



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
Programa de Magíster en Ciencias Forestales

**EFFECTO DE TEMPERATURA Y PLUVIOSIDAD EN LA FORMACIÓN Y
PROPORCIÓN DE MADERA TEMPRANA Y TARDÍA DE *Pinus radiata* D.
DON, Y SU EFECTO EN LA DENSIDAD BÁSICA DE LA MADERA.**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de
Concepción para optar al grado de Magíster en Ciencias Forestales

POR: Diego Bastián Torres Órdenes

Profesor Guía: PhD. Rosa Alzamora Mallea (UdeC)
Profesor Co-Guía: Dr. Manuel Fernández (UHU)
Evaluadores: Dr. Juan Pedro Elissetche (UdeC)
PhD. Miguel Pereira (UdeC)
Mg. Cesar Farias (Externo)

Abril, 2025

Concepción, Chile

© 2025

DIEGO BÁSTIAN TORRES ÓRDENES

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

**EFFECTO DE TEMPERATURA Y PLUVIOSIDAD EN LA FORMACIÓN Y
PROPORCIÓN DE MADERA TEMPRANA Y TARDÍA DE *Pinus radiata* D.
DON, Y SU EFECTO EN LA DENSIDAD BÁSICA DE LA MADERA.**

Comisión evaluadora:

Rosa Alzamora Mallea (Profesor Guía)
Ingeniero Forestal, PhD.

Manuel Fernández Martínez (Profesor co-guía)
Ingeniero de Montes, Dr.

Juan Pedro Elissetche (Comisión evaluadora)
Ingeniero Forestal, Dr.

Miguel Pereira (UdeC) (Comisión evaluadora)
Ingeniero Civil Químico, PhD.

Cesar Farías (Comisión evaluadora)
Ingeniero Forestal, Mg.

Director de Programa de Magíster.

Vicente Hernández Castillo
Ingeniero en Maderas, PhD.

Decano de la Facultad de Ciencias Forestales

Eugenio Sanfuentes VS.
Ingeniero Forestal, Dr..

AGRADECIMIENTOS.

Agradezco a mi Madre, Padre y hermana por el apoyo incondicional en esta etapa de mi vida, por sus palabras de aliento y cariño y por todo el esfuerzo que realizaron para que yo pudiera cumplir mis sueños, y que sepan que todo lo que he logrado es gracias a ustedes.

A mi pareja Gabriela, que ha sido un aporte constante en toda mi etapa universitaria, me ha apoyado en los momentos más difíciles y ha sido un pilar fundamental en mi vida, agradecido estaré siempre de ella.

A mis amigas, Paula, Nina, Belén, Pauli, Cata Og, y mi amigo José Tomás, por otorgarme una gran amistad y muy buenos momentos.

A mi profesora Rosa Alzamora, que fue mi mentora durante toda mi estadía en la facultad, siempre apoyándome y guiándome. La mejor profesora de la facultad, una de las pocas personas que se preocupa por los estudiantes y no ve solo las calificaciones, sino la calidad humana.

Al Profesor Juan Pedro Elissetche, que me incentivo en estudiar el mundo de la madera y fue un constante apoyo en estos últimos años, que a pesar de las diferencias que hemos tenido, siempre ha mostrado el profesionalismo que lo caracteriza.

A los profesores Luis Apiolaza y Elvis Gavilán por sus valiosos aportes en la elaboración de este documento.

A Pablo Mena por la facilitación de la información que fue la base de este documento.

Para todos ellos, Muchas gracias.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	viii
ABSTRACT	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Descripción de la anatomía de la madera de <i>P. radiata</i>	5
1.2. Densidad básica de <i>P. radiata</i>	11
1.3. El cambio climático y sus efectos en la productividad y la calidad de madera de <i>P. radiata</i> para fines estructurales	13
II. METODOLOGÍA.....	20
2.1. Materiales.....	20
2.2. Método.....	21
2.2.1. Preparación de las probetas.	22
2.2.2 Escaneo de muestras	24
2.2.3 Análisis de muestras.....	24
2.2.4. Análisis estadístico.	25
III. RESULTADOS	28
3.1. Relación Densidad Básica y Proporción de madera tardía del anillo.....	28
3.2. Relación Proporción de madera tardía del anillo y variables climáticas	29
IV. DISCUSIÓN	35
V. CONCLUSIONES	37
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Requerimientos ecológicos para el desarrollo de <i>P. radiata</i>	4
Tabla 2. Valores medios de las características anatómicas de <i>P. radiata</i>	10
Tabla 3. Correlación entre la proporción de madera tardía promedio por tarugo y variables de densidad de la madera.	29
Tabla 4. Correlación entre la proporción de madera tardía por anillo de crecimiento del año t <i>Prop_MTart</i> y variables de temperatura mínima y máxima de distintos periodos.	30
Tabla 5. Correlación entre la proporción de madera tardía por anillo de crecimiento del año t (<i>Prop_MTart</i>) y precipitaciones en distintos periodos.	31
Tabla 6. Modelos lineales mixtos para estimar la Proporción de madera tardía en el anillo de crecimiento del año t (<i>Prop_MTart</i>).	32

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Crecimiento secundario del árbol. Fuente: (Fajstavr <i>et al.</i> 2018).....	6
Figura 2. Detalle del tejido leñoso de una especie conífera (ej. <i>P. radiata</i>). Fuente: Modificado de Universidad Nacional del Nordeste citado por Escoto <i>et al.</i> (2017).....	7
Figura 3. Período de crecimiento de la madera temprana y tardía de una conífera (ej. <i>P. radiata</i> .) Fuente: Modificado de Fajstavr <i>et al.</i> (2018).....	9
Figura 4. Diferencia entre el espesor de la pared celular de la madera temprana (Izquierda) y tardía (Derecha). Fuente: Fernandez y Salvo (2003)	9
Figura 5. Comportamiento anatómico de un anillo de crecimiento. Fuente: Cuny <i>et al.</i> (2014), citado por Hartmann <i>et al.</i> (2017).	12
Figura 6. Distribución de los predios muestreados para efecto de obtención tarugos de incremento.....	20
Figura 7. Extracción del tarugo de incremento a la altura de pecho (DAP).....	22
Figura 8. Probetas de madera separada en tres secciones de interés.	23
Figura 9. Imagen ilustrando la identificación de la madera tardía en las muestras de un tarugo	24
Figura 10. Concepto básico del programa para conteo de anillos.	25

RESUMEN

Se desarrollaron modelos para explicar el efecto de la temperatura y la precipitación en la variabilidad de la proporción de madera tardía en los anillos de crecimiento de *Pinus radiata* (D.Don), y su consiguiente impacto en la densidad básica de la madera. Se muestrearon 13 plantaciones sin manejo en edad de cosecha, pertenecientes a Forestal Arauco y Constitución S.A., distribuidas desde la Región del Maule hasta la Región del Biobío. En cada plantación, se establecieron 3 parcelas de 400 m², seleccionando un árbol en cada una para la extracción de tarugos de 12 mm de diámetro a 1,3 m de altura. Se utilizaron modelos lineales mixtos para analizar la proporción de madera tardía en función de la temperatura y la precipitación. Los resultados indicaron una correlación positiva y significativa entre la proporción promedio de madera tardía y la densidad básica de la madera ($p < 0,05$). Además, la temperatura máxima del trimestre más frío y la edad de la plantación fueron las variables más significativas para explicar la variabilidad de la proporción de madera tardía. El mejor modelo logró un error cuadrático medio de 39,91% y explicó el 34% de la variabilidad total al considerar efectos fijos y aleatorios ($p < 0,1$).

ABSTRACT

Models were developed to explain the effect of temperature and precipitation on the variability of the proportion of latewood in the growth rings of *Pinus radiata* (D.Don), and its consequent impact on the basic density of the wood. Thirteen unmanaged plantations at harvest age, belonging to Forestal Arauco and Constitución S.A., were sampled, distributed from the Maule Region to the Biobío Region. In each plantation, 3 plots of 400 m² were established, selecting one tree in each for the extraction of 12 mm diameter cores at 1.3 m height. Mixed linear models were used to analyze the proportion of latewood as a function of temperature and precipitation. Results indicated a positive and significant correlation between the average proportion of latewood and the basic density of the wood ($p < 0.05$). Additionally, the maximum temperature of the coldest quarter and the age of the plantation were the most significant variables to explain the variability of the proportion of latewood. The best model achieved a mean squared error of 39.91% and explained 34% of the total variability by considering fixed and random effects.

I. INTRODUCCIÓN

La madera se considera un recurso renovable que se ha empleado para satisfacer las crecientes demandas de la sociedad. Este material, extraído de los bosques, se destaca por su carácter sostenible y su amigabilidad con el medio ambiente (Sotelo 1996, Walker 2006).

El crecimiento poblacional ha ocasionado un aumento exponencial en la demanda de recursos forestales (Contreras *et al.* 2005, Musálem 2006). Ejemplo de esto es el consumo de papel que, aunque muchas veces se pensó que iría en declive luego del surgimiento de la computación, logró permanecer como un elemento importante para el desarrollo de la población. No obstante su consumo está atado al nivel cultural y crecimiento de la sociedad (Area 2008). Esto último es por sobre todo reflejado en el consumo de madera aserrada, donde países como Austria, Canadá, Dinamarca, Finlandia, Islandia, Noruega y Suecia poseen una utilización per cápita mayor a 550 m³ por cada mil habitantes, comparada con Chile que presenta una utilización per cápita de 393 m³ por cada mil habitantes (Alvarez *et al.* 2021, Gysling *et al.* 2021).

Las plantaciones forestales son actualmente las mayores proveedoras de madera para la industria y la construcción, en donde aproximadamente un 40% de la demanda mundial se cubre a través de plantaciones. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), la superficie mundial de plantaciones forestales ha aumentado constantemente desde la década de 1960 y, en la actualidad, cubre más de 293 millones de hectáreas en todo el mundo (FAO 2020). Además, de la provisión de madera bajo una gestión sustentable, se reduce la dependencia de la tala de bosques naturales y la

explotación forestal ilegal de los mismos (Payn *et al.* 2015, Droppelmann *et al.* 2019).

Una plantación forestal es un ecosistema arbóreo creado mediante la introducción en el suelo de plántulas, semillas o una combinación de ambos, como parte de los procesos de forestación o reforestación (según la definición de Helms en 1998, citada por Carnus *et al.* (2006)). Según la FAO (1995), la plantación de árboles en una región con diversos objetivos constituye un acto de desarrollo y de sostenibilidad, y para lograrlo es necesario realizar planificación que englobe aspectos tales como la selección de especies, el emplazamiento de la plantación (considerando la propiedad, el clima, el agua, los suelos y la topografía), la calidad de las plantas y las técnicas de establecimiento, como por ejemplo, la eliminación de la vegetación competitiva, fertilización, entre otros.

En Chile las principales especies forestales utilizadas en nuestro país con fines productivos corresponden a *P. radiata*, *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens*, con una superficie total al año 2021 de 2.329.563 hectáreas, en donde principalmente *P. radiata* posee la mayor superficie con 1.266.576 hectáreas (Alvarez *et al.* 2023). Estas plantaciones forestales se han transformado en la base de la producción de diversos productos madereros entre ellos: madera aserrada, fibra, tableros y chapas, postes y polines, cajones, astillas, pellets entre otros (Büchner *et al.* 2021).

P. radiata corresponde a una especie nativa originaria de la costa central de California, Estados Unidos. Puede alcanzar una altura de 30 a 40 metros, con un tronco recto y cilíndrico con corteza rugosa de color marrón-rojizo que se vuelve

grisácea al transcurrir el tiempo, sus hojas son aciculares de color verde brillante y agrupadas en fascículos de tres (Hui-quan *et al.* 2003).

Su presencia en Chile se remonta a 1887, cuando un agricultor de la Región del Biobío importó semillas desde California y las plantó en el cerro Caracol. A lo largo del tiempo, debido a su gran valor comercial, especialmente por sus resinas, la especie se cultivó en otras regiones de Chile, como Lota, Chiguayante y zonas circundantes (Contesse 1986, Serra y Garay 1990).

