



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Evaluación de la incidencia del raleo sobre la presencia de madera de compresión en *Pinus taeda* a turno final

Carla Andrea Padilla Correia

Magíster en Ciencias Agrarias
Opción Ciencias Vegetales

Junio, 2026

**Evaluación de la incidencia del raleo
sobre la presencia de madera de
compresión en *Pinus taeda* a turno final**

Carla Andrea Padilla Correia

Magíster en Ciencias Agrarias
Opción Ciencias Vegetales

Junio, 2026

Esta tesis de maestría se distribuye bajo licencia

Creative Commons **reconocimiento - no comercial - sin obra derivada.**



Tesis aprobada por el tribunal integrado por el Dr. Ing. Agr. Jaime Tálice, la Dra. Ing. Quím. Marcela Ibañez y el Msc. Ing Agr. Franco Schinato el (día) de (mes) de (año). Autora: Ing. Agr. Carla Padilla. Director: Dr. Ing. Agr. Fernando Resquin. Codirectora: Dra. Ing. Agr. Cecilia Rachid-Casnati.

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a mi tutor, Fernando Resquin, quien desde el inicio siempre estuvo dispuesto a brindarme su apoyo en todo lo necesario. Su paciencia, así como su forma de afrontar cada situación con humor, sin dudas hicieron que el proceso fuera más liviano. Le agradezco por escuchar y valorar mis aportes y, al mismo tiempo, guiarme de una forma tan enriquecedora.

A mi cotutora, Cecilia Rachid, y a Andrés Hirigoyen, por sus aportes durante la etapa de análisis de datos. Les agradezco el tiempo, la mirada técnica y la disposición para acompañar esta parte del trabajo.

Al equipo del Departamento Forestal de INIA, en especial a Sebastián Inthamoussu, Federico Rodríguez, Juan Lozano, Pablo Núñez y Wilfredo González, por su compromiso y buena disposición durante la etapa a campo, tan extensa y exigente. Gracias por todo el esfuerzo, la compañía en las largas jornadas y por estar siempre dispuestos a resolver lo que hiciera falta.

A Juan Pedro Posse, por proponer y gestionar el acceso al ensayo en el cual se desarrolló esta tesis. También por motivarme a embarcarme en esta maestría y brindar su apoyo en un momento clave.

A la empresa UPM, por permitirme acceder a su campo y llevar adelante toda la parte práctica en el ensayo.

A la empresa Arboreal, por facilitarme sus hornos para el secado de todas las tablas, así como por la colaboración brindada al compartir información relevante para el desarrollo del trabajo.

A Cyntia da Silva y Erika Pereira, por permitirme llevar a cabo la etapa de análisis anatómicos en el Laboratorio de Tecnología de la Madera. A Ludmila Profumo, por su ayuda en la gestión, y a ella y Verónica Casaravilla, por el acompañamiento técnico en los análisis siempre que lo necesité.

A la empresa Fymnsa y a Daniela Malatés, por haberme introducido a esta temática y por haber despertado en mí el interés que luego daría origen a esta tesis. A Ignacio Mieres, por las charlas y discusiones que me ayudaron a ordenar ideas y pensar con más claridad en momentos clave del análisis.

Al Grupo de Trabajo en Madera, en especial Luciana Ingaramo, Silvia Bothig y Ana Paula, que han estado siempre presentes para realizar sus valiosos aportes.

Al INIA, por facilitar los recursos e instalaciones que hicieron posible el desarrollo de este trabajo. A la ANII y CAP por brindarme la financiación.

Por último y no menos importante, a mi familia y amigos, que siempre me apoyaron y estuvieron ahí para darme aliento y soporte cuando más necesitaba. Sin ese sostén, todo esto hubiera sido mucho más difícil.

Tabla de contenido

	Página
<u>Página de aprobación</u>	V
Agradecimientos	VI
Resumen	XI
Summary.....	XII
1. <u>Introducción</u>	1
1.1. Forestación en Uruguay y la relevancia actual de los pinos.....	1
1.2. Manejos silviculturales asociados a madera de calidad	1
1.2.1. <u>Raleo</u>	2
1.3. Madera de compresión	4
1.4. Justificación e hipótesis	7
1.5. Objetivos	7
1.5.1. <u>Objetivo general</u>	7
1.5.2. <u>Objetivos específicos</u>	7
2. <u>Materiales y métodos</u>	8
2.1. Descripción del sitio de muestreo	8
2.1.1. <u>Suelos</u>	8
2.1.2. <u>Clima</u>	8
2.1.3. <u>Manejo</u>	9
2.2. Instalación del ensayo y diseño experimental.....	9
2.2.1. <u>Tratamientos</u>	11
2.3. Metodología de muestreo y análisis	12
2.3.1. <u>Metodología a campo</u>	12
2.3.2. <u>Análisis visual de manchas de MC en caras de la troza</u>	12

2.3.2.1. Mancha como indicador de MC	12
2.3.2.2. Clasificación visual	13
2.3.3. <u>Muestreo para identificar la transición de madera juvenil a madera adulta</u>	14
2.3.4. <u>Metodología en aserradero</u>	15
2.3.5. <u>Análisis visual de manchas de MC en tablas verdes</u>	15
2.3.6. <u>Medición de defectos en tablas secas</u>	16
2.3.7. <u>Análisis visual de manchas de MC en discos basales</u>	17
2.3.8. <u>Análisis estadístico</u>	18
3. Resultados	20
3.1. Efecto del raleo sobre las variables de crecimiento y competencia .	20
3.2. Efecto del raleo sobre presencia de MC	22
3.2.1. <u>Mancha en caras de la troza según régimen de raleo</u>	22
3.2.2. <u>Distribución de la MC a lo largo de los anillos de crecimiento</u>	22
3.2.3. <u>Manchas de MC en tablas según régimen de raleo</u>	24
<u>3.2.4. Defectos en tablas</u>	26
3.2.4.1. Defectos en tablas según posición radial.....	26
3.2.5. <u>Defectos en tablas según régimen de raleo</u>	27
3.3. Relación de las variables dasométricas y silviculturales con la MC en de anillos de crecimiento	29
3.4. Valor predictivo de la evaluación visual de MC en trozas	30
3.4.1. <u>Relación entre la MC en las caras de las trozas y los defectos en tablas</u>	30
3.4.2. <u>Defectos en tablas según mancha en discos basales</u>	31
4. Discusión	33

4.1. Influencia del raleo sobre el crecimiento y la competencia entre los árboles.....	33
4.2. Influencia del raleo sobre la MC en trozas	33
4.3. Distribución de la MC en anillos de crecimiento	34
4.4. Influencia del raleo sobre defectos en tablas	35
4.5. Influencia de variables de crecimiento y estructura del rodal.....	35
4.6. Implicancias silvícolas	36
4.7. Valor del análisis visual de manchas en trozas	37
5. <u>Conclusiones</u>	39
6. <u>Bibliografía</u>	40
7. <u>Anexos</u>	47
7.1. Evaluation of Compression Wood Incidence Under Different Thinning Regimes in Late Rotation of Pinus taeda.....	47

Resumen

En las últimas décadas la forestación se consolidó como una de las principales actividades económicas del país. Aunque la superficie de pinos ha disminuido, *Pinus taeda* aún ocupa 128.497 hectáreas (14,5 % del área forestal plantada), destinadas a aserrío y debobinado para exportación. La calidad de estos productos puede verse afectada por la presencia de madera de compresión (MC), que genera defectos como distorsiones, rajaduras, menor estabilidad dimensional y pérdida de resistencia mecánica, lo que provoca pérdidas económicas. Su formación está influenciada por factores como pendiente, exposición al viento, material genético y manejo silvícola. Dentro de este último, el raleo es especialmente relevante, ya que modifica la competencia, disponibilidad de recursos y condiciones ambientales del rodal. Sin embargo, su efecto sobre la formación de MC aún no es claro. Este estudio evaluó la formación de MC en *Pinus taeda* bajo distintos esquemas de raleo en el norte del país. Se utilizaron árboles de 27 años provenientes de un ensayo en Tacuarembó, donde se seleccionaron cinco esquemas de raleo que representan distintas intensidades de manejo y contrastan en densidad final: 500-200, 500-325, 800-600-400, 700-450 y 1000-650 árb. ha⁻¹ remanentes. Las edades de raleo fueron 3, 6, 9 y 12 años. Se muestrearon 105 árboles, a partir de los cuales se extrajo un disco basal y una troza de cada uno. La MC fue evaluada en trozas, tablas verdes y secas y en discos basales. Los resultados indicaron que el régimen de 500-325 árb. ha⁻¹ presentó la mayor proporción de manchas y defectos asociados a MC, mientras que otro régimen aún más intensivo (500-200 árb. ha⁻¹) registró valores menores. En cambio, los regímenes moderados (800-600-400, 700-450 y 1000-650 árb. ha⁻¹) mostraron niveles más bajos y estables de MC. La MC tendió a aumentar en los años posteriores a cada raleo. Estos resultados sugieren evaluar el costo-beneficio de aplicar raleos moderados. Se encontró una correlación positiva moderada con el ancho de anillo, mientras que las asociaciones con otras variables fueron más débiles. La presencia de mancha visible en las trozas se relacionó moderadamente con la proporción de tablas defectuosas ($\rho=0,44$), lo que sugiere el potencial valor del análisis visual como herramienta práctica y de bajo costo.

