B. J.; van Buijtenen, J. P. (1989). Wood variation. Its causes and control. Springer Series in Wood Science. Springer.

Capítulo 4

Arango, R. A., Schoville, S. D., Currie, C. R., & Carlos-Shanley, C. (2021). Experimental Warming Reduces Survival, Cold Tolerance, and Gut Prokaryotic Diversity of the Eastern Subterranean Termite, Reticulitermes flavipes (Kollar). *Frontiers in Microbiology*, 12. **https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.632715**

Bagheri, S., Alinejad, M., Ohno, K., Hasburgh, L., Arango, R., & Nejad, M. (2022). Improving durability of cross laminated timber (CLT) with borate treatment. *Journal of Wood Science*, 68(1). **https://doi.org/10.1186/s10086-022-02041-6**

Forest Products Laboratory. (2021). *Wood Handbook- Wood as an Engineering Material*.

Galleguillos, F. (2016). *Hongos asociados a escarabajos lignícolas en bosque de Nothofagus: su aplicación en control biológico de Ophiostoma y en spalting*.

Goodell, B., Nicholas, D. D., & Schultz, T. P. (2003). *Introduction to Wood Deterioration and Preservation*. **https://pubs.acs.org/sharingguidelines**

Klepzigl, K. D., & Six, D. L. (2004). Bark Beetle-Fungal Symbiosis: Context Dependency in Complex Associations. In Symbiosis (Vol. 37).

Lebow, S. T., Tang, J. D., Kirker, G. T., & Mankowski, M. E. (2019). *Guidelines for Selection and Use of Pressure-Treated Wood*. **www.fpl.fs.fed.us.**

Morris, P. (2001). *WOOD BIODETERIORATION: Causes, Processes, Prevention and Remediation.*

Morris, P. I. (n.d.). *Understanding Biodeterioration of Wood in Structures.*

Ortiz, D. (2014). *Aislación e identificación de hongos de pudrición de maderas de alta durabilidad natural utilizadas en viviendas de la comuna de Achao, Chiloé.*

Ortiz, R., Moreno, L., Ramirez, R., & Olivero, P. (2011). *Determinación de los modelos de biodeterioro en elementos de madera producidos por hongos de pudrición en edifi caciones de la zona de conservación histórica de Valparaíso, Chile.*

Sofiaturizkiyah, N., & Priadi, T. (2023). The Blue Stain Attack and Its Effect on The Mechanical Properties of Five Light-Colour Woods. *BIO Web of Conferences*, 77. **https://doi.org/10.1051/bioconf/20237701007**

Tascioglu, C., Goodell, B., & Lopez-Anido, R. (2003). Bond durability characterization of preservative treated wood and E-glass/phenolic composite interfaces. *Composites Science and Technology,* 63(7), 979–991. **https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00013-7**

Touza, M. (2013). *Guía de la Madera. Capítulo 2: Durabilidad. Documento de Aplicación del CTE.* **www.confemadera.es**

Treu, A., Zimmer, K., Brischke, C., Larnøy, E., Gobakken, L. R., Aloui, F., Cragg, S. M., Flaete, P.-O., Humar, M., Westin, M., Borges, L., & Williams, J. (2019). Timber in marine environments. In *BioResources* (Vol. 14, Number 4).

Listado de figuras

Figura 3.1 – Altura de algunas coníferas (elaboración propia en base a (García y Ormazabal, 2008)) 17

Figura 3.2 – Anillos de crecimiento (elaboración en base a (Panshin y de Zeeuw,1980)). 18

Figura 3.3 – Tipos de trozas y corte transversal, radial y longitudinal (elaboración en base a (Panshin y de Zeeuw,1980)). 19

Figura 3.4 – Tejidos de la madera (elaboración propia). 20

Figura 3.5 – Microanatomía de la madera de coníferas (elaboración propia) 21

Figura 3.6– Esquema tipos de células de coníferas (elaboración propia) 23

Figura 3.7 – Microanatomía de la madera de latifoliadas (elaboración propia) 25

Figura 3.8 – Esquema tipos de células de latifoliadas (elaboración propia) 26

Figura 3.9 – Punteaduras (elaboración en base a (elaboración en base a (Panshin y de Zeeuw,1980) y (Angyalossy et al., 1989)). 27

Figura 3.10 – Placas de perforación (elaboración en base a (elaboración en base a (Panshin y de Zeeuw,1980) y (Angyalossy et al., 1989)). 28

Figura 3.11– La celulosa en la pared celular (elaboración propia). 29

Figura 3.12 – Composición de capas de la pared celular (elaboración propia). 30

Figura 3.13– Crecimiento primario y secundario (elaboración propia). 31

Figura 3.14 – Gráfico de crecimiento de Pinus radiata en años, altura y diámetro del tronco (elaboración en base a (Mäkelä, 2002)). 32