En la década de 1940 comenzaron las plantaciones extensivas de *P. radiata*, y la mayoría de éstas se llevaron a cabo en la Cordillera de la Costa y en áreas del llano central con el objetivo de controlar la erosión, abarcando una amplia gama de condiciones topográficas, de suelo y climáticas (Contesse 1986, Toro y Gessel 1999). En los años sesenta, *P. radiata* se empezó a plantar con fines industriales. Pero el gran incremento en la utilización de esta especie fue en el año 1974 con la creación del Decreto N° 701 de promoción forestal, este subsidiaba el 75% relacionado con los gastos económicos de plantación, lo cual incentivó a los propietarios de tierras a plantar dicha especie (Toro y Gessel 1999).

La especie destacó por su alta plasticidad, su rápido crecimiento y la facilidad de manejo; además, su madera se usó en una amplia variedad de aplicaciones, lo que contribuyó a su éxito y popularidad (CORMA 1971). Aunque *P. radiata* es reconocido por su adaptabilidad a una amplia gama de climas, existen ciertos requisitos climáticos que favorecen su crecimiento (Tabla 1).

Tabla 1. Requerimientos ecológicos para el desarrollo de *P. radiata*.

Precipitación Anual	Temperatura mínima absoluta	Temperatura máxima absoluta	Temperatura media anual	Meses Secos
≥ 380 mm	-6°C	43°C	10 y 18°C	6 a 7
Humedad relativa anual	Textura del suelo	Drenaje del suelo	Reacción del suelo	Profundidad suelo
≥ 40%	Arenosa a Arcillosa	Bueno a Moderado	pH ≤ 7,4	≥ 25 cm

Fuente: Garcia *et al.* (2000).

La adaptabilidad de *P. radiata* a diferentes climas puede variar en función de las condiciones locales y las prácticas de manejo. Además, se ha observado que las diferentes variedades de dicha especie pueden mostrar adaptaciones específicas a distintos tipos de climas. Esto se evidencia en un estudio realizado por Espinoza *et al.* (2016), donde se reportaron diferencias en supervivencia, crecimiento y asignación de biomasa entre procedencias y generaciones de mejoramiento de *P. radiata* cuando se enfrentaron a condiciones de escasez de agua durante la etapa juvenil.

Actualmente, las plantaciones de *P. radiata* en Chile se extienden desde la Región de Valparaíso hasta la Región de Los Lagos, abarcando un rango geográfico que va desde los 33° hasta los 41° de latitud sur. Estas plantaciones concentran aproximadamente el 44% del patrimonio forestal en la Región del Biobío, con una superficie total de 633 mil hectáreas según datos del INFOR en 2022. En esta amplia distribución geográfica, prevalece un clima mediterráneo templado y húmedo, caracterizado por precipitaciones que varían entre 500 y 2.000 mm anuales, y con un periodo seco que puede extenderse hasta 8 meses.

Esta variabilidad climática, combinada con las características específicas del suelo en cada localidad, contribuye a generar una alta variabilidad espacial en la productividad de la especie.

1.1. Descripción de la anatomía de la madera de *P. radiata*.

En el caso de las gimnospermas como *P. radiata*, la formación de la madera (Figura 1) comienza con la división celular cambial (A), este se activa y comienza la actividad cambial, en donde se forman las primeras células del floema primario (B) y el agrandamiento de las células xilemáticas (C), posteriormente inicia el proceso de formación y maduración de la pared secundaria, en este momento aparecen las primeras traqueidas lignificadas (D), subsiguientemente se inicia el desarrollo de la lignificación de la pared celular y la formación de las células del floema tardío (E) y finalmente se comienza a formar el incremento radial anual del xilema y el floema (F), esto finaliza con la apoptosis de las células xilemáticas, esto con el propósito de que el lumen quede vacío para el proceso de transporte de agua (Walker 2006).

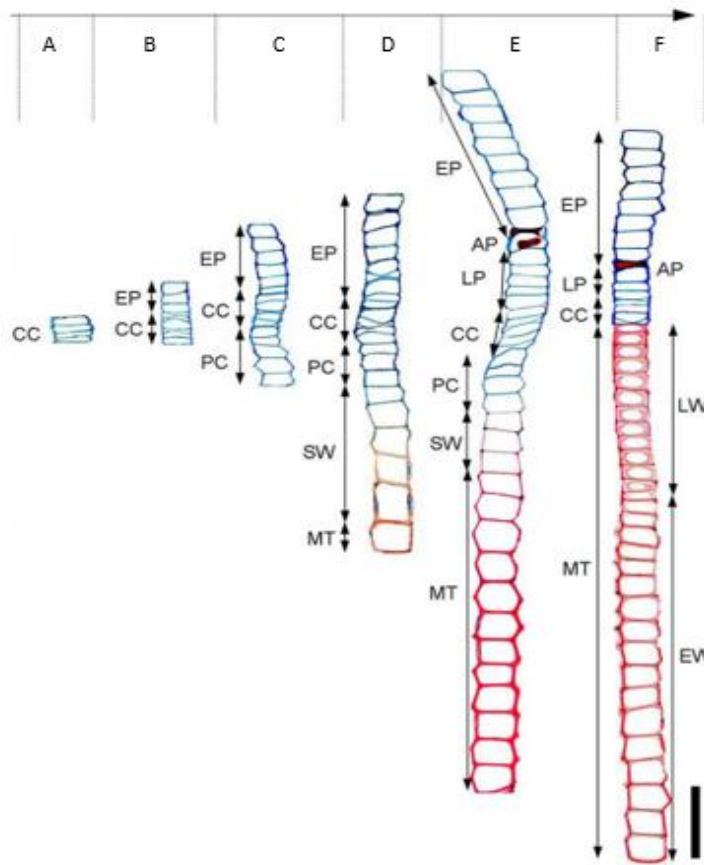


Figura 1. Crecimiento secundario del árbol. Fuente: (Fajstavr *et al.* 2018)

P. radiata presenta una estructura xilemática simple, conformada por dos tipos de células: traqueidas y células parenquimáticas.

En la figura 2 se presenta la estructura general de una especie conífera (ej. *P. radiata*) donde se visualizan las traqueidas, este tipo celular es polifuncional, ya que, cumplen la función de conducción de agua y de sostén. Se presentan como células alargadas direccionadas en sentido transversal y radial, las células de esta última son aplastadas de forma irregular y acompañan a los radios xilemáticos, a su vez estos radios son acompañados por células parenquimáticas

radiales. La longitud de las traqueidas varía entre 1,5 mm a 4,5 mm, esto además dependerá de la zona de crecimiento (Olvera 1985).

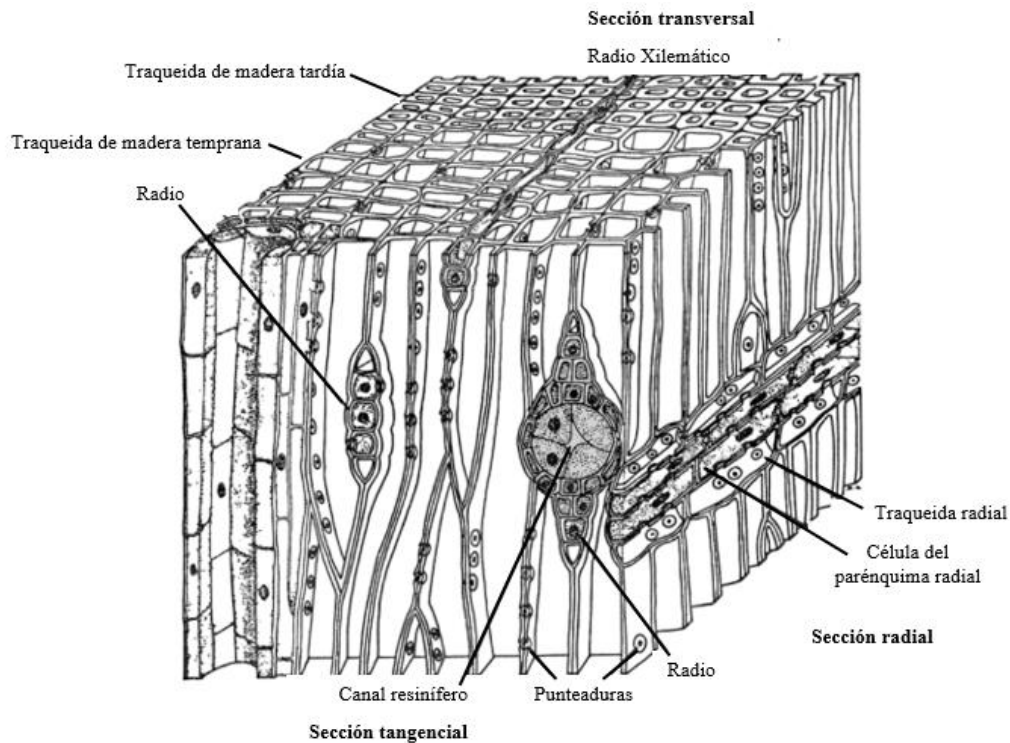


Figura 2. Detalle del tejido leñoso de una especie conífera (ej. *P. radiata*). Fuente: Modificado de Universidad Nacional del Nordeste citado por Escoto *et al.* (2017).

Un estudio realizado por Diaz-Vaz *et al.* (2007) determinó un largo de traqueidas para *P. radiata* que va desde un rango de 2,3 mm a 3,6 mm, y concluyó que este largo depende del sitio, del tipo de madera y de la edad que presente el árbol.

La función de los radios xilemáticos y las células parenquimáticas es almacenamiento, transformar y conducir sustancias en la madera en conjunto con

el lumen de las traqueidas longitudinales (Behr *et al.* 1969, Fengel y Wegener 1989). Dichos elementos anatómicos se conectan a través de las punteaduras, estos son los conductos de flujo de mayor importancia en las coníferas, en donde el número y el tamaño son los determinantes del rango de permeabilidad (Fengel y Wegener 1989). Además, en dicha figura se presentan los canales resiníferos, que entregan una contribución en el transporte de fluidos (Salvo *et al.* 2004).

Dicha anatomía presenta una variación anual dentro del árbol, desde la base hasta la copa. Si se visualiza un corte de manera transversal en especies coníferas, se puede observar los anillos de crecimiento, en dichos anillos existe una variación de propiedades físicas y químicas. La madera que se forma al inicio del periodo vegetativo corresponde a madera temprana (EW, por sus siglas en inglés), mientras que la que se forma en término del periodo vegetativo corresponde a la madera tardía (LW, por sus siglas en inglés) (Díaz-Vaz 1981). La tonalidad más oscura de la madera tardía se debe a que el crecimiento de las células es más reducido producto de que los factores de crecimientos están limitados y las condiciones climáticas son adversas, por lo cual existe una formación de traqueidas más pequeñas y aplanadas, con paredes celulares más gruesas y lignificadas (Figura 3 y Figura 4) (Uggla *et al.* 2001)

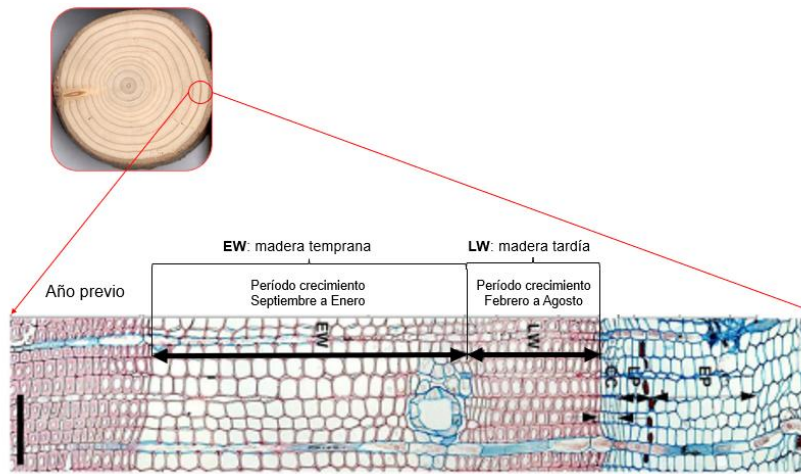


Figura 3. Período de crecimiento de la madera temprana y tardía de una conífera (ej. *P. radiata*.) Fuente: Modificado de Fajstavr *et al.* (2018).