Palabras clave: *Pinus taeda*, madera de compresión, raleo

Evaluation of the Impact of Thinning on the Incidence of Compression Wood in

***Pinus taeda* at Final Harvest Age**

Summary

Over the last decades, forestry has become one of the country's main economic activities. Although the area planted with pines has decreased, *Pinus taeda* still covers 128,497 hectares (14.5% of the planted forest area), mainly destined for sawn timber and veneer production for export. The quality of these products may be affected by the presence of compression wood (CW), which causes defects such as distortion, checking, reduced dimensional stability, and loss of mechanical strength, resulting in economic losses. Its formation is influenced by slope, wind exposure, genetic material, and silvicultural management. Thinning is particularly relevant, as it modifies competition, resource availability, and stand conditions. However, its effect on CW formation remains unclear. This study evaluated CW formation in *Pinus taeda* under different thinning regimes in northern Uruguay. Twenty-seven-year-old trees from a trial in Tacuarembó were used. Five thinning regimes representing different management intensities and final stand densities were selected: 500–200, 500–325, 800–600–400, 700–450, and 1000–650 remaining trees.ha⁻¹. Thinnings were carried out at ages 3, 6, 9, and 12 years. A total of 105 trees were sampled, and one basal disc and one log were collected from each tree. Compression wood was assessed in logs, green and dried boards, and basal discs. The results showed that the 500–325 trees.ha⁻¹ regime had the highest proportion of CW-related staining and defects, whereas the more intensive 500–200 trees.ha⁻¹ regime showed lower values. In contrast, the moderate regimes (800–600–400, 700–450, and 1000–650 trees. ha⁻¹) exhibited lower and more stable CW levels. Compression wood tended to increase following each thinning operation. These results suggest evaluating the cost-benefit of moderate thinning regimes. A moderate positive correlation was found between CW and ring width, whereas associations with other variables were weaker. Visible staining in logs was moderately associated with the proportion of defective boards ($\rho=0.44$), suggesting that visual assessment may be a practical and low-cost tool.

Keywords: *Pinus taeda*, compression wood, thinning

1. Introducción

1.1. Forestación en Uruguay y la relevancia actual de los pinos

En Uruguay, la superficie destinada a plantaciones forestales ha aumentado de manera sostenida desde la promulgación de la Ley Forestal n.º 15.939 en 1987 y actualmente supera el millón de hectáreas (Gautreau, 2014). Las especies utilizadas han sido principalmente de rápido crecimiento, destacándose los géneros *Pinus* y *Eucalyptus*.

Dentro del género *Pinus*, las especies más representativas han sido *Pinus elliottii* y, principalmente, *Pinus taeda*. Aunque la superficie destinada a estos últimos se ha reducido en los últimos años, aún ocupa 128.497 hectáreas, equivalentes al 14,5 % del total del área forestal plantada en el país. Estas plantaciones se concentran mayoritariamente en el norte del país, en los departamentos de Tacuarembó y Rivera (MGAP-DGF, 2024). Sus principales destinos industriales son el aserrío y el debobinado.

La forestación se ha consolidado como una de las principales actividades económicas del país. En 2024, el sector forestal alcanzó un récord histórico de exportaciones, con un total de USD 3.045 millones, lo que representó un incremento del 20 % respecto al año anterior, con lo que se consolidó como el principal rubro exportador nacional (MGAP-DGF, 2025). Este desempeño estuvo liderado por la celulosa, que explicó el 84 % del valor exportado, seguida por la madera aserrada.

En particular, la madera aserrada de coníferas mostró un crecimiento notable y alcanzó los 634.000 m³ exportados, con un aumento cercano al 10 % interanual. En términos de valor, las exportaciones de coníferas totalizaron USD 102.202.000, lo que representa aproximadamente el 60 % del total de madera aserrada (MGAP-DGF, 2025). Esta tendencia reafirma la creciente importancia de la industrialización de la madera de pino en la cadena foresto-industrial del país.

1.2. Manejos silviculturales asociados a madera de calidad

La calidad de la madera en plantaciones está fuertemente influenciada por las decisiones de manejo aplicadas a lo largo de la rotación. Prácticas como la poda, el

raleo, la fertilización y el espaciamiento modifican características como la forma del tronco, la proporción de madera juvenil, la densidad y la presencia de nudos (Espinosa y Muñoz, 2005). Principalmente las podas y los raleos son consideradas inversiones en la calidad del producto final y permiten direccionar el manejo hacia objetivos industriales más exigentes. La poda tiene como objetivo eliminar ramas vivas en las primeras etapas del desarrollo del árbol para reducir el tamaño y la cantidad de nudos, lo que permite la formación de un cilindro de madera libre de defectos visibles. Esta práctica, cuando es bien planificada, permite obtener un mayor volumen de madera libre de nudos o *clear*, lo que incrementa su valor comercial (Hart, 2010).

1.2.1. Raleo

El raleo es una intervención silvícola que consiste en la remoción selectiva de árboles con el objetivo de regular la densidad del rodal y modificar las relaciones de competencia entre individuos. Esta práctica permite controlar la disponibilidad y distribución de recursos como luz, agua y nutrientes, favoreciendo el crecimiento y desarrollo de los árboles remanentes. Los métodos de raleo pueden clasificarse según los árboles que se extraen y el patrón espacial de la remoción. Entre ellos se encuentra el raleo por lo bajo, que implica la remoción de árboles suprimidos e intermedios; el raleo por lo alto, que consiste en la extracción de competidores directos de los árboles dominantes; el raleo selectivo, basado en la elección individual de árboles en función de su calidad, vigor y forma del fuste; y el raleo sistemático, que remueve árboles siguiendo un patrón fijo, como por ejemplo en determinadas filas (Smith et al., 1997; Nyland, 2016; Grigoreva et al., 2021; Segtowich et al., 2023).

En general, la intervención se recomienda cuando se produce el cierre de copas y comienza a observarse una reducción en el crecimiento individual, lo que indica limitación en la disponibilidad de recursos. Para objetivar esta decisión, se utilizan indicadores como el número de árboles por hectárea, el área basal y el índice de densidad del rodal.

La cuantificación de la competencia es fundamental para programar los raleos de forma objetiva. Entre los indicadores más utilizados se encuentra el índice de densidad del rodal (IDR) propuesto por Reineke, el cual describe la relación entre el

número de árboles por hectárea (N) y el diámetro cuadrático medio (dg), permitiendo comparar el nivel de ocupación del sitio entre rodales de distinta estructura:

$$\text{IDR} = N \times (\text{dg} / 25,4)^{1,605}$$

donde 1,605 corresponde al exponente empírico definido por Reineke (1933). Este índice permite establecer umbrales de manejo en función de la densidad máxima potencial del rodal, identificando niveles a partir de los cuales la competencia comienza a limitar el crecimiento individual.

De forma complementaria, el índice de espaciamiento relativo de Hart-Becking (S%) relaciona el espaciamiento medio entre árboles con la altura dominante del rodal, proporcionando una medida de la disponibilidad de espacio de crecimiento:

$$S\% = (\sqrt{(10000 / N)} / H_0) \times 100$$

donde H_0 corresponde a la altura dominante. Valores bajos de S% indican alta competencia, mientras que valores más altos reflejan una menor ocupación del sitio. En plantaciones de coníferas, estos indicadores son ampliamente utilizados como herramientas de referencia para definir el momento e intensidad de los raleos (Reineke, 1933; Castedo-Dorado et al., 2009).

El desarrollo de los rodales puede verse afectado por la intensidad, el método de raleo y el momento de estas intervenciones. Una mayor intensidad de raleo implica una menor cantidad de árboles remanentes y, en consecuencia, una reducción del volumen total en pie del rodal en el momento de la intervención, aunque los árboles remanentes tienden a incrementar su crecimiento individual en los años posteriores. Además de modificar la distribución de la biomasa, el raleo también influye en la estructura del rodal y en la relación entre los árboles remanentes (Mäkinen e Isomäki, 2004).

Como regla general, los árboles remanentes tienden a crecer más en diámetro, desarrollan copas más grandes y ramas de mayor grosor (Gort et al., 2010), aunque la magnitud de este patrón depende del potencial de crecimiento del sitio, de la intensidad del raleo aplicado y de la edad de la población en el momento en que se realiza la intervención (Meneses y Velasco, 1992).

1.3. Madera de compresión

La MC es un tipo de madera de reacción que presentan las especies coníferas. De acuerdo con Timell (1986), es una reacción de los árboles al estrés mecánico para compensar el desnivel de las cargas de peso en el tronco o en la copa para corregir una inclinación o reorientación de posición para lograr acceso a más luz.

Se encuentra generalmente en la parte inferior de las ramas gruesas o en árboles inclinados. Su incidencia tiende a ser mayor en las secciones basales del fuste y disminuir hacia la parte superior del árbol (Maclaren, 2002). Generalmente se asocia con árboles inclinados o curvados, pero también puede aparecer en árboles con inclinaciones mínimas o nulas (Duncker y Spiecker, 2014).

La MC presenta características marcadamente distintas a las de la madera normal, con alteraciones en sus propiedades físicas, químicas y mecánicas (Duncker y Spiecker, 2014). Desde el punto de vista anatómico, se distingue por la presencia de fibras más cortas, con paredes celulares más gruesas y ausencia de la capa S3. Las traqueidas adoptan secciones más redondeadas, con mayores espacios intercelulares, y se observa un elevado contenido de lignina y galactanos en las capas S1 y S2, junto con una reducción en la proporción de lignina en la lámina media. Además, es común la aparición de cavidades helicoidales y un incremento en el ángulo microfibrilar de la capa S2 (Donaldson et al., 2004; Timell, 1986).

El color de la MC es distinto al de la madera normal, presentando una tonalidad café rojiza más oscura. Esta coloración se asocia al mayor espesor de las paredes celulares y a su alto contenido de lignina, características similares a las de la madera tardía (Díaz-Vaz et al., 2007).

La característica física más evidente de la MC es el aumento del peso específico, en referencia al de madera normal equivalente (Tomazello y Silva, 1987). Díaz-vaz et

al. (2009) indicaron que los valores de densidad son un 8 % más altos en la MC para *Pinus radiata*. Este aumento de la densidad se debe principalmente a que las paredes celulares son más gruesas en la MC (Timell, 1986).