Figura 3.15 – División periclinal y división anticlinal (elaboración propia) 33

Figura 3.16 – Secuencia de formación de células madre desde el cambium vascular (elaboración propia) 34

Figura 3.17 – Madera tardía y madera temprana (elaboración propia) 37

Figura 3.18 – Madera juvenil y madera madura (elaboración propia) 38

Figura 3.19 – Representación esquemática de la síntesis de la pared celular durante el desarrollo celular (elaboración propia) 39

Figura 3.20 – Duramen espino (fotografía de María Paulina Fernández) 41

Figura 3.21 – Rodela de árbol creciendo libremente y bajo alta densidad de rodal (elaboración propia) 43

Figura 3.22 – Densidad seca de distintas especies arbóreas (elaboración propia) 44

Figura 3.23 – Humedad de equilibrio higroscópico (HEH) en función de la humedad relativa y la temperatura (elaboración propia en base a (Forest Products Laboratory, 2021)) 45

Figura 3.24 – Regiones exteriores de la madera se secan más que aquellas zonas interiores conformando un gradiente de humedad (elaboración en base a (Panshin y de Zeeuw,1980)). 45

Figura 3.25 – Isoterma de sorción de la madera: curvas de absorción y desorción muestran el fenómeno de histéresis (elaboración en base a (Forest Products Laboratory, 2021)). 45

Figura 3.26 – Cambios dimensionales de la madera según el eje de medición: longitudinal, radial y tangencial (elaboración en base a (Panshin y de Zeeuw,1980)). 46

Figura 3.27 – Deformaciones diferenciales características en piezas de madera aserrada durante el secado (elaboración en base a (Guindos,2019)). 46

Figura 3.28 – Comportamiento estructural según la dirección de las fuerzas (elaboración en base a (Guindos,2019)). 47

Figura 4.1 – Esquema factores de deterioro (elaboración propia) 51

Figura 4.2 – Condiciones de humedad necesarias para el desarrollo de los procesos de deterioro mediados por hongos (elaboración en base a (Build in Wood,2005) y (Guindos,2019)) 53

Figura 4.3 – Organismos xilófagos (elaboración propia) 55

Figura 4.4 – Ataque de hongos cromógenos en trozas de madera (fotografías de María Paulina Fernández) 57

Figura 4.5– Tipos de pudrición en raulí (fotografía de Priscila Moraga) 59

Figura 4.6 – Ataque de *Serpula lacrymans* (fotografía de Richard Konrad) *60*

Figura 4.7 – Insectos de ciclo larvario (*Polycan chilensis*) (elaboración con fotografías de Priscila Moraga) 61

Figura 4.8 – Termita subterránea Reticulermes flavipes (fotografías de Priscila Moraga) *62*

Figura 4.9 – Esquema de colonia subterránea y tubos de barro (elaboración propia) 63

Figura 4.10 – Representación del ciclo de vida de insectos xilófagos de ciclo larvario y su ataque (elaboración propia con ilustraciones de ciclo de vida del insecto de Catalina Bello) *64*

Figura 4.11 – Agentes de deterioro de la cadena de valor de la madera (elaboración propia) 66

Figura 5.1 – Tamaño de los productos de madera (elaboración en base a Structural Timber Association UK) 87

Figura 5.2 – Universo de productos en el mercado de madera(elaboración en base a Structural Timber Association UK) 88

Figura 6.1 – Niveles de riesgo (elaboración propia) 101

Figura 6.2 – Diagrama de flujo para la asignación de nivel de riesgo (elaboración propia) 106

Figura 6.3 – Diagrama de flujo requerimientos normativos (elaboración propia) 109

Figura 6.4 – Elementos que deben ser preservados (elaboración en base a Anexo A NCh819) 111

Figura 6.5 – Humedad en madera en servicio (elaboración en base a (Forest Products Laboratory, 2021)). 113