En estos dos tipos de madera las traqueidas varían su crecimiento dependiendo de las condiciones climáticas (Cardalliaguet *et al.* 2019). Así, las traqueidas que conforman EW presentan paredes celulares delgadas, lúmenes más anchos, son más cortas, más anchas en sentido radial, mientras que en LW las traqueidas son más pequeñas y con paredes celulares gruesas (Figura 4) (Fernandez y Salvo 2003, Björklund *et al.* 2017).

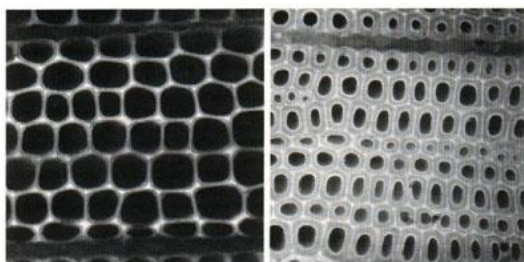


Figura 4. Diferencia entre el espesor de la pared celular de la madera temprana (Izquierda) y tardía (Derecha). Fuente: Fernandez y Salvo (2003)

En la tabla 2 se presenta un resumen de las características anatómicas de *P. radiata* derivadas de un estudio de Salvo *et al.* (2004). Se observa cómo las traqueidas varían entre la madera temprana, madera tardía y entre la madera juvenil y madura, ejemplo de esto, es la variación entre el diámetro de las traqueidas entre EW y LW, además otra medición de interés es la frecuencia de traqueidas de EW y LW independiente del tipo de madera, en donde se puede observar una diferencia promedio que puede superar las 400 traqueidas/mm².

Tabla 2. Valores medios de las características anatómicas de *P. radiata*.

Unidad de medida	Características anatómicas	Madera Juvenil	Madera Adulta
mm	Diámetro Traqueida en EW	0,053	0,056
	Diámetro Traqueida en LW	0,044	0,044
	Diámetro lumen en EW	0,045	0,047
	Diámetro lumen en LW	0,031	0,030
	Espesor pared en EW	0,004	0,004
	Espesor pared en LW	0,006	0,008
Nº/mm ²	Frecuencia traqueidas en EW	574,6	508,3
	Frecuencia traqueidas en LW	863,5	934,2

Fuente: Modificado de Salvo *et al.* (2004)

1.2. Densidad básica de *P. radiata*.

Walker (2006) indica que los factores que determinan la calidad de la madera dependen del uso final que se le quiera dar a la materia prima. Así, debido a la íntima relación que existe entre la calidad de madera en trozas y árboles, y la calidad de madera en productos finales, la industria puede demandar materia prima con distintas características de acuerdo a un objetivo de producción determinado. En relación con atributos de calidad de madera con fines estructurales, la densidad básica es uno de los más recurrentes y considerado un atributo canónico de calidad de madera (Alzamora *et al.* 2022). Se define como la relación entre el peso anhidro y el peso saturado de la madera (Díaz-Vaz 1981). Es utilizada como un indicador sobre la calidad de la plantación y procesos de conversión mecánica, ya que, se correlaciona con otras propiedades físicas y químicas de la madera. En *P. radiata* la densidad básica está fuertemente correlacionada con factores como la edad del árbol, la sección del árbol, la silvicultura, el sitio y el genotipo (Cown *et al.* 1992).

Dicha propiedad es altamente heredable, llegando a valores de 0,60 para heredabilidad familiar y 0,30 para heredabilidad individual después de los primeros dos años, esto produce que la selección por densidad básica de como resultado una mejora genética en la rigidez general de la madera juvenil de *P. radiata* (Li y Wu 2005, Baltunis *et al.* 2007).

Es una propiedad que varía en y entre árboles, esto se debe a que las especies interactúan de distinta forma con el ambiente, esto se explica ya que, características anatómicas de la madera como son: tipo celular, diámetro de lúmenes, ancho de las paredes celulares, entre otras, inciden en la densidad

básica de la madera (Zobel y Van Buijtenen (1989) citado por Omonte y Valenzuela (2011))

En el caso de *P. radiata*, existe una fuerte variación de densidad básica dentro del árbol, ésta se presenta en dirección radial dentro de cada anillo de crecimiento (Delmastro *et al.* 1980). Esta variación se fundamenta en el desarrollo de la madera temprana y tardía, donde, terminada la formación de EW, la densidad básica comienza a aumentar exponencialmente, obteniendo un máximo en el término de la formación de LW, a la vez, va disminuyendo el diámetro radial de la célula y aumentando el grosor de la pared celular (Figura 5) (Hartmann *et al.* 2017). De hecho, la densidad de la madera esta correlacionada con el diámetro de las traqueidas de la madera temprana y con la proporción de la madera tardía (Rathgeber *et al.* 2006). Además, en el caso de esta especie, la densidad básica va disminuyendo con la altura del fuste, es decir, en la base del árbol se presentará una mayor densidad básica que a una altura cercana a la copa (Delmastro *et al.* 1981).

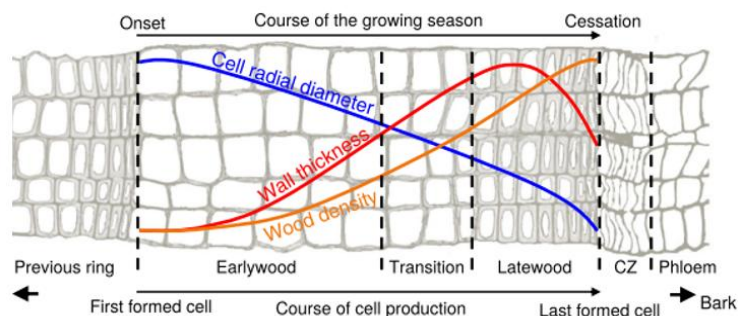


Figura 5. Comportamiento anatómico de un anillo de crecimiento. Fuente: Cuny *et al.* (2014), citado por Hartmann *et al.* (2017).

Así mismo, la densidad básica aumenta desde la médula hasta la corteza y de igual manera la densidad de anillos tiene el mismo comportamiento (Li y Wu 2005, Apiolaza 2012, Kimberley *et al.* 2015). Cown *et al.* (1992) determinó que en Nueva Zelanda la densidad básica de la madera de *P. radiata* entre los anillos 1 al 5 es de 290 a 343 kg/m³, entre 6 y 10 es de 323 a 390 kg/m³ y en la madera exterior los rangos van desde los 384 a 477 kg/m³. Asimismo Beets *et al.* (2007) describe una densidad básica promedio de la madera exterior que varía entre 356 a 484 kg/m³. Riesco y Díaz (2007), determinaron que la densidad básica promedio de *P. radiata* plantado en España es de 345 kg/m³. En el caso de Chile, se han reportado una densidad básica promedio a la altura de 1,3 metros desde la base de 391 kg/m³ para la misma especie (Barría *et al.* 2017).

Así, se tiene que la densidad básica de *P. radiata* corresponde a un indicador ampliamente utilizado para efectos de calidad de madera, de plantaciones forestales y procesos de transformación industrial, esto producto a que se relaciona con diversas propiedades y es fácil de determinar, el problema radica en que posee un coste elevado producto que es necesario la utilización de equipos de laboratorio y el tiempo que se requiere para las mediciones es alto.

1.3. El cambio climático y sus efectos en la productividad y la calidad de madera de *P. radiata* para fines estructurales

El cambio climático se ha convertido en uno de los desafíos ambientales más críticos para las generaciones actuales y futuras. El Acuerdo de París (COP21) reconoció este desafío y el Protocolo de Kyoto promovió el uso sostenible del manejo forestal de los bosques naturales y el establecimiento de plantaciones

forestales como una herramienta estratégica para mitigar el cambio climático. Los árboles desempeñan un papel fundamental en la absorción de dióxido de carbono (CO₂) atmosférico, un gas de efecto invernadero que contribuye al cambio climático. Durante el proceso de fotosíntesis, los árboles toman CO₂ del aire y lo convierten en biomasa, almacenando carbono en sus tejidos. Esto ayuda a reducir la concentración de CO₂ en la atmósfera y contribuye a mitigar el calentamiento global (Payn *et al.* 2015). Las plantaciones forestales, al crecer y acumular biomasa, actúan como sumideros de carbono al absorber y almacenar CO₂ (Mead 2013).

Los efectos del cambio climático en la productividad, y en los daños por disturbios, son difíciles de establecer debido a su no linealidad, y la existencia de importantes rezagos temporales y la influencia de otros factores como los cambios en las prácticas de manejo forestal (Yousefpour *et al.* 2017). Afortunadamente, existe consenso en que los bosques plantados y gestionados en un marco de desarrollo sostenible, tienen un papel crucial en el camino hacia economías bajas en carbono, porque, a pesar de su doble función como sumidero y fuente de emisiones, tienen el potencial de respaldar un uso más amplio de productos madereros que pueden desplazar a productos con mayor huella de combustibles fósiles (Morales *et al.* 2015, FAO 2016). Así, aparte de otorgar una solución a las necesidades madereras, las plantaciones forestales de rápido crecimiento permiten aumentar los reservorios de carbono no atmosférico, ya que secuestran el carbono y lo fijan en su estructura, esto deja entender que el sector forestal posee las herramientas necesarias para favorecer en esta problemática (Alfaro 1997, Sartori *et al.* 2006).

Las plantaciones forestales generalmente se establecen en ambientes heterogéneos, con diferencias ambientales que afectan el volumen y los atributos

de calidad de madera. Variables como edad del árbol, sitio, clima y genéticas están relacionadas con la variación interna y externas de la madera (Downes y Drew 2008). Por otra parte, el cambio climático y sus efectos negativos como los períodos prolongados de sequías tienen efectos en la productividad y la calidad de madera de las plantaciones (Alzamora *et al.* 2022). Existe evidencia de que el cambio climático está afectando a los bosques de todo el mundo, y dichos impactos ocurren como resultado de los cambios en la temperatura, las precipitaciones, la frecuencia y magnitud de las tormentas, la frecuencia de incendios y la frecuencia y magnitud de los brotes de plagas y enfermedades (Pawson *et al.* 2013).

Los efectos del cambio climático en la productividad de *P. radiata* han generado un análisis más crítico por parte de los silvicultores al momento de establecer una plantación forestal. En Chile existen un gradiente climático distintivo lo que provoca una diferencia entre las condiciones de suelo y climáticas que inducen un efecto directo en el desarrollo de las plantaciones forestales (Flores y Allen 2004, Huber y Trecaman 2004). Estos factores tienen un efecto importante en las plantaciones forestales ya que determinan su productividad, en especial factores fisiográficos y de sitio (características del suelo) (Gerding y Schlatter 1995). Uno de los conceptos más importantes para determinar la productividad corresponde a la evapotranspiración neta, que indica cuál es la cantidad de agua extraída del suelo para formar 1m³ de incremento fustal. Este proceso fisiológico se regula en base a 3 condiciones: las características del suelo, la cubierta vegetal y las condiciones climáticas, este último factor conlleva al efecto de variables como conductancia estomática, el área del follaje y los déficits de presión de vapor (Huber y Trecaman 2004, Kirschbaum *et al.* 2012).