Las características de la madera de compresión afectan negativamente la calidad de los productos derivados. En madera aserrada, se asocian a problemas de estabilidad dimensional y deformaciones, mientras que en tableros de fibras y partículas modifican sus propiedades físicas y mecánicas. Asimismo, influyen en los procesos de pulpaje, la permeabilidad de la madera y su comportamiento durante el secado (Díaz-Vaz et al., 2007).

Según Maclaren (2002), la MC es una de las principales causas de inestabilidad y deformación en la madera aserrada. Además de generar torceduras, reduce la resistencia y elasticidad de los productos obtenidos, y puede provocar desajustes e incluso roturas en los procesos industriales (Wimmer y Johansson, 2013). Estos problemas se deben principalmente a su elevada contracción e hinchazón longitudinal en comparación con la madera normal, la cual puede alcanzar valores de entre 1 % y 8 % a lo largo del eje de las fibras (Wloch, 1975).

La inestabilidad dimensional longitudinal, relacionada con la humedad, es un problema al usar la madera en cualquier aplicación estructural (McLean et al., 2014). La característica anterior puede ser explicada por el aumento del ángulo microfibrilar en la capa S2 de la pared celular de la MC, lo que promueve un mayor componente de cambios en la dimensión (Xu et al., 2011).

La madera de compresión presenta menores propiedades de tracción y módulo de elasticidad, pero una mayor densidad que la madera normal. La baja resistencia a la tracción a lo largo del eje de la célula puede ser explicada por la presencia de cavidades espiraladas en la pared celular de MC (Timell, 1986).

La formación de este tipo de madera se origina como respuesta a tensiones mecánicas, principalmente asociadas a la acción de la gravedad sobre el fuste. Sin embargo, distintos factores pueden generar o intensificar estos desequilibrios, como la acción del viento, la inclinación del árbol o el desarrollo asimétrico de la copa. Asimismo, variables como la velocidad de crecimiento, el material genético y el manejo silvícola pueden influir en la magnitud y frecuencia de aparición de la MC, al modificar la arquitectura del árbol y su respuesta a dichas tensiones (Herman, 1988; Malan, 2002; Westing, 1965).

1.3.1. Raleos y madera de compresión

Dentro del manejo silvícola, los raleos se distinguen como importantes. Según Schweitzer (2016), los raleos severos se han asociado a un aumento en la formación de MC. En la misma línea, Bamber y Burley (1983) sostienen que los raleos podrían favorecer la aparición de este tipo de madera anormal al alterar la posición de equilibrio de los fustes en el plano vertical. La apertura del dosel posterior al raleo estimula el crecimiento lateral de la copa y puede inducir inclinaciones en los troncos, condiciones que propician la formación de MC. Además, el aumento del espacio entre árboles incrementa la exposición al viento, lo que podría intensificar aún más este efecto.

En este sentido, Cown (1974) observó que, en *Pinus radiata*, la formación de MC se relacionó directamente con el incremento de la velocidad de crecimiento posterior al raleo y alcanzó hasta un 20 % del volumen del primer trozo en los cinco años siguientes a la intervención. El autor sugiere que este fenómeno podría estar vinculado a cambios hormonales, como un aumento en la producción de auxinas derivado del mayor desarrollo de la copa, o bien al incremento del movimiento oscilatorio del fuste por efecto del viento, actuando ambos como estímulos para la formación de esta madera de reacción. Cameron (2008), por otro lado, encontró que los árboles no raleados presentaron una incidencia significativamente mayor de MC, hasta tres veces mayor que los raleados. Según su estudio, la falta de raleo provocó una alta competencia por espacio dentro del dosel, lo que obligó a los árboles a priorizar el crecimiento en altura en lugar del crecimiento en diámetro y las raíces.

Esto resultó en árboles altos y delgados, inherentemente inestables. Como consecuencia, se cree que el desarrollo de MC en rodales con alta densidad se debe en gran parte a los movimientos fototróficos que los árboles realizan en respuesta a la competencia por la luz (Barger y Ffolliott, 1976).

1.4. Justificación e hipótesis

La MC tiene un impacto negativo en la calidad de los productos aserrados, por lo que resulta esencial comprender los factores que contribuyen a su formación. Entre las prácticas silvícolas, el raleo es una de las principales herramientas de manejo en *Pinus taeda*. La formación de MC está asociada a tensiones en el fuste generadas por desequilibrios en la distribución de cargas, como la exposición al viento o el desarrollo de copas asimétricas, condiciones que pueden verse modificadas por intervenciones silvícolas como el raleo. Sin embargo, la mayoría de los estudios disponibles se han concentrado en otras especies o condiciones de plantación (Cameron, 2008; Cown, 1974; Schweitzer, 2016). Este trabajo parte de la hipótesis de que los raleos más severos generarán una mayor incidencia de madera de compresión en *Pinus taeda*.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Evaluar la incidencia de distintos regímenes de raleo sobre la presencia de MC en *Pinus taeda* a turno final.

1.5.2. Objetivos específicos

- 1) Comparar la presencia de MC en *Pinus taeda* bajo cinco regímenes de raleo.
- 2) Analizar la relación entre la presencia de MC y los defectos observados en las tablas aserradas.
- 3) Analizar la relación entre la presencia de MC y las variables de crecimiento y competencia del rodal.
- 4) Evaluar la utilidad de la calificación visual de trozas como herramienta predictiva de las deformaciones registradas en tablas.

2. Materiales y métodos

2.1. Descripción del sitio de muestreo

El estudio se llevó a cabo en un ensayo de raleo de *Pinus taeda* ubicado en el predio La Tuna, en el departamento de Tacuarembó (Uruguay), sobre la ruta 5, kilómetro 419, coordenadas 31° 33' 22'' S, 55° 44' 40'' O.

2.1.1. Suelos

Los suelos en el área de estudio pertenecen a los grupos Coneat 7.2 y 7.41, ambos formados sobre areniscas Tacuarembó, caracterizados por su gran profundidad, textura liviana y alta acidez. Estos suelos tienen una baja fertilidad y un riesgo de moderado a alto de erosión.

Suelos del grupo Coneat 7.2 predominan en el sector A del ensayo (descrito en punto 2.2.). Estos suelos pertenecen a las unidades Rivera y Tacuarembó, son moderadamente profundos, bien drenados, y presentan una baja fertilidad natural, lo que los hace aptos para la producción de pasturas y forestales, aunque con un alto riesgo de erosión.

Suelos del grupo Coneat 7.41 predominan en el sector B (descrito en punto 2.2.), con un material geológico compuesto por areniscas de Tacuarembó y basalto. Los suelos de esta unidad son más arenosos y poseen una fertilidad extremadamente baja, siendo aptos también para actividades agro-silvo-pastoriles, pero con limitaciones similares a las del grupo 7.2 (Durán, 1987).

2.1.2. Clima

El clima de la región se clasifica como húmedo templado. Las precipitaciones anuales oscilan entre 1000 y 1600 mm, distribuidas de manera uniforme a lo largo del año. La temperatura media anual es de 18 °C, con medias de 24 °C en verano y 12 °C en invierno. Los períodos de mayor pluviosidad corresponden a los meses de marzo-abril y octubre-diciembre. Los datos climáticos corresponden a la estación meteorológica de Rivera, considerando el período 1991-2020 de INUMET, ubicada a aproximadamente 76 km del sitio experimental (Inumet, 2021).

2.1.3. Manejo

La plantación se realizó en junio de 1997 a una densidad de 1000 árb. ha⁻¹, con espaciamiento de 4 m entre hileras y 2,5 m entre plantas, utilizando semillas de un huerto semillero de polinización abierta proveniente de la región *coastal plain*, Estados Unidos. No se aplicaron fertilizantes. El control de malezas se realizó con herbicida en franjas y el de hormigas, en forma sistemática al inicio y posteriormente de forma localizada.

El ensayo fue podado en cinco oportunidades. La primera poda se realizó en 2002, hasta la altura donde el árbol tenía 8 cm, y la última en 2006, alcanzando los 7 m de altura. En cada intervención se evitó remover más del 40 % de la copa viva, a fin de minimizar impactos negativos sobre la tasa de crecimiento.

En el año de la instalación del ensayo se aplicó con mochila una mezcla de dos herbicidas preemergente y posemergente, imazapir y sulfometurón metil, en la entrefila a razón de 0,5 l. ha⁻¹ y 140 g. ha⁻¹, respectivamente.

2.2. Instalación del ensayo y diseño experimental

El ensayo fue instalado en el año 2000, cuando la plantación tenía 3 años de edad, sobre una superficie total de 5,22 ha. Se delimitaron 57 parcelas de 30 x 30 m (900 m² cada una), dispuestas en dos sectores diferenciados según la exposición de la ladera y el grupo de suelos predominante (figura 1).

Sector A: comprende 32 parcelas ubicadas sobre una ladera con exposición este-noreste. Predomina el grupo de suelos Coneat 7.2.