Listado de fichas

Ficha 01 - Pino radiata (elaboración propia en base a (Hernández y Pinilla, 2010)) 72
Ficha 02 - Eucalipto globulus (elaboración propia en base a (Hernández y Pinilla, 2010)) 73
Ficha 03 -Eucalipto nitens (elaboración propia en base a (Hernández y Pinilla, 2010)) 74
Ficha 04 - Pino oregón (elaboración propia en base a (Hernández y Pinilla, 2010)) 75
Ficha 05 – Alamo (elaboración propia en base a (Hernández y Pinilla, 2010)) 76
Ficha 06 - Eucalipto regans (elaboración propia en base a (Hernández y Pinilla, 2010)) 77
Ficha 07 - Pino ponderosa (elaboración propia en base a (Hernández y Pinilla, 2010)) 78
Ficha 08 – Coihue (elaboración propia en base a (García y Ormazabal, 2008)) 79
Ficha 09 – Roble (elaboración propia en base a (García y Ormazabal, 2008)) 80
Ficha 10 – Raulí (elaboración propia en base a (García y Ormazabal, 2008)) 81
Ficha 11 – Lenga (elaboración propia en base a (García y Ormazabal, 2008)) 82
Ficha 12 – Tepa (elaboración propia en base a (García y Ormazabal, 2008)) 83
Ficha 13 – Laurel (elaboración propia en base a (García y Ormazabal, 2008)) 84
Ficha 14 – Mañio de hojas cortas (elaboración propia en base a (García y Ormazabal, 2008)) 85
Ficha 15 – Alerce (elaboración propia en base a (García y Ormazabal, 2008)) 86
Ficha 16 - Fustes - Polines- Madera Aserrada (elaboración propia) 89
Ficha 17 - MME -MLE -CLT (elaboración propia) 90
Ficha 18 - DLT-NLT (elaboración propia) 91
Ficha 19 - LVL-Terciado-MPP (elaboración propia) 92
Ficha 20 - Vigas I-joist -TCC (elaboración propia) 93
Ficha 21 - PSL-LSL (elaboración propia) 94
Ficha 22 - OSL-OSB (elaboración propia) 95
Ficha 23 - HDF-MDF-LDF (elaboración propia) 96
Ficha 24 - Tablero de partículas (elaboración propia) 97
Ficha 25 - WPC-Yeso cartón (elaboración propia) 98

Listado de tablas

Tabla 1 – Diferencia entre pieza , producto y elemento de madera (elaboración propia)..... 15

Tabla 2 – Sistemas de células según orientación (elaboración propia)..... 20

Tabla 3 – Tipos de células del xilema de coníferas (elaboración propia) 22

Tabla 4 – Tipos de células del xilema de latifoliadas (elaboración propia) 24

Tabla 5 – Compuestos químicos en la pared celular (elaboración propia)..... 29

Tabla 6 – Hormonas de crecimiento de la madera (elaborado en base a (Butto et al., 2020; Aloni, 2021)). 36

Tabla 7 – Tipos de densidad y la relación con el contenido de humedad (CH, %) (elaboración propia)..... 42

Tabla 8 - Singularidades en la madera (elaboración en base a (Guindos, 2019)). 48

Tabla 9 -Energía requerida para construcción de madera, concreto y acero (elaborada en base a (Morrel, 2011) y (Kunniger y Richter, 1985)). 52

Tabla 10 – Hongos cromógenos y mohos (elaborada en base a (Touza,2013)). 57

Tabla 11 – Hongos de pudrición (elaborada en base a (Touza,2013)). 59

Tabla 12 - Tabla comparativa de mohos, hongos cromógenos y de pudrición (elaboración propia). 61

Tabla 13 – Clasificación de tipos de insectos xilófagos (elaborada en base a (Touza,2013))..... 64

Tabla 14 – Clasificación de insectos xilófagos según orden y familia (elaborada en base a (Rojas y Gallardo, 2005)). 65

Tabla 15 – Xilófagos marinos (elaboración en base a NCh789/1)..... 67

Tabla 16 – Tipos de humedad (elaboración en base a (HILAM ARAUCO,2025))..... 68

Tabla 17 - Equivalencia entre nivel de riesgo, condición de servicio y clase de uso (elaboración en base a NCh819:2019, NCh2165:2023 y UNE-EN335:2013). 101

Tabla 18 – Estructura para definir la condición de uso (elaboración propia). 102

Tabla 19 – Parámetros para definir la condición de uso (elaboración en base a NCh819). 103

Tabla 20 - Descripción de los niveles de riesgo (elaboración en base a NCh819:2019, NCh2148:2013, prEN1995-1-1:2023 y UNE-EN335:2013). 104

Tabla 21 - Categoría de durabilidad según hongos de pudrición (elaboración en base a NCh789/1). 107

Tabla 22 - Categoría de durabilidad según termita subterránea (elaboración en base a NCh789/1)..... 108

Tabla 23– Zona Climático-Habitacional/ Humedad permitida para elementos de madera (elaboración en base a Artículo 5.6.8 de la OGUC y NCh1079). 113

Centro UC de Innovación en Madera

Centro Nacional CENAMAD para la Industria de la Madera

Vicente López, Josefina Marambio,
María Paulina Fernández, Priscila Moraga

Durabilidad natural de la madera: Propiedades, clasificación y evaluación del riesgo

Tomo I