La productividad potencial de *P. radiata* varía en función de la capacidad de almacenamiento de agua del suelo, ya que, tiene efecto directo en la tasa de evapotranspiración, es decir, si el suelo es capaz de almacenar por mayor tiempo agua disponible para el árbol, la tasa de evapotranspiración será mayor (Flores y Allen 2004). Esta capacidad del suelo para retener el agua depende de la textura, profundidad, fragmentos rocosos, materia orgánica y densidad aparente (Durán 2018). Generalmente en Chile, la cantidad de agua que se requiere para producir 1m³ de volumen fustal es entre 241 y 717 m³ (Huber y Trecaman 2004). Aunque, esta productividad se verá afectada por las condiciones climáticas futuras. Un estudio realizado por Carrasco *et al.* (2022) demuestra que en plantaciones de *P. radiata* el efecto del cambio climático podría aumentar su productividad en la zona central de Chile durante los próximos 50 años, donde las principales razones corresponden al aumento de la temperatura general y CO₂ atmosférico, no obstante, este efecto va anexado con la fertilidad del suelo, principalmente en base a nutrientes como nitrógeno y fosforo (Kirschbaum *et al.* 2012).

Las proyecciones climáticas indican un aumento de la concentración de CO₂ atmosférico, esto provocaría un incremento en la tasa fotosintética que conlleva un aumento en la producción de biomasa, pero una reducción de la conductancia estomática que limitará la entrada de CO₂ y liberación de agua (Ainsworth y Rogers 2007, Kirschbaum *et al.* 2012, Drew *et al.* 2017, Carrasco *et al.* 2022). Se espera que producto de las variaciones climáticas se vean afectadas las propiedades de la madera, por ejemplo, la densidad básica de la madera tenderá a ir en aumento, lo que provocará un efecto directo sobre las demás propiedades internas de la madera. De hecho, un estudio realizado por Drew *et al.* (2017) predice que en Australia, producto del incremento en la temperatura y disminución de las precipitaciones, se generará un aumento de la densidad básica de la madera y una posible reducción de volumen en *P. radiata* en

condiciones climáticas secas. Esto se explica, ya que, generalmente las coníferas se correlacionan positivamente con las precipitaciones, por lo cual, en zonas secas donde la precipitación es baja, el crecimiento será más lento y la densidad de la madera mayor (Ivković *et al.* 2013).

Otro aspecto que ejerce influencia en la calidad de la madera son los incendios forestales, cuya frecuencia y magnitud han aumentado debido al incremento de las temperaturas, la reducción de las precipitaciones, las fluctuaciones en la humedad relativa y el aumento en la carga de combustible (Watt *et al.* 2018). Seifert *et al.* (2017) informaron que, en el caso de incendios superficiales ocurridos en plantaciones de *P. radiata*, se observa un incremento en las proporciones de madera tardía en el año del incendio y en el siguiente, lo que conlleva a un aumento en la densidad básica de esta especie.

Aunque, estos cambios producidos por las constantes variaciones climáticas pueden ser manejados a través de una silvicultura adecuada. Un estudio realizado por Lasserre *et al.* (2005) determinaron que en *P. radiata* el aumento de la densidad de plantación produce un incremento el MOE (Módulo de Elasticidad). Esto conlleva que en la presencia de un espaciamiento estrecho se reduzca el ángulo de microfibrillas y el ancho de los anillos, además de aumentar la longitud de la fibra y la proporción de madera tardía (Lasserre *et al.* 2009).

Por su parte, Gartner *et al.* (2005) concluyeron que la poda puede aumentar la densidad básica de la madera, pero el raleo provoca una disminución de esta, ya que dicha actividad realiza una modificación en las estructura del rodal, provocando un mayor espaciamiento entre árboles, mayor ingreso de luz,

aumento de temperaturas y las corrientes de aire al interior del dosel, con lo cual tendrán una mayor tasa de crecimiento (Peltola *et al.* 2007, Carson *et al.* 2014).

Numerosos estudios han revelado que la densidad básica de la madera se encuentra estrechamente vinculada con la temperatura media anual, las precipitaciones y la fertilidad del suelo (Palmer *et al.* 2013). Además, investigaciones han identificado que el porcentaje de madera tardía constituye el factor principal asociado a la variación regional en la densidad básica de la madera (Cown y Ball 2001).

Un estudio realizado por Ivković *et al.* (2013) determinó que la densidad del anillo (RD) y la densidad de la madera tardía (LWD) se correlacionan positivamente con las precipitaciones durante la temporada de crecimiento y verano y que RD se correlaciona positivamente con la temperatura media de verano y los días grados. Adicionalmente, se ha comprobado que tanto la madera temprana como la tardía guardan una relación significativa con la temperatura (Björklund *et al.* 2017).

Recientemente, Jin *et al.* (2021) determinaron que para *Larix gmelinii*, una especie de conífera, las bajas temperaturas inducen la formación de madera tardía. Además, Chávez *et al.* (2017) señalan que en *Pinus durangensis*, *Pinus cooperi* y *Pinus lumholtzii*, establecidas en México, la formación de madera temprana está significativamente relacionada con la temperatura máxima durante los meses de primavera, la temperatura mínima y la precipitación promedio en los meses de invierno, esto último es ratificado por Pompa y Camarero (2015) en un estudio realizado en *P. cooperi*, mientras que la madera tardía muestra una relación significativa con la temperatura mínima durante los meses de invierno.

Producto del cambio climático, el árbol deberá adaptarse a estos nuevos climas, por lo cual, el crecimiento anual que comprende la formación de EW y LW será distinto.

Considerando la relevancia de explorar la variación de la madera tardía en función de la variabilidad del clima, y el efecto de ésta sobre la densidad de la madera, el presente estudio plantea la hipótesis que existe una relación positiva y significativa entre la densidad de la madera y la proporción de madera tardía en el anillo de crecimiento, y que variables de temperatura y pluviosidad tendrían un efecto negativo y significativo en la variabilidad de la proporción de madera tardía.

II. METODOLOGÍA

2.1. Materiales

Este estudio se centró en un conjunto de 13 sitios plantados con *P. radiata* (Figura 6), los cuales estaban distribuidos desde la comuna de Vichuquén, Región del Maule ($36^{\circ} 52' S$; $71^{\circ} 56' O$) límite norte, hasta la comuna de Los Álamos, Región del Biobío ($37^{\circ} 38' S$; $73^{\circ} 23' O$) límite sur. Los cuales estaban plantados con la especie *P. radiata* sin ningún tipo de manejo, de propiedad de Forestal Arauco y Constitución S.A.

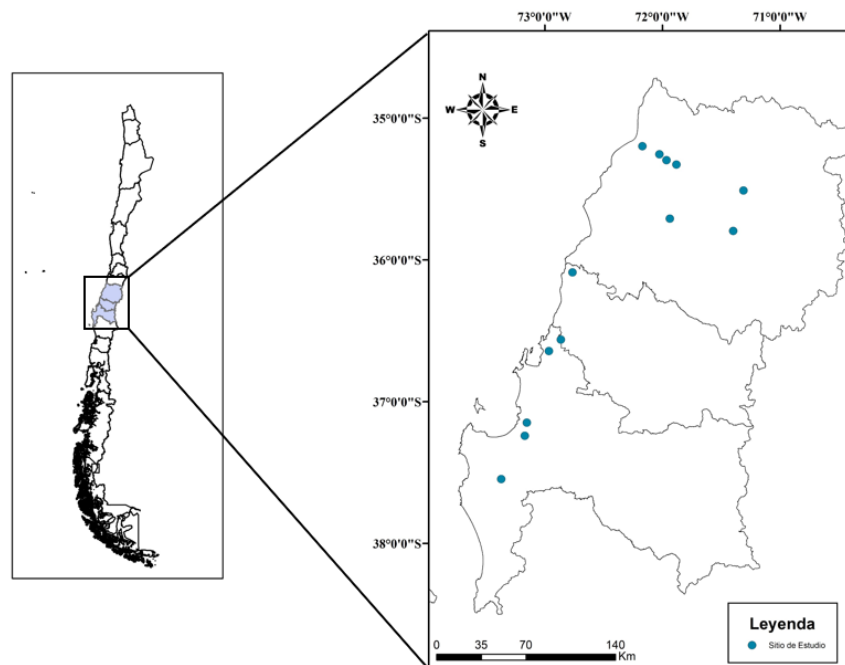


Figura 6. Distribución de los predios muestreados para efecto de obtención tarugos de incremento.

Los rodales seleccionados para el muestreo estaban en edad de cosecha (>23 años), con una altura media que varía entre 22 y 28 metros, y una densidad superior a 700 árboles por hectárea.

Los sitios presentaban un amplio rango de variación respecto a condiciones climáticas, por lo cual se obtuvieron datos climáticos mensuales de temperatura máxima, mínima y precipitaciones a través de un downcaling generado con modelos físicos y calibrados con las estaciones meteorológicas cercanas a cada predio, esto permitió obtener datos desde 1980 hasta el año 2020. Toda esta información fue proporcionada por la empresa ARAUCO S.A.

2.2. Método.

En cada sitio se realizaron 3 parcelas circulares de 400 m², donde se seleccionaron 3 árboles asociados a las clases diamétricas menor, mayor y promedio de cada área de muestreo para realizar la extracción de un tarugo de 12 mm de diámetro a la altura de pecho (1,3 metros) (Figura 7) utilizando un Taladro de incremento Haglöf 400 mm/16" diámetro de muestra 12 mm.

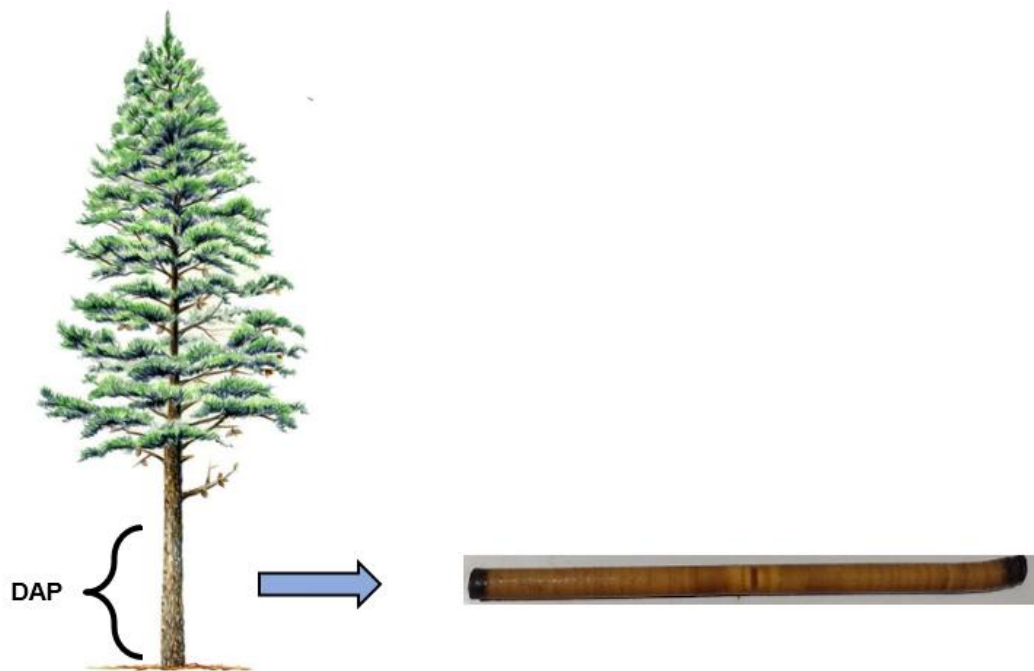


Figura 7. Extracción del tarugo de incremento a la altura de pecho (DAP).

Luego de obtener las muestras, fueron rotuladas y envueltas en papel alusafol con el propósito de evitar la pérdida de humedad y colocadas en un cooler. Posteriormente fueron llevadas al Laboratorio Silvotecnológico de la Madera (LSTM) de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción, para realizar los procesos de análisis de las probetas.