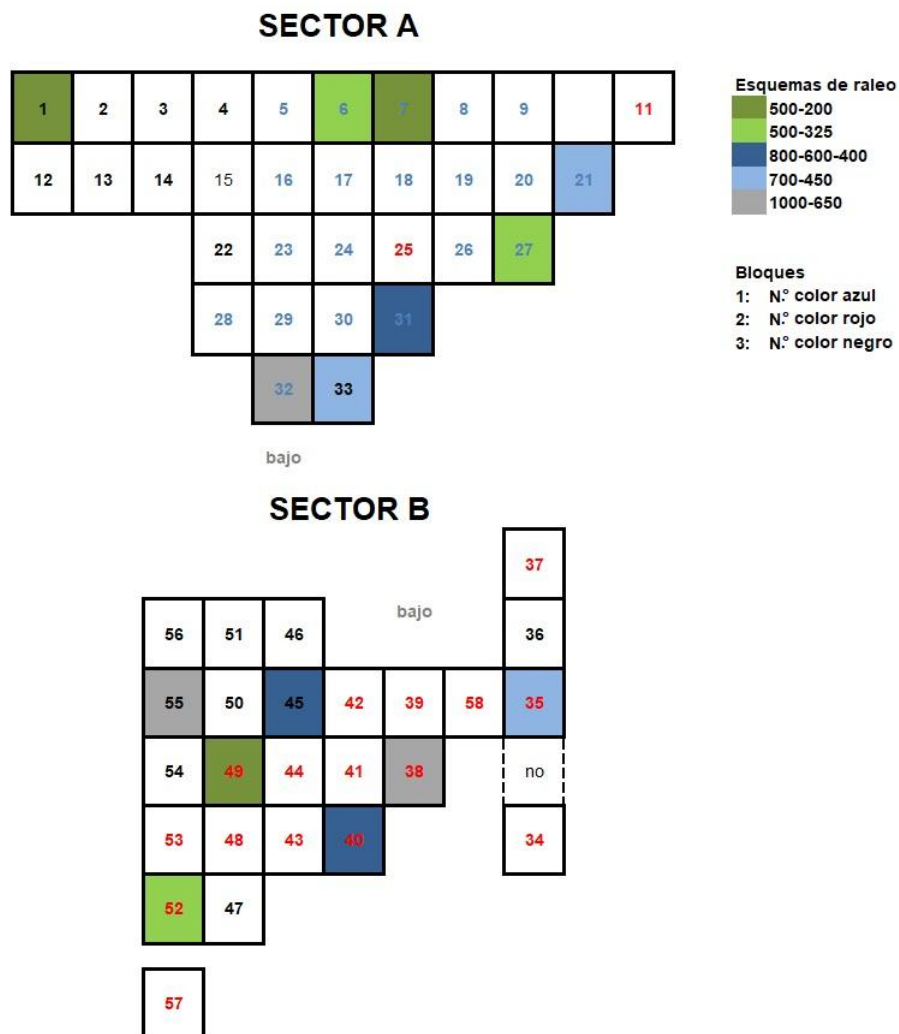
Sector B: incluye 25 parcelas ubicadas en una ladera con exposición noreste, donde domina el grupo Coneat 7.41.

El diseño adoptado fue un bloque completo al azar (BCA), conformado por tres bloques y diecinueve tratamientos asignados aleatoriamente dentro de cada uno. Los bloques se definieron según el área basal al momento de la instalación del ensayo. Para definir los bloques, las parcelas fueron clasificadas en tres grupos de tamaño equivalente según el área basal (AB) promedio por parcela:

- Bloque 1: $AB > 4,47 \text{ m}^2/\text{ha}$.
- Bloque 2: $3,96 \leq AB \leq 4,47 \text{ m}^2/\text{ha}$.
- Bloque 3: $AB < 3,96 \text{ m}^2/\text{ha}$.

Figura 1

Croquis del ensayo.



2.2.1. Tratamientos

Los diecinueve tratamientos del ensayo consisten en regímenes de raleo con distintos números de intervenciones, edades en las que se aplicaron, intensidad y densidad remanente final, e intervalos entre sucesivos raleos. En todos los tratamientos, el tipo de raleo aplicado fue selectivo por lo bajo, es decir seleccionando los árboles de menor tamaño. Además de tener en cuenta el diámetro, se tuvo en cuenta la rectitud del fuste, la sanidad, la presencia de horquetas o brotes múltiples y grosor y ángulo de inserción de ramas (Uranga, 2017).

Para este estudio se seleccionaron cinco tratamientos, con el criterio de que fueran representativos de los regímenes de raleo aplicados actualmente por las empresas forestales en Uruguay y que además abarcaran el rango de densidades finales presentes en el ensayo (tabla 1).

Tabla 1

Descripción de los tratamientos seleccionados

Régimen de raleo	Densidad inicial (árb. ha ⁻¹)	Densidad remanente teórica post raleos (árb. ha ⁻¹)				Densidad final real (árb. ha ⁻¹)
		Edad (años)				
		3	6	9	12	
500- 200	1000	500		200		204
500-325	1000	500			325	304
800- 600- 400	1000	800	600	400		393
700-450	1000	700			450	437
1000-650	1000				650	559

2.3. Metodología de muestreo y análisis

2.3.1. Metodología a campo

Se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP) de todos los árboles en cada parcela y se definieron clases diamétricas para cada tratamiento. La selección de los individuos, para ser apeados y posteriormente muestreados, se basó en la distribución del DAP dentro de esas clases, siguiendo la frecuencia relativa de cada una para asegurar una representación equilibrada de los distintos tamaños de árboles. En total se seleccionaron 105 individuos, equivalentes a siete por parcela y veintiuno por tratamiento.

Se aparearon los árboles seleccionados y se extrajo un disco de aproximadamente 5 cm de espesor del extremo basal del fuste, utilizado para la evaluación visual de manchas de MC en los anillos de crecimiento. También se obtuvo una troza desde la base hasta los 3,5 m destinada al aserrado y posterior análisis de la presencia de MC en las tablas obtenidas.

2.3.2. Análisis visual de manchas de MC en caras de la troza

2.3.2.1. Mancha como indicador de MC

En este estudio la MC fue identificada mediante la evaluación visual de las áreas manchadas en discos, trozas y tablas. El uso de este tipo de mancha como un indicador indirecto de MC se sustentó en análisis anatómicos previos realizados en *Pinus taeda*

bajo condiciones de sitio y manejo similares, donde se determinó que las regiones manchadas con coloración marrón presentaron de forma consistente características anatómicas asociadas a la MC, como fibras más cortas y paredes celulares más gruesas (Casaravilla, 2022).

2.3.2.2. Clasificación visual

Las trozas fueron evaluadas visualmente en su cara basal y superior y se clasificó la extensión de las manchas de MC en una escala de 0 a 3. Se asignaron los siguientes valores: 0 para trozas sin mancha, 1 para manchas que cubrían hasta $1/3$ del área de la sección transversal, 2 para manchas que cubrían entre $1/3$ y $2/3$, y 3 para manchas que abarcaban más de $2/3$ del área. Estas proporciones se estimaron de forma visual a partir de la superficie total de la cara como referencia. Para ello, las manchas cercanas entre sí se interpretaron como parte de una misma zona afectada, aun cuando presentaran pequeñas discontinuidades. Es decir, la clasificación no se basó en sumar cada mancha por separado, sino en estimar qué proporción de la superficie total de la cara estaba ocupada por la zona afectada en su conjunto.

Como este análisis se realizó en ambas caras de cada troza, posteriormente se calculó el promedio de ambas evaluaciones y se asignó un único valor a la troza como indicador del área afectada por la mancha.

Figura 2

Ejemplos de cada categoría de mancha de MC en las caras de las trozas: *a)* categoría 0, *b)* categoría 1, *c)* categoría 2, *d)* categoría 3.



2.3.3. Muestreo para identificar la transición de madera juvenil a madera adulta

Se realizó un muestreo previo adicional al del trabajo de tesis con el objetivo de establecer con precisión la transición entre madera juvenil y adulta y así evitar que los defectos propios de la madera juvenil se confundieran con los asociados a la MC. Para ello se analizaron diez discos obtenidos del mismo sitio del ensayo, seleccionados según clase diamétrica: tres de clases inferiores, cuatro de clase media y tres de clases superiores, correspondientes a un tratamiento de intensidad de raleo intermedia.

Por razones prácticas, los anillos de crecimiento se agruparon en clases, aunque los anillos de algunas edades (que, según la bibliografía, podrían corresponder a la edad de transición), fueron analizados individualmente. Las clases definidas fueron para los siguientes números de anillos de crecimiento: 0-3, 4-6, 7-9, 10, 11, 12, 13-16,

17-20 y 21-24 (nueve categorías). Estudios previos en *Pinus taeda* han estimado que la transición ocurre alrededor de los 10 años de edad (Larson et al., 2001; Zobel y van Buijtenen, 1989).

Se extrajo material solamente del leño temprano. Las muestras fueron maceradas siguiendo el protocolo de Kraus y Arduin (1997), utilizando una mezcla de peróxido de hidrógeno y ácido acético, con digestión en horno a 60-70 °C durante 48 horas. Posteriormente se tiñeron con safranina para facilitar la medición del largo de fibras y se realizaron 25 mediciones por categoría utilizando lupa estereoscópica y el software AmScope.

2.3.4. Metodología en aserradero

Las trozas se aserraron mediante cortes paralelos sucesivos, donde se obtuvieron tablas de una pulgada de espesor, equivalentes a dimensiones comerciales. En primer lugar, se retiró un costanero exterior, de modo de obtener la primera tabla limpia sin corteza en ninguna cara. Las tablas no fueron canteadas, por lo que conservaron corteza en sus bordes. Se procesaron 105 trozas, de las cuales se obtuvieron entre 9 y 15 tablas por troza, con un total de 1144 tablas evaluadas.

Durante el proceso, se separaron intencionalmente las tablas provenientes de la porción interna del fuste, que contiene madera juvenil, de aquellas obtenidas de la zona externa, donde se esperaba la presencia de madera adulta.

2.3.5. Análisis visual de manchas de MC en tablas verdes

Las tablas obtenidas de cada troza fueron categorizadas previo al secado según la mancha de MC, en una escala de 0 a 3. Se asignaron los siguientes valores: 0 para aquellas tablas sin mancha; 1 para las que presentaban manchas que cubrían hasta 1/3 del área de la tabla; 2 para las que cubrían hasta 2/3 del área y 3 para aquellas en las que la mancha abarcaba más de 2/3 del área. Este análisis visual se realizó en ambas caras principales de cada tabla, se calcularon el máximo y el promedio y se le asignó un solo valor a la tabla, indicador del área afectada por la mancha.