2.2.1. Preparación de las probetas.

En el laboratorio Silvotecnológico de la Madera de la Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción, se le extrajo la corteza a cada tarugo y luego se ubicó la zona medular de éste para realizarle un corte transversal, lo que generó 2 probetas, una para el cálculo de densidad básica de la madera (117 muestras) y otra para el análisis de anillos de crecimiento (117 muestras).

Para el análisis de densidad básica de la madera, la probeta se clasifico en tres secciones: se consideró como sección madera juvenil (MJ) los primeros 8 anillos desde la médula, la sección de madera de transición (MT) desde el anillo 9 hasta el número 15 y la sección de madera madura (MM) desde el anillo 16 hasta el resto de la probeta (Figura 8)

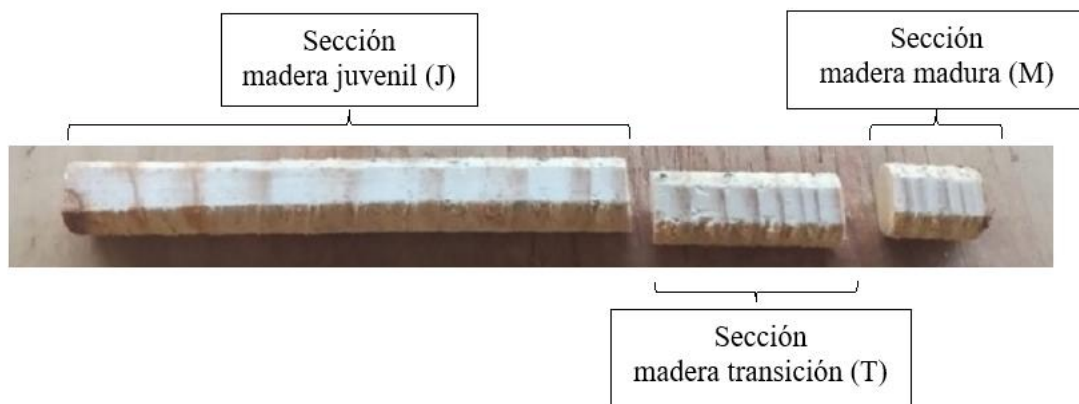


Figura 8. Probetas de madera separada en tres secciones de interés.

Tras etiquetar las probetas, se sometieron a un proceso de saturación durante 72 horas. A continuación, se determinó su volumen en estado verde utilizando el método de inmersión en agua, según la norma finlandesa SCAN-CM 43:95 (1989). Posteriormente, las muestras fueron secadas en horno a una temperatura constante de 80 °C y pesadas diariamente en una balanza de precisión (0,01 g) hasta alcanzar un peso constante. Finalmente se procedió a determinar la densidad básica de cada sección de probeta.

2.2.2 Escaneo de muestras.

Posterior al lijado, cada muestra fue escaneada utilizando un escáner modelo EPSON perfection V370 Photo, para obtener imágenes calibradas de cada tarugo (Figura 9).

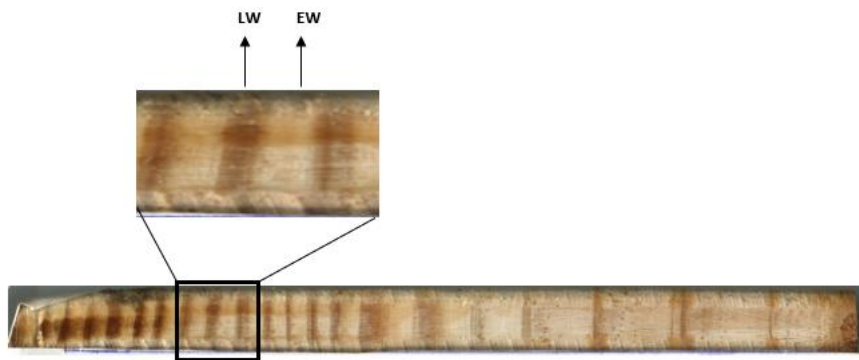


Figura 9. Imagen ilustrando la identificación de la madera tardía en las muestras de un tarugo

2.2.3 Análisis de muestras.

Para el análisis de las imágenes, se usó un algoritmo programado en el software Python versión 3.9.12, el cual permitió medir distancias en la imagen para obtener la proporción de madera tardía presente en cada anillo de crecimiento.

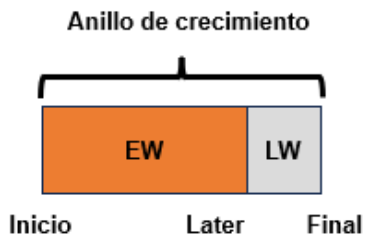


Figura 10. Concepto básico del programa para conteo de anillos.

2.2.4. Análisis estadístico.

Para modelar la proporción de madera tardía en función de variables climáticas, se empleó un modelo lineal mixto utilizando el paquete nlme (Pinheiro *et al.* 2023) de Rstudio (versión 4.3.1) debido al anidamiento de los datos. Además, fueron considerado los efectos aleatorios para cada nivel jerárquico, permitiendo que la variación entre predio, parcelas y tarugos sean modeladas adecuadamente (ecuación 1)

$$Prop_MTar_{ijk_t} = \beta_0 + \sum_{n=1}^N \beta_n X_{n_{t-1}} + u_i + v_{ij} + w_{ijk} + \varepsilon_{ijk} \quad [1]$$

Donde, $Prop_MTar_{ijk_t}$ corresponde a la proporción de madera tardía para la k -ésima muestra en la j -ésima parcela del i -ésimo predio en el año t ; β_0 corresponde al intercepto del modelo; β_n corresponden a los parámetros de los efectos fijos; $X_{n_{t-1}}$ representa los factores fijos en el año $t - 1$; u_i corresponde al efecto aleatorio del i -ésimo predio $\sim N(0, \sigma_u^2)$; v_{ij} corresponde al efecto aleatorio de la j -ésima parcela del i -ésimo predio $\sim N(0, \sigma_v^2)$; w_{ijk} corresponde al efecto aleatorio

de la k-ésima muestra dentro de la j-ésima parcela del i-ésimo predio $\sim N(0, \sigma_w^2)$; ε_{ijk} corresponde al error aleatorio del modelo $\sim N(0, \sigma^2)$.

Luego, para evitar que la variable respuesta presentara rangos predictivos fuera de 0 y 1 se realizó una transformación logit, como sugiere Gujanrati y Porter (2010). Así, los modelos lineales múltiples se ajustaron utilizando la variable Z_{ijk_t} (ecuación 2), sin embargo, para recuperar la variable respuesta original $Prop_MTar_{ijk_t}$, se utilizó el proceso inverso de la transformación logit (ecuación 3)

$$\ln\left(\frac{Prop_MTar_{ijk_t}}{1-Prop_MTar_{ijk_t}}\right) = Z_{ijk_t} = \beta_0 + \sum_{n=1}^N \beta_n X_{n_{t-1}} + u_i + v_{ij} + w_{ijk} + \varepsilon_{ijk} \quad [2]$$

$$z_e = \frac{1}{1+e^{-z}} \quad [3]$$

Asimismo, dado que los datos cuentan con una estructura temporal, se modeló la autocorrelación utilizando una estructura de autocorrelación de primer orden AR(1) (ecuación 4).

$$cor(\varepsilon_{ijk}, \varepsilon_{ijk'}) = \rho^{|t_{ijk} - t_{ijk'}|} \quad [4]$$

Donde, $\varepsilon_{ijk'}$ corresponde al error aleatorio del modelo en un tiempo diferente $t_{ijk'}$; ρ corresponde al parámetro de autocorrelación.

De igual forma, se esperaba que la varianza de la respuesta crezca o disminuya sistemáticamente con la edad, debido a factores ambientales acumulativos y

diferencias en el crecimiento individual, por lo cual, la varianza de los errores se modeló como una función de la edad (ecuación 5), con lo cual el error aleatorio del modelo quedaría expresado como: $\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma_{\varepsilon}^2 * |edad_{ijk}|^{\delta})$.

$$Var(\varepsilon_{ijk}) = \sigma^2 * edad_{ijk}^{2\delta} \quad [5]$$

Donde, σ^2 corresponde a la varianza base, una constante que representa la variabilidad de los errores en ausencia de efectos de heterocedasticidad; $edad_{ijk}$ es la edad asociada al tarugo de la k -ésima muestra dentro de la j -ésima parcela del i -ésimo predio; δ corresponde al parámetro de potencia que se estima durante el ajuste del modelo.

Posteriormente se ejecutaron los diversos modelos para obtener la mejor bondad de ajuste, donde el mejor modelo se seleccionó de acuerdo con el R cuadrado condicional (R_c^2) (ecuación 6) para modelos lineales mixtos, el error cuadrático medio ($RMSE$) (ecuación 7) y el índice de Akaike (ecuación 8). El uso del R_c^2 es relevante porque permite evaluar la proporción de varianza explicada por los efectos fijos y aleatorios del modelo, proporcionando así una medida más completa del ajuste del modelo a los datos (Nakagawa y Schielzeth, 2013). Además, se analizó la normalidad de los residuos utilizando la prueba Shapiro-Wilk.

$$R_c^2 = \frac{\sigma_{fijos}^2 + \sigma_{aleatorios}^2}{\sigma_{fijos}^2 + \sigma_{aleatorios}^2 + \sigma_{residual}^2} \quad [6]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (y_k - \hat{y}_k)^2}{n}} \quad [7]$$

$$AIC = n \ln \left(\frac{SSE}{n} \right) + 2p \quad [8]$$

Donde, σ_{fijos}^2 corresponde a la varianza explicada por los efectos fijos; $\sigma_{aleatorios}^2$ es la varianza explicada por los efectos aleatorios, $\sigma_{residual}^2$ es la varianza residual o el error no explicado por el modelo. y_k son los valores observados; \hat{y}_k son los valores estimados; n es el número de observaciones; p es el número de parámetros en el modelo; SSE es la suma del error de cuadrados.

III. RESULTADOS

3.1. Relación Densidad Básica y Proporción de madera tardía del anillo

La tabla 3 muestra los coeficientes de correlación de Pearson (r) entre la proporción promedio de madera tardía por tarugo ($PpMtar_{tarugo}$) y variables de densidad de la madera por sección. Los resultados indican una correlación positiva significativa entre la proporción de madera tardía y todas las variables de densidad básicas evaluadas. En particular, la densidad básica de la madera de transición (DMT) muestra la correlación más alta ($r = 0,69$, $P < 0,01$), seguida por la densidad básica de la madera madura (DMM) y la densidad básica de la

madera promedio (DBM). La densidad básica de la madera juvenil (DMJ) si bien, muestra una correlación significativa, esta es baja en comparación a sus pares ($r = 0,31$).

Tabla 3. Correlación entre la proporción de madera tardía promedio por tarugo y variables de densidad de la madera.

	Coeficiente de Pearson (r)
Densidad básica de la madera promedio (DBM)	0,57 ^{***}
Densidad básica de la madera juvenil (DMJ)	0,31 ^{***}
Densidad básica de la madera de transición (DMT)	0,69 ^{***}
Densidad básica de la madera madura (DMM)	0,61 ^{***}

* = $P < 0,1$; ** = $P < 0,05$; *** = $P < 0,01$; ns = no significativo.

3.2. Relación Proporción de madera tardía del anillo y variables climáticas

Se realizó un análisis de correlación de Pearson para examinar las relaciones entre las variables climáticas del del periodo $t - 1$ y la proporción de madera tardía en el periodo t . En la tabla 4 se observa que las temperaturas máximas en los periodos: anual, mes más seco, trimestre más frío y lluvioso, trimestre más seco, y los periodos de formación de MTem y MTar, son las que presentan una mayor correlación con la proporción de madera tardía por anillo de crecimiento

del año t ($Prop_MTar_t$). Además, en el caso de las precipitaciones (Tabla 5), ninguna variable se relacionó fuertemente.