2.3.6. Medición de defectos en tablas secas

Las tablas fueron secadas en un horno convencional de carga frontal, bajo condiciones controladas de temperatura de bulbo seco de 93 °C, temperatura de bulbo húmedo de 65 °C, velocidad del aire de 8 m/s y un contenido de humedad final del 12 %.

Tras el secado, se evaluaron los principales defectos dimensionales: abarquillado, curvatura de cara y torcedura. Las mediciones se realizaron con regla sobre una superficie plana y estable de longitud suficiente para apoyar completamente las tablas, siguiendo los criterios establecidos en la norma UNIT 1461 (UNIT, 2010).

A partir de estas mediciones, en lugar de utilizar los valores absolutos de cada defecto, se realizó una clasificación en dos categorías: tablas con defecto y sin defecto. Esta reclasificación se basó en la comparación de los valores medidos con umbrales máximos aceptables para cada tipo de deformación, definidos según criterios de clasificación industrial de calidad.

Se consideraron sin defectos aquellas tablas que se encontraban dentro de los límites correspondientes a la categoría de mayor calidad (clear), mientras que aquellas que superaban dichos límites fueron clasificadas como con defectos.

Tabla 3

Límites de deformación para la clasificación de tablas y su agrupación en categorías utilizadas en el estudio

Categoría	Curv. cara (mm)	Curv. canto (mm)	Torcedura (mm)	Abarquillado (mm)	Posibles usos	
Clear	20	20	20	2	Muebles	} SIN DEFECTOS
Col A	30	30	30	5	Molduras	
IND	30	30	30	5	Packing	
B grade	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Encofrado	

Se realizaron los cálculos del porcentaje de tablas con defectos respecto al total de tablas obtenidas de la troza basal, así como del porcentaje de árboles en los que más del 50 % de las tablas provenientes de dicha troza fueron clasificadas como con defectos

2.3.7. Análisis visual de manchas de MC en discos basales

Se llevó a cabo un análisis visual de manchas de MC en los discos basales de todos los árboles seleccionados. Cada disco se dividió en octantes mediante el trazado de radios equidistantes y se evaluó la presencia de manchas en las secciones definidas por la intersección entre los límites de los anillos de crecimiento y los radios de cada octante. Para facilitar la observación, la superficie se humedeció con agua, lo que permitió aumentar el contraste de colores. La clasificación se efectuó en tres niveles: 0 para ausencia de mancha, 0,5 cuando la mancha ocupaba hasta el 50 % del área de la sección, y 1 cuando la mancha ocupaba más del 50 % del área de la sección. La asignación de estas categorías se realizó mediante estimación visual de la proporción de área afectada en cada sección.

Se midió el ancho de los anillos con regla a lo largo de cada radio para estimar el área de cada sección, la cual se multiplicó por el valor asignado según la categoría visual con el fin de ponderar la proporción afectada por MC. El área total de MC por anillo se obtuvo mediante la suma de las secciones ponderadas y se expresó como porcentaje del área total del anillo. Finalmente, el valor de MC de cada disco se calculó como la sumatoria de los valores de todos los anillos y se expresó como porcentaje del disco ocupada por mancha.

A partir de la evolución temporal de la proporción de MC por anillo, se calculó el área bajo la curva (AUC) para cada tratamiento, considerando el período posterior al anillo 9, con el objetivo de resumir la intensidad acumulada de MC a lo largo del tiempo.

Figura 4

Análisis visual del disco basal mediante el método de octantes.



2.3.8. Análisis estadístico

Dado que varias variables analizadas no cumplieron con el supuesto de normalidad, se aplicaron pruebas no paramétricas. Se utilizaron pruebas de Kruskal-Wallis para evaluar el efecto de los regímenes de raleo sobre el porcentaje de tablas con defectos, la calificación de manchas en tablas, la calificación de manchas en trozas y el porcentaje de MC en anillos de crecimiento. Cuando se observaron diferencias significativas, se realizaron comparaciones múltiples *a posteriori* mediante la prueba de Dunn ($p < 0,05$).

Complementariamente, se realizaron análisis de correlación de Spearman (ρ) para explorar la relación entre la incidencia de MC en discos basales y distintas variables silviculturales y dasométricas, incluyendo el área basal (G , m^2/ha), el índice de densidad del rodal (SDI), la edad del rodal (E , años), el diámetro a 1,3 (DAP, cm), la altura total (Ht , m), la relación Ht/DAP , la edad al raleo (Er , años), el número de árboles por hectárea (N) y el ancho de anillo (Aa , mm). El SDI fue calculado mediante

la fórmula de Reineke (Reineke, 1933). Todos los análisis se realizaron con el software InfoStat.

3. Resultados

3.1. Efecto del raleo sobre las variables de crecimiento y competencia

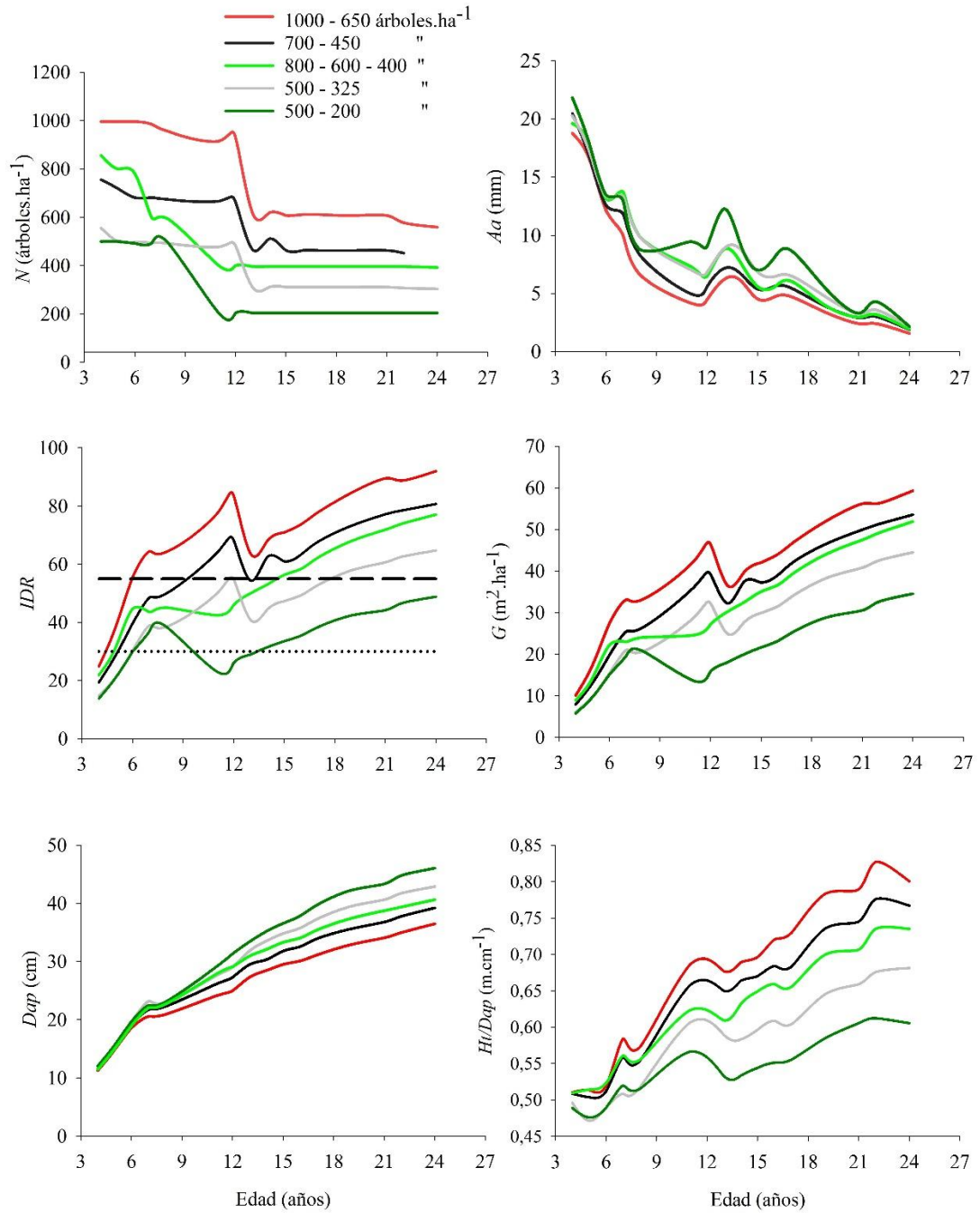
Las variables de crecimiento y competencia mostraron trayectorias diferenciadas entre los regímenes de raleo a lo largo de la rotación (figura 5). En términos generales, los tratamientos con menor densidad presentaron mayores valores de crecimiento individual, evidenciado en mayores valores de DAP, mientras que los tratamientos de mayor densidad mostraron valores más altos de la relación Ht/DAP , reflejando un mayor crecimiento relativo en altura en comparación con el diámetro.

El área basal (G) fue consistentemente mayor en los tratamientos de mayor densidad, como consecuencia del mayor número de árboles por hectárea. Por el contrario, los tratamientos con raleos más intensos presentaron valores menores de G , aunque con incrementos más sostenidos hacia el final del turno.

En relación con el crecimiento radial, el ancho de anillo presentó un incremento posterior a las intervenciones de raleo, con un máximo luego del raleo aplicado a los 12 años, coincidiendo con una reducción en los niveles de competencia (SDI). Los regímenes menos intensivos (1000–650 y 700–450 árboles·ha⁻¹) mantuvieron niveles de competencia más elevados durante gran parte de la rotación, mientras que los tratamientos más intensivos (500–200 y 500–325 árboles·ha⁻¹) mostraron una menor competencia inicial seguida de un incremento progresivo.

Figura 5

Evolución de valores promedio de parámetros dendrométricos y silviculturales para cada esquema de raleo.



N: número de árboles por hectárea ($\text{árb.} \cdot \text{ha}^{-1}$); G: área basal ($\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$); IDR: índice de densidad del rodal; DAP: diámetro a la altura del pecho (cm); Ht/DAP: relación altura/diámetro; Aa: ancho de anillo (mm).

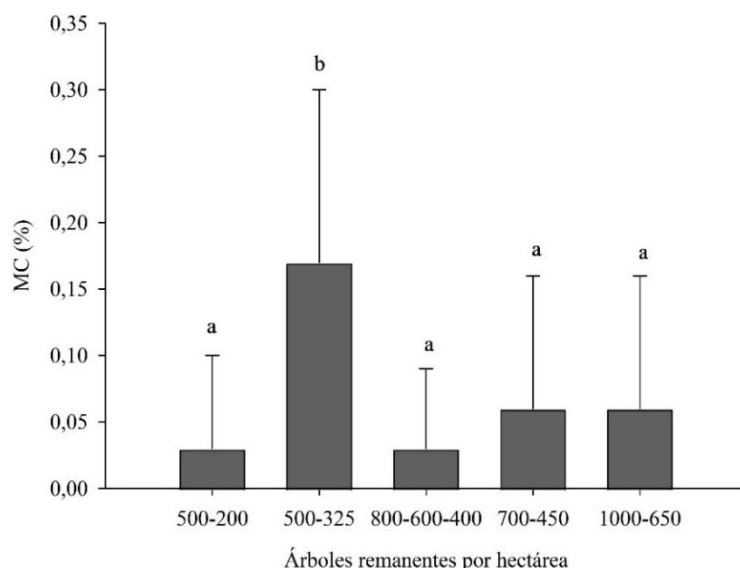
3.2. Efecto del raleo sobre presencia de MC

3.2.1. Mancha en caras de la troza según régimen de raleo

En general, los niveles de presencia de MC fueron bajos en todos los tratamientos, aunque el análisis mostró diferencias significativas entre ellos (figura 6). El régimen de raleo de 500-325 árb. ha^{-1} presentó el valor promedio más alto de calificación visual de manchas, significativamente superior al resto, los cuales mostraron valores más bajos y homogéneos sin diferencias significativas entre sí.

Figura 6

Valores promedio ($\pm$ error estándar) de MC en la cara de la troza para cada régimen de raleo.

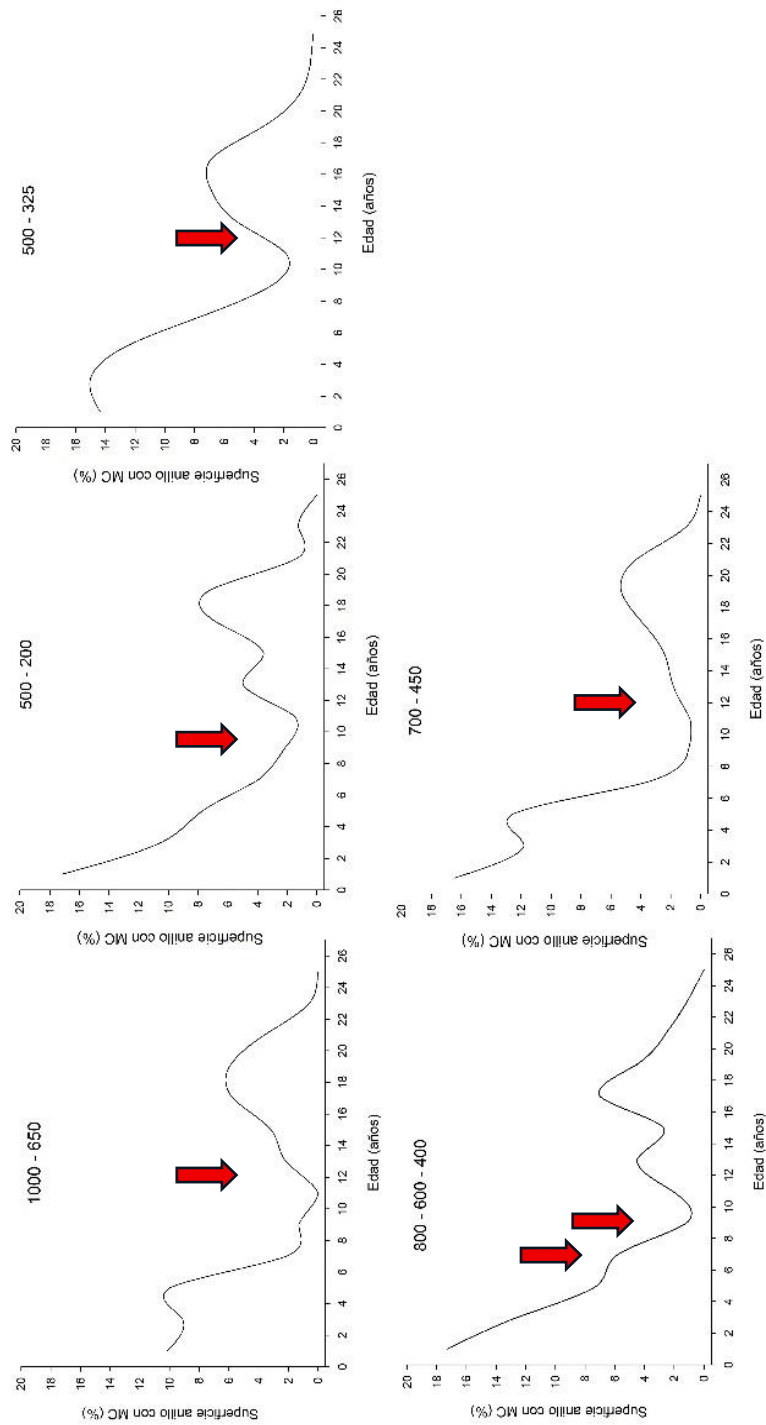


3.2.2. Distribución de la MC a lo largo de los anillos de crecimiento

La proporción de la MC varió a lo largo de los años en todos los regímenes de raleo (figura 7). En general, se observó un aumento en la proporción de la MC en los años posteriores a cada intervención, lo que sugiere una respuesta consistente al raleo.

Figura 7

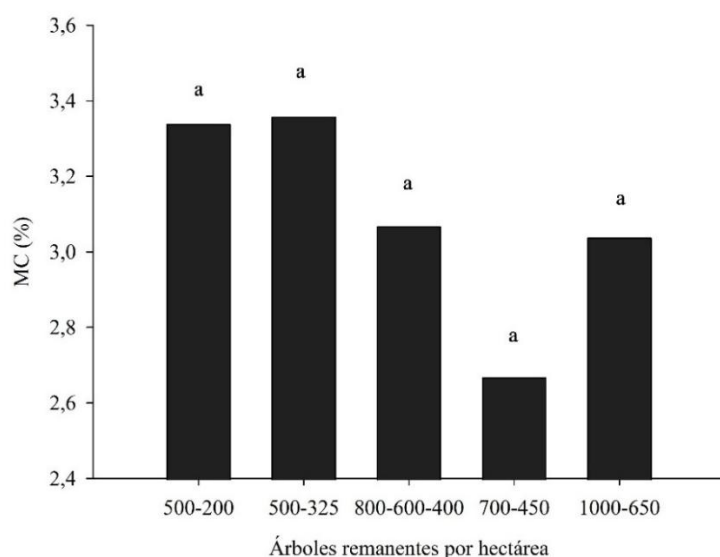
Evolución temporal de la proporción de la MC en anillos de crecimiento para cada régimen de raleo (las flechas indican la edad de los raleos posteriores al primero).



El área bajo la curva (AUC) de la proporción de MC, calculada a partir del anillo nueve para representar el período posterior al raleo, no mostró diferencias significativas entre regímenes (figura 8). Sin embargo, los valores medios más bajos correspondieron a los raleos moderados (800-600-400 y 700-450 árb. ha⁻¹), mientras que los regímenes más intensos (500-325 y 500-200 árb. ha⁻¹) presentaron valores más elevados, lo que sugiere una tendencia en ese sentido. En esta variable se confirma lo registrado en las caras de las trozas, donde en todos los regímenes los niveles de MC fueron relativamente bajos.

Figura 8

Área bajo la curva (AUC) de la proporción de MC en anillos de crecimiento para cada régimen de raleo.



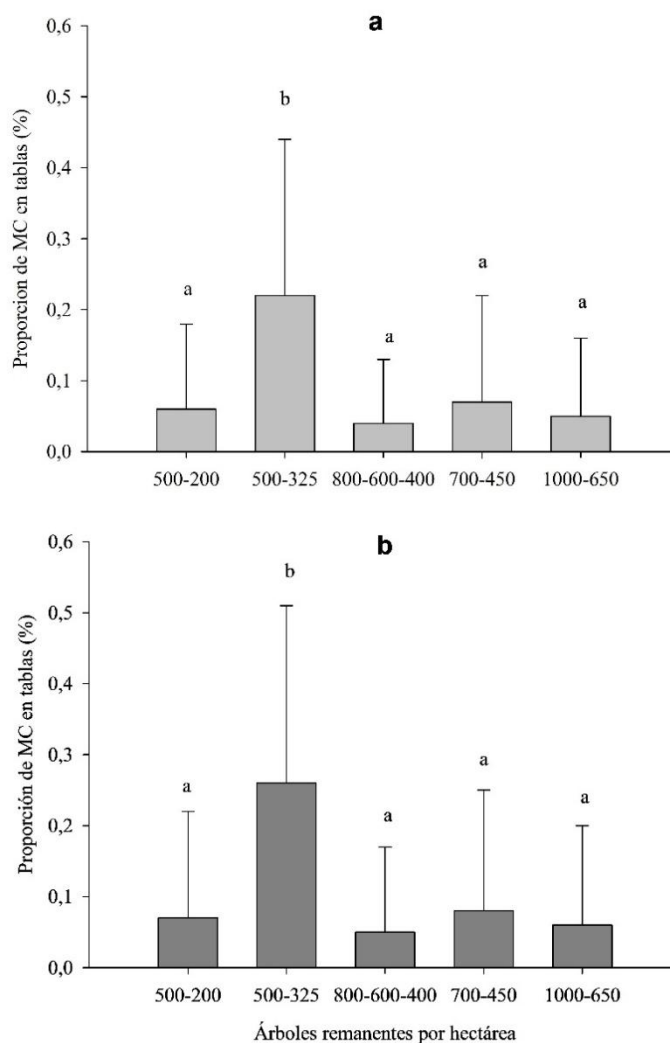
3.2.3. Manchas de MC en tablas según régimen de raleo

Se observó un efecto significativo del régimen de raleo sobre la proporción de manchas en las tablas (figura 9). El raleo con 500-325 árb. ha⁻¹ presentó los valores promedio más altos de calificación visual de manchas, significativamente superiores al resto de los regímenes, mientras los demás tratamientos no difirieron significativamente entre sí y mostraron valores más bajos y homogéneos.