Dichos resultados fueron utilizados para definir las variables que se incluyeron en los modelos estadísticos. Además, se descartaron modelos que presentaron colinealidad en sus variables utilizando el Factor de Inflación de la Varianza (VIF), en donde con un $VIF > 5$ se consideró que existe colinealidad en las variables predictoras.

Tabla 4. Correlación entre la proporción de madera tardía por anillo de crecimiento del año t ($Prop_MTar_t$) y variables de temperatura mínima y máxima de distintos periodos.

	Coefficiente de Pearson (r)
Temperatura mínima anual ($tmin_{a_{t-1}}$)	0,04 ^{ns}
Temperatura máxima anual ($tmax_{a_{t-1}}$)	-0,36 ^{***}
Temperatura mínima del mes más frío ($tmin_{mf_{t-1}}$)	0,17 ^{***}
Temperatura máxima del mes más frío ($tmax_{mf_{t-1}}$)	-0,18 ^{***}
Temperatura mínima del mes más seco ($tmin_{ms_{t-1}}$)	-0,12 ^{**}
Temperatura máxima del mes más seco ($tmax_{ms_{t-1}}$)	-0,39 ^{***}
Temperatura mínima del trimestre más frío y lluvioso ($tmin_{tfl_{t-1}}$)	0,08 ^{ns}
Temperatura máxima del trimestre más frío y lluvioso ($tmax_{tfl_{t-1}}$)	-0,26 ^{***}
Temperatura mínima del trimestre más seco ($tmin_{tst_{t-1}}$)	-0,06 ^{ns}
Temperatura máxima del trimestre más seco ($tmax_{tst_{t-1}}$)	-0,38 ^{***}
Temperatura mínima del periodo de formación de MTem ($tmin_{Mtem_{t-1}}$)	0,01 ^{ns}
Temperatura máxima del periodo de formación de MTem ($tmax_{Mtem_{t-1}}$)	-0,34 ^{***}

Temperatura mínima del periodo de formación de MTar ($tmin_{MTar_{t-1}}$)	0,13**
Temperatura máxima del periodo de formación de MTar ($tmax_{MTar_{t-1}}$)	-0,35***

* = $P < 0,1$; ** = $P < 0,05$; *** = $P < 0,01$; ns = no significativo; Mes más frío: Julio; Mes más seco: Enero; Trimestre más frío y lluvioso: Junio, Julio y Agosto; Trimestre más seco: Diciembre, Enero y Febrero; Periodo de formación de Mtem: Septiembre a Enero; Periodo de formación de Mtar: Febrero a Mayo.

Tabla 5. Correlación entre la proporción de madera tardía por anillo de crecimiento del año t ($Prop_MTar_t$) y precipitaciones en distintos periodos.

Precipitación anual ($pp_{a_{t-1}}$)	-0,10*
Precipitación mes más frío ($pp_{mf_{t-1}}$)	-0,03 ^{ns}
Precipitación mes más seco ($pp_{ms_{t-1}}$)	0,17***
Precipitación trimestre más frío y lluvioso ($pp_{tfl_{t-1}}$)	-0,12*
Precipitación trimestre más seco ($pp_{ts_{t-1}}$)	0,04 ^{ns}
Precipitación del periodo de formación de Mtem ($pp_{Mtem_{t-1}}$)	0,07 ^{ns}
Precipitación del periodo de formación de MTar ($pp_{MTar_{t-1}}$)	-0,04 ^{ns}

* = $P < 0,1$; ** = $P < 0,05$; *** = $P < 0,01$; ns = no significativo.

Luego, en base a las tablas 4 y 5, se propusieron 13 modelos lineales mixtos (Tabla 6), en donde cada una de sus variables predictoras presentaron un VIF menor a 5.

El modelo N°3 fue identificado como el más adecuado tras un análisis comparativo basado en criterios estadísticos. Este modelo mostró que todas sus variables independientes son significativas ($P\text{-value} < 0,1$), lo que indica que cada una contribuye de manera relevante a explicar la variabilidad de la variable dependiente. A su vez, el modelo captura un 34% de la variabilidad total, incluyendo los efectos fijos y aleatorios (R_c^2). Además, el error cuadrático medio

(RMSE) del modelo fue de 39,91%. Aunque el modelo N°11 presentó el mismo valor de RMSE, este incluye parámetros cuya significancia estadística no fue comprobada ($P\text{-value} > 0,1$), lo que podría indicar redundancia o poca relevancia de algunas variables. Además, el modelo N°3 tiene el valor más bajo del criterio de información de Akaike (AIC = 2.041,80), lo que sugiere que logra un balance óptimo entre la calidad del ajuste y la parsimonia del modelo, minimizando la sobreparametrización.

Tabla 6. Modelos lineales mixtos para estimar la Proporción de madera tardía en el anillo de crecimiento del año t ($Prop_MTar_t$).

Modelos	Parámetros	R ² - cond.	RMSE	RMSE (%)	AIC
[1] $z_{ijk_t} = \beta_0 + \beta_1 tmax_{a_{t-1}} + \beta_2 edad_{ijk_t} + u_i + v_{ij} + w_{ijk}$		0,33	0,0818	40,05	2.042,49
Intercepto	-1,4429***				
$tmax_{a_{t-1}}$	-0,0430**				
$edad_{ijk_t}$	0,0649***				
u_i	0,1197				
v_{ij}	0,1189				
w_{ijk}	0,2034				
[2] $z_{ijk_t} = \beta_0 + \beta_1 tmax_{ms_{t-1}} + \beta_2 edad_{ijk_t} + u_i + v_{ij} + w_{ijk}$		0,34	0,0818	40,06	2.045,39
Intercepto	-1,9465***				
$tmax_{ms_{t-1}}$	-0,0110 ^{ns}				
$edad_{ijk_t}$	0,0647***				
u_i	0,1719				
v_{ij}	0,1121				
w_{ijk}	0,2038				
[3] $z_{ijk_t} = \beta_0 + \beta_1 tmax_{t_{f_{t-1}}} + \beta_2 edad_{ijk_t} + u_i + v_{ij} + w_{ijk}$		0,34	0,0815	39,91	2.041,80
Intercepto	-1,7647***				
$tmax_{t_{f_{t-1}}}$	-0,0388*				
$edad_{ijk_t}$	0,0649***				
u_i	0,1681				
v_{ij}	0,1148				
w_{ijk}	0,2054				
[4] $z_{ijk_t} = \beta_0 + \beta_1 tmax_{t_{s_{t-1}}} + \beta_2 edad_{ijk_t} + u_i + v_{ij} + w_{ijk}$		0,33	0,0818	40,05	2.042,83
Intercepto	-1,5223***				
$tmax_{t_{s_{t-1}}}$	-0,0278**				
$edad_{ijk_t}$	0,0648***				
u_i	0,1271				
v_{ij}	0,1169				
w_{ijk}	0,2030				
[5] $z_{ijk_t} = \beta_0 + \beta_1 tmax_{Mtem_{t-1}} + \beta_2 edad_{ijk_t} + u_i + v_{ij} + w_{ijk}$		0,34	0,0817	40,01	2.045,92
Intercepto	-2,1488***				
$tmax_{Mtem_{t-1}}$	-0,0044 ^{ns}				
$edad_{ijk_t}$	0,0648***				

	u_i	0,1930				
	v_{ij}	0,1103				
	w_{ijk}	0,2049				
[6]	$z_{ijk_t} = \beta_0 + \beta_1 tmax_{Mtar_{t-1}} + \beta_2 edad_{ijk_t} + u_i + v_{ij} + w_{ijk}$		0,33	0,0818	40,07	2.043,03
	Intercepto	-1,6140***				
	$tmax_{Mtar_{t-1}}$	-0,0286**				
	$edad_{ijk_t}$	0,0650***				
	u_i	0,1337				
	v_{ij}	0,1153				
	w_{ijk}	0,2037				
[7]	$z_{ijk_t} = \beta_0 + \beta_1 tmax_{at-1} + \beta_2 tmax_{tf_{t-1}} + \beta_3 edad_{ijk_t} + u_i + v_{ij} + w_{ijk}$		0,33	0,0816	39,95	2.048,81
	Intercepto	-1,5500***				
	$tmax_{at-1}$	-0,0180 ^{ns}				
	$tmax_{tf_{t-1}}$	-0,0293 ^{ns}				
	$edad_{ijk_t}$	0,0649***				
	u_i	0,1457				
	v_{ij}	0,1172				
	w_{ijk}	0,2049				
[8]	$z_{ijk_t} = \beta_0 + \beta_1 tmax_{ms_{t-1}} + \beta_2 tmax_{tf_{t-1}} + \beta_3 edad_{ijk_t} + u_i + v_{ij} + w_{ijk}$		0,33	0,0816	39,98	2.049,90
	Intercepto	-1,4040***				
	$tmax_{ms_{t-1}}$	-0,0134 ^{ns}				
	$tmax_{tf_{t-1}}$	-0,0402 ^{ns}				
	$edad_{ijk_t}$	0,0648***				
	u_i	0,1290				
	v_{ij}	0,1194				
	w_{ijk}	0,2040				
[9]	$z_{ijk_t} = \beta_0 + \beta_1 tmax_{ms_{t-1}} + \beta_2 tmax_{Mtem_{t-1}} + \beta_3 edad_{ijk_t} + u_i + v_{ij} + w_{ijk}$		0,33	0,0819	40,09	2.054,08
	Intercepto	-1,7226***				
	$tmax_{ms_{t-1}}$	-0,0137 ^{ns}				
	$tmax_{Mtem_{t-1}}$	-0,0085 ^{ns}				
	$edad_{ijk_t}$	0,0647***				
	u_i	0,1465				
	v_{ij}	0,1144				
	w_{ijk}	0,2036				
[10]	$z_{ijk_t} = \beta_0 + \beta_1 tmax_{tf_{t-1}} + \beta_2 tmax_{ts_{t-1}} + \beta_3 edad_{ijk_t} + u_i + v_{ij} + w_{ijk}$		0,33	0,0816	39,95	2.047,89
	Intercepto	-1,1632***				
	$tmax_{tf_{t-1}}$	-0,0359 ^{ns}				
	$tmax_{ts_{t-1}}$	-0,0251**				
	$edad_{ijk_t}$	0,0648***				
	u_i	0,1013				
	v_{ij}	0,1229				
	w_{ijk}	0,2033				
[11]	$z_{ijk_t} = \beta_0 + \beta_1 tmax_{tf_{t-1}} + \beta_2 tmax_{Mtem_{t-1}} + \beta_3 edad_{ijk_t} + u_i + v_{ij} + w_{ijk}$		0,34	0,0815	39,91	2.050,74
	Intercepto	-1,7890***				
	$tmax_{tf_{t-1}}$	-0,0395 ^{ns}				
	$tmax_{Mtem_{t-1}}$	0,0018 ^{ns}				
	$edad_{ijk_t}$	0,0649***				
	u_i	0,1738				
	v_{ij}	0,1143				
	w_{ijk}	0,2054				
[12]	$z_{ijk_t} = \beta_0 + \beta_1 tmax_{tf_{t-1}} + \beta_2 tmax_{Mtar_{t-1}} + \beta_3 edad_{ijk_t} + u_i + v_{ij} + w_{ijk}$		0,33	0,0816	39,98	2.048,89
	Intercepto	-0,3963***				
	$tmax_{tf_{t-1}}$	-0,0311 ^{ns}				

$tmax_{Mtar_{t-1}}$	-0,0214 ^{ns}				
$edad_{ijk_t}$	0,0650 ^{***}				
u_i	0,1225				
v_{ij}	0,1191				
w_{ijk}	0,2044				
[13] $z_{ijk} = \beta_0 + \beta_1 tmax_{ts_{t-1}} + \beta_2 tmax_{Mtem_{t-1}} + \beta_3 edad_{ijk_t} +$		0,33	0,0818	40,05	2.051,73
$u_i + v_{ij} + w_{ijk}$					
Intercepto	-0,1419 ^{***}				
$tmax_{ts_{t-1}}$	-0,0272 ^{**}				
$tmax_{Mtem_{t-1}}$	-0,0054 ^{ns}				
$edad_{ijk_t}$	0,0648 ^{***}				
u_i	0,1183				
v_{ij}	0,1179				
w_{ijk}	0,2030				

* = $P < 0,1$; ** = $P < 0,05$; *** = $P < 0,01$; ns = no significativo.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio confirman una relación significativa entre la densidad básica de la madera y la proporción de madera tardía en los tarugos analizados. Esta relación, observada en diferentes condiciones, coincide con los hallazgos de Cown y Ball (2001), quienes reportaron que la densidad de la madera en *P. radiata* está fuertemente influenciada por la proporción de madera tardía en los anillos de crecimiento.