Tanto la calificación promedio entre ambas caras de la tabla como el valor máximo registrado en alguna de ellas mostraron resultados consistentes, por lo que cualquiera de estas métricas puede emplearse como representativa de la severidad visual de la MC en las tablas, ya que ambas capturaron el mismo patrón general entre tratamientos.

Figura 9

Proporción promedio de manchas de MC en tablas ($\pm$ error estándar) para cada régimen de raleo: *a*) promedio entre ambas caras y *b*) máximo observado en alguna de ellas.



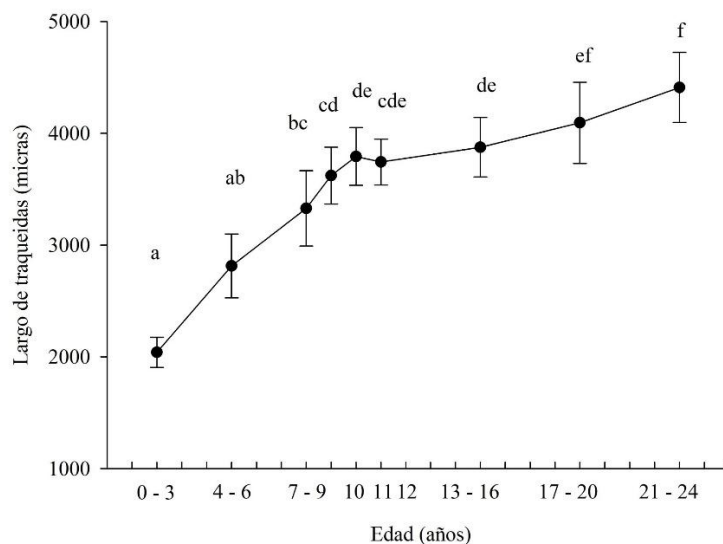
3.2.4. Defectos en tablas

3.2.4.1. Edad de transición entre madera juvenil y adulta

Se estimó que la edad de transición para estos árboles es en torno a 11, por lo que esa fue la edad utilizada como referencia para separar la madera juvenil (tablas internas) de la adulta (tablas externas) durante el aserrado (figura 3).

Figura 3

Evolución de la longitud media de traqueidas ($\pm$ error estándar) a lo largo del rango de edades evaluado.

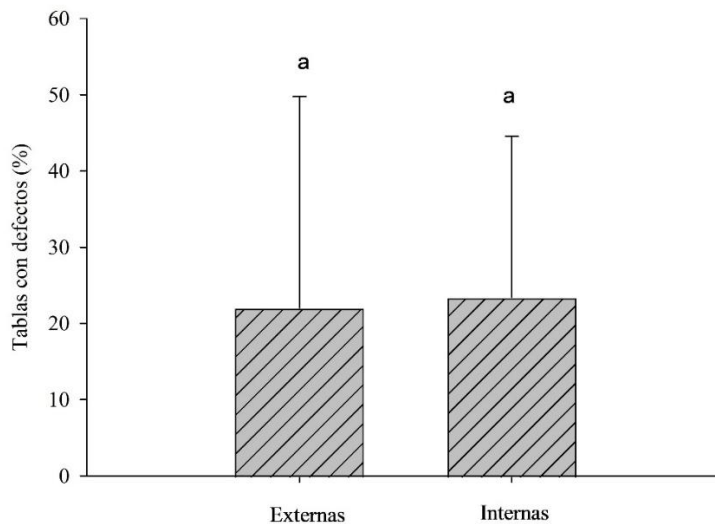


3.2.4.1. Defectos en tablas según posición radial

No se encontraron diferencias significativas en el porcentaje de tablas con defectos entre la zona interna del leño (hasta el anillo once) y la zona externa (posterior al anillo once) (figura 10). Este resultado indica que la ubicación radial dentro del fuste no fue un factor determinante en términos de calidad de las tablas. La proporción promedio de defectos fue relativamente alta y con una importante variabilidad en ambas regiones.

Figura 10

Valores promedio de tablas con defectos ($\pm$ desvío estándar) en la zonas interna y externa en el radio de las trozas evaluadas.



3.2.5. Defectos en tablas según régimen de raleo

Se observaron diferencias significativas en la proporción de tablas con defectos entre los distintos regímenes de raleo ($p < 0.05$), tanto al considerar todas las tablas juntas como al considerar solamente las externas (figura 11).

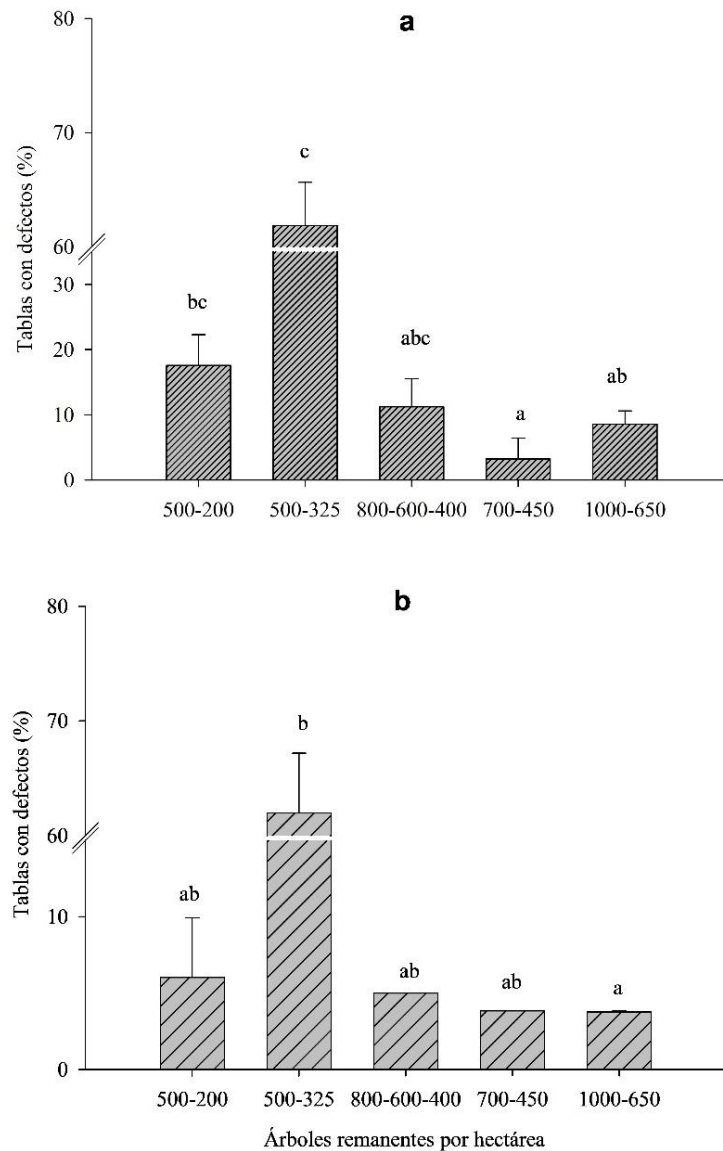
El régimen 500-325 árb.ha⁻¹ presentó la mayor proporción de tablas con defectos, alcanzando un valor promedio de 61,9 %, mientras que el régimen 700-450 árb.ha⁻¹ registró la menor proporción, con valores inferiores al 6 %.

Los regímenes 800-600-400, 1000-650 y 500-200 árb.ha⁻¹ presentaron valores intermedios, sin diferencias significativas entre sí.

En las tablas externas se observó una tendencia similar, aunque el menor porcentaje de defectos correspondió al régimen 1000-650 árb.ha⁻¹.

Figura 11

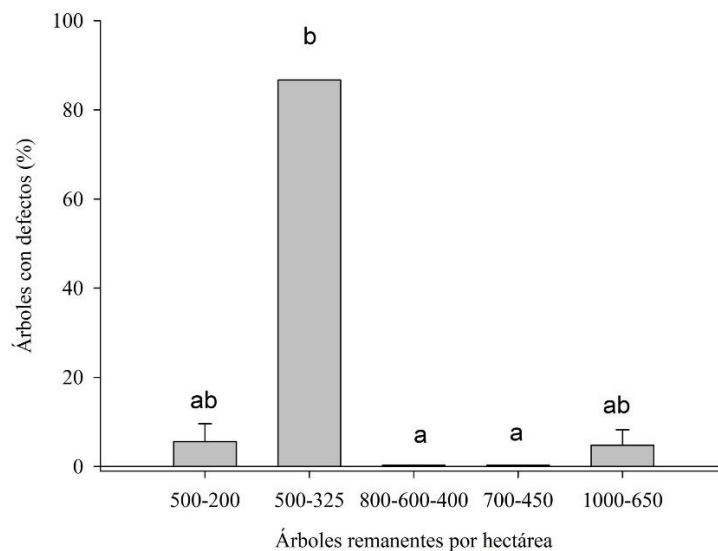
Valores promedio ($\pm$ desvío estándar) de tablas con defectos para cada régimen de raleo para a) todas las tablas juntas y b) solamente tablas externas.