La proporción de madera tardía del anillo no mostró correlación con las precipitaciones medias en diferentes periodos de tiempo, lo cual contradice los hallazgos de Ivkovic *et al.* (2013) en *P. radiata*. Además, estos resultados difieren de los reportados por Chávez *et al.* (2017) y Pompa y Camarero (2015), quienes estudiaron especies del mismo género, destacando discrepancias en la relación entre las precipitaciones y esta variable.

La proporción de madera tardía del anillo no mostró relación significativa con las temperaturas mínimas, lo que contradice lo observado por Jin *et al.* (2021) en la especie conífera *Larix gmelinii* y por Chávez *et al.* (2017) en especies del género *Pinus*. Sin embargo, este estudio sí encontró relaciones significativas con las temperaturas máximas, respaldando parcialmente los hallazgos de Chávez *et al.* (2017), quienes también identificaron esta relación en el mismo género. Esto podría explicarse por el impacto de las altas temperaturas en la capacidad fotosintética, que tiende a reducirse bajo condiciones térmicas extremas (Chang *et al.* 2016, Fréchette *et al.* 2016).

Los resultados de la modelación de la proporción de madera tardía en los anillos de crecimiento destacan que las variables temperatura máxima del trimestre más frío y la edad (modelo 3) son las mejores predictoras de la proporción de madera tardía en el año t ($Prop_MTar_t$).

Una disminución de 1°C en la temperatura máxima durante el trimestre más frío reduce la $Prop_MTar_t$ en un 3,88%. Esto se debe a que temperaturas primaverales más cálidas son cruciales para activar la xilogénesis, ya que, los árboles requieren una acumulación térmica mínima para iniciar la actividad cambial (Huang *et al.* 2023). Lo que favorece la formación de madera temprana, reduciendo la proporción de madera tardía en el anillo anual (Carteni *et al.* 2018). Por otra parte, la $Prop_MTar_t$ aumenta un 6,49% con cada año, reflejando cambios fisiológicos asociados al desarrollo estructural del árbol, información que es congruente con lo descrito por Cown y Ball (2001).

V. CONCLUSIONES

La proporción de madera tardía en los anillos de crecimiento tiene un efecto significativo en la densidad básica de la madera en plantaciones de *Pinus radiata* ubicadas entre las regiones del Maule y Biobío. Este resultado confirma que la madera tardía es un predictor clave para la calidad de la madera, dado su impacto directo en la densidad básica.

Las variables de temperatura, especialmente las temperaturas máximas durante el trimestre más frío, tienen un efecto significativo en la proporción de madera tardía. Se observó que un aumento en las temperaturas primaverales favorece la formación de madera temprana, reduciendo la proporción de madera tardía. Por otro lado, las precipitaciones no mostraron una correlación consistente con esta variable, lo que contradice estudios previos en especies del mismo género. Además, la edad del árbol tiene un impacto significativo en la proporción de madera tardía. Este comportamiento refleja cambios fisiológicos asociados al desarrollo estructural del árbol y refuerza la importancia de considerar este factor al modelar propiedades de los anillos de crecimiento.

Los modelos lineales mixtos demostraron ser una herramienta eficaz para capturar la complejidad de los datos relacionados con la proporción de madera tardía en *Pinus radiata*. Estos modelos permitieron manejar la estructura jerárquica del diseño experimental, incorporando efectos aleatorios a nivel de predio, parcela y tarugo, lo que fue esencial para modelar la variabilidad inherente en diferentes niveles de anidamiento. Además, el modelo identificado como óptimo incluyó como variables predictoras principales la temperatura máxima del trimestre más frío y la edad del árbol. Este modelo explicó el 34% de la

variabilidad total de la proporción de madera tardía, combinando efectos fijos y aleatorios, lo que evidencia su capacidad para captar tanto tendencias generales como diferencias específicas entre sitios y árboles individuales.

Este estudio aporta evidencia que refuerza algunos hallazgos previos, como la correlación positiva entre madera tardía y densidad básica, pero también muestra discrepancias con otros trabajos que asociaron la proporción de madera tardía a precipitaciones significativas. Estas diferencias subrayan la importancia de considerar las particularidades locales y las características intrínsecas de *Pinus radiata*.

Los hallazgos del estudio destacan la necesidad de considerar factores ambientales, como las temperaturas máximas, en estrategias de manejo forestal para optimizar la calidad de la madera. La ausencia de una relación consistente con las precipitaciones sugiere que otros factores climáticos o edáficos podrían ser más relevantes en estos sitios específicos.

VII. BIBLIOGRAFÍA

Ainsworth E.A., A. Rogers. 2007. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: mechanisms and environmental interactions. *Plant, cell & environment* 30(3): 258-270.

Alfaro M. 1997. Almacenamiento y fijación de carbono en ecosistemas forestales. *Revista Forestal Centroamericana* 6(19): 9-12.

Alvarez V., P. Poblete, D. Soto, J. Gysling, C. Kahler, E. Pardo. 2021. La industria del aserrio 2021. Instituto Forestal, Boletín Estadístico N°183. Chile. 129 p.

Alvarez V., P. Poblete, D. Soto, J. Gysling, C. Kahler, E. Pardo, J.C. Bañados, D. Baeza. 2023. Anuario Forestal 2023. Instituto Forestal, Boletín Estadístico N°192. Chile. 280 p.

Alzamora R.M., W. Oviedo, R. Rubilar. 2022. Life cycle analysis to estimate CO₂e emissions from forest harvesting systems in intensively managed *Pinus radiata* plantations. *Scandinavian Journal of Forest Research* 37(2): 144-152.

Apiolaza L.A. 2012. Basic density of radiata pine in New Zealand: genetic and environmental factors. *Tree Genetics & Genomes* 8(1): 87-96.

Area M.C. 2008. Red Iberoamericana de Docencia e Investigación en Celulosa y Papel. pp. 524-548. En: *Panorama de Celulosa y Papel en Iberoamérica 2008*, Red Iberoamericana de Docencia e Investigación en Celulosa y Papel.

Baltunis B., H. Wu, M. Powell. 2007. Inheritance of density, microfibril angle, and modulus of elasticity in juvenile wood of *Pinus radiata* at two locations in Australia. *Canadian Journal of Forest Research* 37(11): 2164-2174.

Barría C., S. Sandoval, G. Rojas. 2017. Uso del método de resistografía para la predicción de la densidad básica de la madera en árboles en pie de *Pinus radiata*. *Maderas Ciencia y tecnología* 19: 349-362.

Beets P., M. Kimberley, R. McKinley. 2007. Predicting wood density of *Pinus radiata* annual growth increments. *New Zealand Journal of Forestry Science* 37(2): 241.

Behr E., I. Sachs, B. Kukachka, J. Blew. 1969. Microscopic examination of pressure treated wood. *Forest Prod J* 19(8): 30-40.

Björklund J., K. Seftigen, F. Schweingruber, P. Fonti, G. von Arx, M.V. Bryukhanova, H.E. Cuny, M. Carrer, D. Castagneri, D.C. Frank. 2017. Cell

size and wall dimensions drive distinct variability of earlywood and latewood density in Northern Hemisphere conifers. *New Phytologist* 216(3): 728-740.

Büchner C., M. Martín, R. Sagardía, Y. Rojas, F. Guzmán, M. Barrientos, R. Guiñez, A. Aravena. 2021. Análisis de los factores que están incidiendo en la oferta de madera de plantaciones forestales en los últimos años. Regiones de Valparaíso a Los Lagos período 2010-2019. Instituto Forestal. Documento de Divulgación. Chile. 40 p.

Cardalliaquet L., A.A. Muñoz, V. Humanes, I. Aguilera-Betti, M. Génova, C. LeQuesne, M. Rojas-Badilla, C. Veas. 2019. Crecimiento radial de *Abies pinsapo* en el sur de Chile: relaciones con el clima local y su comparación con poblaciones naturales en España. *Bosque (Valdivia)* 40(2): 141-152.

Carnus J.-M., J. Parrotta, E. Brockerhoff, M. Arbez, H. Jactel, A. Kremer, D. Lamb, K. O'Hara, B. Walters. 2006. Planted Forests and Biodiversity. *Journal of Forestry* 104(2): 65-77.

Carrasco G., A.C. Almeida, M. Falvey, G.F. Olmedo, P. Taylor, F. Santibañez, N.C. Coops. 2022. Effects of climate change on forest plantation productivity in Chile. *Global Change Biology* 28(24): 7391-7409.

Carson S.D., D.J. Cown, R.B. McKinley, J.R. Moore. 2014. Effects of site, silviculture and seedlot on wood density and estimated wood stiffness in radiata pine at mid-rotation. *New Zealand Journal of Forestry Science* 44(1): 26.

Chang, C. Y., Fréchette, E., Unda, F., Mansfield, S. D., & Ensminger, I. (2016). Elevated temperature and CO₂ stimulate late-season photosynthesis but impair cold hardening in pine. *Plant Physiology* 172(2), 802-818.

Chávez M.P., J. Cerano, J.A. Nájera, V. Pereda, G. Esquivel, R. Cervantes, V.H. Cambrón, F. Cruz, S. Corral. 2017. Reconstrucción de la precipitación invierno-primavera con base en anillos de crecimiento de árboles para la región de San Dimas, Durango, México. *Bosque (Valdivia)* 38: 387-399.

Carteni, F., Deslauriers, A., Rossi, S., Morin, H., De Micco, V., Mazzoleni, S., & Giannino, F. 2018. The physiological mechanisms behind the earlywood-to-latewood transition: a process-based modeling approach. *Frontiers in Plant Science* 9: 1053.

Contesse D. 1986. Apuntes y consideraciones para la Historia del Pino Radiata en Chile. *Boletín de la Academia Chilena de la Historia* 53: 351-372.

Contreras W., V. Cloquell, M. Owen de Contreras. 2005. La madera, productos forestales, industria forestal. Conceptos y clasificación Departamento de Proyectos de Ingeniería e Innovación. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España. 82 p.

- CORMA. 1971. El cultivo del Pino insigne. Santiago, Chile: 503 p.
- Cown D., R. Ball. 2001. Wood densitometry of 10 *Pinus radiata* families at seven contrasting sites: influence of tree age, site, and genotype. *New Zealand Journal of Forestry Science* 31(1): 88-100.
- Cown D., G. Young, R. Burdon. 1992. Variation in wood characteristics of 20-year-old half-sib families of *Pinus radiata*. *New Zealand Journal of Forestry Science* 22(1): 63-76.
- Delmastro R., J. Díaz-Vaz, J. Schlatter. 1980. Variabilidad de las características tecnológicas hereditarias del *Pinus radiata* (D. Don). Revisión bibliográfica. Proyecto CONAF/PNUD/FAO. Santiago, Chile. 157 p.
- Delmastro R., J. Díaz-Vaz, J. Schlatter. 1981. Variabilidad de las características tecnológicas hereditarias del *Pinus radiata* (D. Don): Informe N°3. Proyecto CONAF/PNUD/FAO. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile. 187 p.
- Díaz-Vaz J. 1981. Delimitación de madera temprana-tardía y juvenil-madura en Pino oregón. *Bosque* 4(1): 55-58.
- Díaz-Vaz J., A. Fernández, L. Valenzuela, M. Torres. 2007. Madera de compresión en *Pinus radiata* D. Don: I, características anatómicas. *Maderas Ciencia y tecnología* 9(1): 29-43.
- Downes G.M., D.M. Drew. 2008. Climate and growth influences on wood formation and utilisation. *Southern Forests: a Journal of Forest Science* 70(2): 155-167.
- Drew D.M., J. Bruce, G.M. Downes. 2017. Future wood properties in Australian forests: effects of temperature, rainfall and elevated CO₂. *Australian Forestry* 80(4): 242-254.
- Droppelmann F., H. Grosse, A. Laroze. 2019. Contribución de los bosques nativos y plantados a la mitigación de los impactos del cambio climático en Chile en un contexto de desarrollo sustentable. *Ciencia & Investigación Forestal* 25(2): 7 - 36.
- Durán M. 2018. Factores de sitio y productividad de *Pinus radiata* a escala predial en la región del Biobío, Chile. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales. 30 p.
- Escoto T., N. Beas, H. Contreras, A. Rodríguez, S. Díaz, J. Anzaldo, R. Vega. 2017. Caracterización dasométrica y químico-micrográfica de tres especies de pino y su viabilidad de aprovechamiento integral. *Revista mexicana de ciencias forestales* 8(41): 109-138.

- Espinoza S.E., C.R. Magni, R.E. Santelices, M. Ivković, A.M. Cabrera. 2016. Changes in drought tolerance of *Pinus radiata* in Chile associated with provenance and breeding generation. *Annals of Forest Science* 73(2): 267-275.
- Fajstavr M., Z. Paschova, K. Giagli, H. Vavrcik, V. Gryc, J. Urban. 2018. Auxin (IAA) and soluble carbohydrate seasonal dynamics monitored during xylogenesis and phloemogenesis in Scots pine. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 11(5): 553-562.
- FAO. 1995. Análisis de impactos de proyectos forestales: problemas y estrategias. Food & Agriculture Org. Rome. 68 p.
- FAO. 2016. Forestry for a low-carbon future Integrating forests and wood products in climate change strategies. FAO Forestry Paper. Rome. 151 p.
- FAO. 2020. Global forest resources assessment 2020 - Key findings. Food & Agriculture Organization of the UN. Rome. 12 p.
- Fengel D., G. Wegener. 1989. Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. Walter de Gruyter. Berlin. 612 p.
- Fernandez A.M., L. Salvo. 2003. Variación del área de pared celular en *Pinus Radiata* D. Don. *Maderas Ciencia y tecnología* 5(1): 80-87.
- Flores F., L. Allen. 2004. Efectos del clima y capacidad de almacenamiento de agua del suelo en la productividad de rodales de pino radiata en Chile: un análisis utilizando el modelo 3-PG. *Bosque (Valdivia)* 25(3): 11-24.
- Fréchette, E., Chang, C. Y. Y., & Ensminger, I. 2016. Photoperiod and temperature constraints on the relationship between the photochemical reflectance index and the light use efficiency of photosynthesis in *Pinus strobus*. *Tree Physiology* 36(3): 311-324.
- García E., A. Sotomayor, S. Silva, G. Valdevenito. 2000. Establecimiento de Plantaciones Forestales. Instituto Forestal, Documento de Divulgación °17. Chile. 31 p.
- Gartner B.L., J.M. Robbins, M. Newton. 2005. Effects of pruning on wood density and tracheid length in young Douglas-fir. *Wood and Fiber Science* 37(2): 304-313.
- Gerding V., J. Schlatter. 1995. Variables y factores del sitio de importancia para la productividad de *Pinus radiata* D. Don en Chile. *Bosque* 16(2): 39-56.
- Gysling J., C. Kahler, D. Soto, W. Mejías, P. Poblete, V. Álvarez, J.C. Bañados, D. Baeza, E. Pardo. 2021. Madera y Construcción: Hacia una Simbiosis Estratégica. Instituto Forestal. Chile. 214 p.

Hartmann F., C. Rathgeber, M. Fournier, B. Moulia. 2017. Modelling wood formation and structure: power and limits of a morphogenetic gradient in controlling xylem cell proliferation and growth. *Annals of Forest Science* 74(1): 14.

Huang, J. G., Zhang, Y., Wang, M., Yu, X., Deslauriers, A., Fonti, P., ... & Rossi, S. 2023. A critical thermal transition driving spring phenology of Northern Hemisphere conifers. *Global Change Biology*,29(6): 1606-1617.

Huber A., R. Trecaman 2004. Eficiencia del uso del agua en plantaciones de *Pinus radiata* en Chile. *Bosque (Valdivia)* 25(3): 33-43.

Hui-quan B., J. Simpson, L. Rong-wei, Y. Hong, W. Zong-xing, C. Shi-min, R. Eldridge. 2003. Introduction of *Pinus radiata* for afforestation: a review with reference to Aba, China. *Journal of Forestry Research* 14(4): 311-322.

Ivković M., W. Gapare, H. Wu, S. Espinoza, P. Rozenberg. 2013. Influence of cambial age and climate on ring width and wood density in *Pinus radiata* families. *Annals of Forest Science* 70(5): 525-534.

Jin Y., J. Li, X. Bai, Y. Zhao, D. Cui, Z. Chen. 2021. High temperatures constrain latewood formation in *Larix gmelinii* xylem in boreal forests. *Global Ecology and Conservation* 30: e01767.

Kimberley M.O., D.J. Cown, R.B. McKinley, J.R. Moore, L.J. Dowling. 2015. Modelling variation in wood density within and among trees in stands of New Zealand-grown *radiata* pine. *New Zealand Journal of Forestry Science* 45(1): 22.

Kirschbaum M.U., M.S. Watt, A. Tait, A.G.E. Ausseil. 2012. Future wood productivity of *Pinus radiata* in New Zealand under expected climatic changes. *Global Change Biology* 18(4): 1342-1356.

Lasserre J.-P., E. Mason, M. Watt. 2005. The effects of genotype and spacing on *Pinus radiata* [D. Don] corewood stiffness in an 11-year old experiment. *Forest Ecology and Management* 205(1-3): 375-383.

Lasserre J.-P., E. Mason, M. Watt, J. Moore. 2009. Influence of initial planting spacing and genotype on microfibril angle, wood density, fibre properties and modulus of elasticity in *Pinus radiata* D. Don corewood. *Forest Ecology and Management* 258(9): 1924-1931.

Li L., H.X. Wu. 2005. Efficiency of early selection for rotation-aged growth and wood density traits in *Pinus radiata*. *Canadian Journal of Forest Research* 35(8): 2019-2029.

Mead D.J. 2013. Sustainable management of *Pinus radiata* plantations. FAO Forestry Paper. Rome. 246 p.

- Morales M., G. Aroca, R. Rubilar, E. Acuna, B. Mola-Yudego, S. González-García. 2015. Cradle-to-gate life cycle assessment of *Eucalyptus globulus* short rotation plantations in Chile. *Journal of Cleaner Production* 99: 239-249.
- Musálem M. 2006. *Silvicultura de Plantaciones Forestales Comerciales*. Universidad Autónoma Chapingo. Division de Ciencias Forestales. Departamento de Ecología y Silvicultura. 208 p.
- Nakagawa, S., & Schielzeth, H. 2013. A general and simple method for obtaining R² from generalized linear mixed-effects models. *Methods in Ecology and Evolution* 4(2), 133-142.
- Olvera P. 1985. Descripción anatómica de la madera de siete especies del género *Pinus*. *Boletín Técnico*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. Mexico. 73 p.
- Omonte M., L. Valenzuela. 2011. Variación radial y longitudinal de la densidad básica en árboles de *Eucalyptus regnans* de 16 años. *Maderas Ciencia y tecnología* 13(2): 211-224.
- Palmer D.J., M.O. Kimberley, D.J. Cown, R.B. McKinley. 2013. Assessing prediction accuracy in a regression kriging surface of *Pinus radiata* outerwood density across New Zealand. *Forest Ecology and Management* 308: 9-16.
- Pawson S.M., A. Brin, E.G. Brockerhoff, D. Lamb, T.W. Payn, A. Paquette, J.A. Parrotta. 2013. Plantation forests, climate change and biodiversity. *Biodiversity and Conservation* 22(5): 1203-1227.
- Payn T., J.-M. Carnus, P. Freer-Smith, M. Kimberley, W. Kollert, S. Liu, C. Orazio, L. Rodriguez, L.N. Silva, M.J. Wingfield. 2015. Changes in planted forests and future global implications. *Forest Ecology and Management* 352: 57-67.
- Peltola H., A. Kilpeläinen, K. Sauvala, T. Räisänen, V.-P. Ikonen. 2007. Effects of early thinning regime and tree status on the radial growth and wood density of Scots pine. *Silva Fennica* 41(3): 489-505.
- Pinheiro, José, Douglas Bates, and R Core Team. 2023. *Nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models*. <https://svn.r-project.org/R-packages/trunk/nlme/>.
- Pompa M., J.J. Camarero. 2015. Potencial dendroclimático de la madera temprana y tardía de *Pinus cooperi* Blanco. *Agrociencia* 49(2): 177-187.
- Rathgeber C.B., V. Decoux, J.-M. Leban. 2006. Linking intra-tree-ring wood density variations and tracheid anatomical characteristics in Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). *Annals of Forest Science* 63(7): 699-706.

- Riesco G., J. Díaz. 2007. Características físicas de la madera de pino procedente de raleos en el noroeste de España. *Maderas Ciencia y tecnología* 9(3): 233-244.
- Salvo L., R. Ananías, A. Cloutier. 2004. Influencia de la estructura anatómica en la permeabilidad específica transversal al gas del pino radiata. *Maderas Ciencia y tecnología* 6(1): 33-44.
- Sartori F., R. Lal, M.H. Ebinger, D.J. Parrish. 2006. Potential Soil Carbon Sequestration and CO₂ Offset by Dedicated Energy Crops in the USA. *Critical Reviews in Plant Sciences* 25(5): 441-472.
- Seifert T., M. Meincken, B.O. Odhiambo. 2017. The effect of surface fire on tree ring growth of *Pinus radiata* trees. *Annals of Forest Science* 74(2): 34.
- Serra M.T., R.M. Garay. 1990. Introducción del pino insigne. *Lignum: madera y tecnología* Fundación Chile: 16.
- Sotelo R.D. 1996. Importancia ecológico-económica del aprovechamiento de los bosques. *Madera y Bosques* 2(2): 3-10.
- Toledo F. 2023. Caracterización de la densidad básica en sitios con potencial productivo de madera aserrada estructural. Pregrado. Universidad de Concepción. Departamento de Manejo de Bosques y medio Ambiente Concepción, Chile. 30p.
- Toro J., S. Gessel. 1999. Radiata pine plantations in Chile. *New Forests* 18(1): 33-44.
- Ugglå C., E. Magel, T. Moritz, B.r. Sundberg. 2001. Function and Dynamics of Auxin and Carbohydrates during Earlywood/Latewood Transition in Scots Pine1. *Plant Physiology* 125(4): 2029-2039.
- Walker J. 2006. Primary Wood Processing. Principles and Practice. Springer Science & Business Media 606: 538-539.
- Watt M.S., M.U.F. Kirschbaum, J.R. Moore, H.G. Pearce, L.S. Bulman, E.G. Brockerhoff, N. Melia. 2018. Assessment of multiple climate change effects on plantation forests in New Zealand. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 92(1): 1-15.
- Yousefpour R., C. Temperli, J.B. Jacobsen, B.J. Thorsen, H. Meilby, M.J. Lexer, M. Lindner, H. Bugmann, J.G. Borges, J.H.N. Palma, D. Ray, N.E. Zimmermann, S. Delzon, A. Kremer, K. Kramer, C.P.O. Reyer, P. Lasch-Born, J. Garcia-Gonzalo, M. Hanewinkel. 2017. A framework for modeling adaptive forest management and decision making under climate change. *Ecology and Society* 22(4).