Adicionalmente, se observó un efecto significativo del régimen de raleo al considerar la proporción de árboles con más del 50 % de sus tablas con defectos (figura 11). El tratamiento 500-325 árb. ha⁻¹ presentó la incidencia más alta, con más del 80% de árboles afectados. En contraste, los demás regímenes mostraron proporciones mucho más bajas y homogéneas, en particular en los raleos moderados.

Figura 12

Valores promedio ($\pm$ desvío estándar) de árboles con más del 50 % de tablas defectuosas para cada régimen de raleo.



3.3. Relación de las variables dasométricas y silviculturales con la MC en de anillos de crecimiento

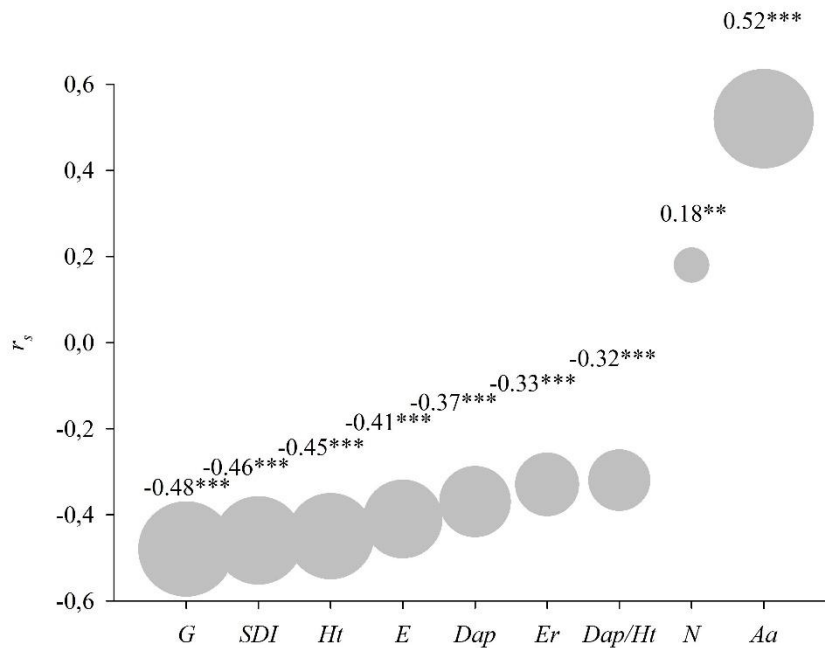
El análisis de correlación permitió identificar asociaciones entre las variables silviculturales y dendrométricas con la proporción de MC en los discos basales del fuste (figura 14).

Las correlaciones negativas más marcadas se observaron para variables que describen el rodal, como el G y el SDI. Por otro lado, el ancho de anillo presentó la correlación positiva más fuerte, lo que indica una tendencia a que un mayor crecimiento radial se asocie con una mayor formación de MC.

Otras variables, como E y Er, mostraron correlaciones negativas más moderadas, mientras que la N presentó una relación positiva más débil pero significativa. Las variables de crecimiento individual, como el DAP y la Ht, también mostraron correlaciones negativas moderadas con la incidencia de MC.

Figura 14

Coeficientes de correlación entre variables silviculturales y dasométricas y la proporción de MC en discos basales del fuste.



3.4. Valor predictivo de la evaluación visual de MC en trozas

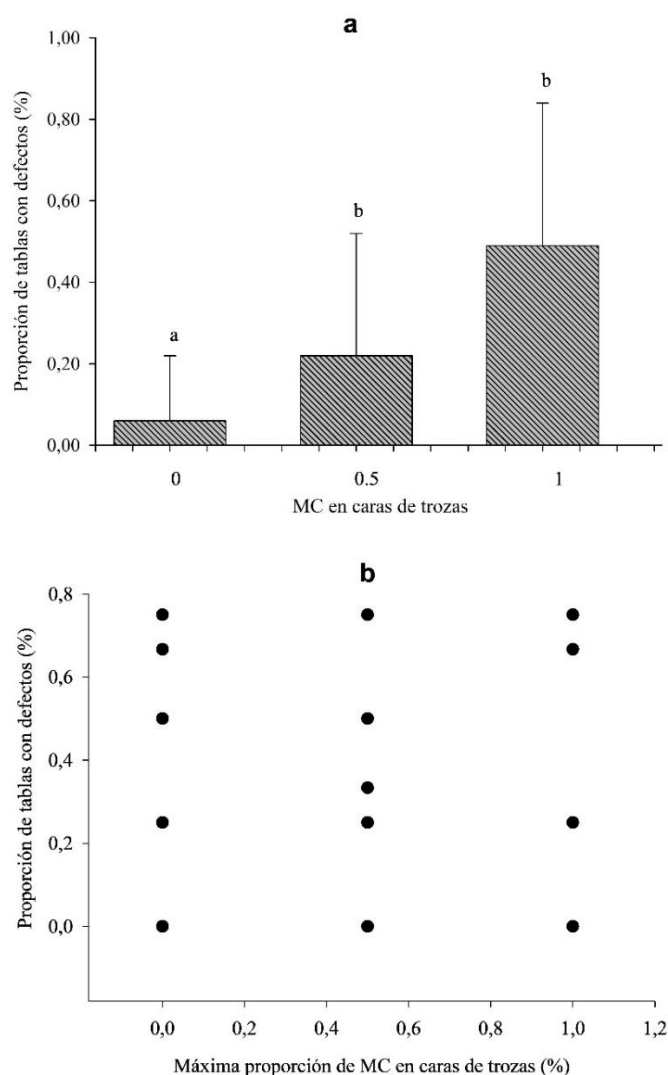
3.4.1. Relación entre la MC en las caras de las trozas y los defectos en tablas

Al agrupar las trozas según la categoría promedio de mancha de MC (0, 0,5 y 1) (figura 15a) se observaron diferencias significativas entre estas. Las trozas con niveles medios a altos de mancha de MC (categorías 0,5 y 1) presentaron una mayor proporción de tablas con defectos que aquellas sin mancha visible (categoría 0).

La presencia de mancha de MC en las caras de las trozas (categoría) tuvo una correlación positiva moderada con la proporción de tablas con defectos, considerando el valor promedio de mancha por troza, lo que indica que manchas más pronunciadas tendieron a coincidir con un mayor impacto en los defectos de tabla (figura 15b).

Figura 15

Valores promedio ($\pm$ desvío estándar) de tablas con defecto para cada nivel de clasificación de MC en las caras de las trozas (a) y correlación entre proporción de tablas con defecto y mancha en las caras de las trozas (b).

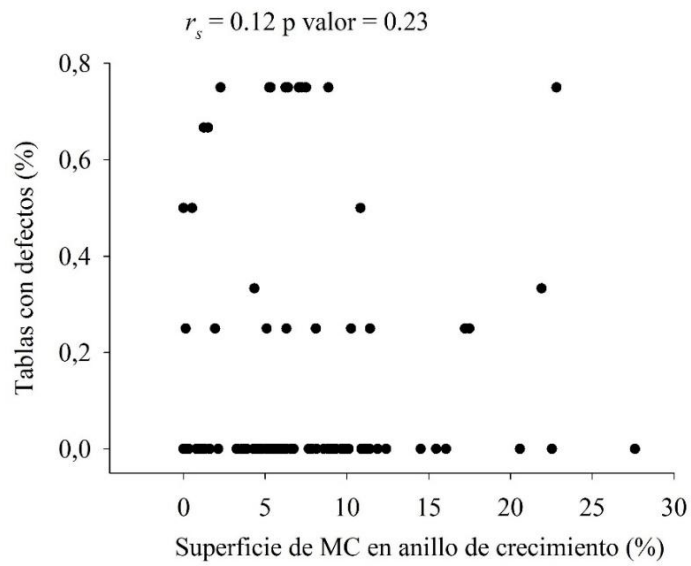


3.4.2. Defectos en tablas según mancha en discos basales

Al explorar la relación entre la mancha observada en los discos basales y la proporción de tablas defectuosas, no se encontró una correlación significativa, lo que indica que, en este caso, la mancha registrada en los discos no se asoció con una mayor incidencia de defectos en tablas (figura 16).

Figura 16

Correlación entre proporción de tablas con defecto y mancha en los discos basales.



4. Discusión

4.1. Influencia del raleo sobre el crecimiento y la competencia entre los árboles

Los efectos del raleo fueron evidentes en todas las variables de crecimiento y competencia analizadas, lo cual coincide con evaluaciones realizadas en *Pinus taeda*, incluyendo una previa del mismo ensayo (Crechi et al., 2000; Fassola et al., 2002; Martiarena et al., 2014; Uranga, 2017). Se observó una relación entre la tasa de crecimiento individual de los árboles y la intensidad del raleo.

Los cambios más notorios se produjeron entre los años doce y quince, período caracterizado por los niveles más bajos de competencia en todos los tratamientos. Hasta esta etapa de la rotación, los regímenes de raleo más intensivos (500-325, 500-200 árb. ha⁻¹) alcanzaron valores de G y N que favorecieron el crecimiento individual de los árboles.

En contraste, los demás regímenes de raleo presentaron mayores niveles de competencia durante gran parte de la rotación. Estas diferencias en la ocupación del sitio podrían reflejar distintos niveles de exposición al viento y su posible relación con la formación de MC, lo cual se analiza en las secciones siguientes.

4.2. Influencia del raleo sobre la MC en trozas

La baja proporción de MC detectada en todos los regímenes de raleo podría estar relacionada, entre otros factores, con la procedencia genética utilizada en este estudio (coastal plain). Diversos autores han reportado la influencia del genotipo sobre la formación de MC en *Pinus taeda* (Malan y Kassier, 2002; Nanayakkara et al., 2014; van der Sijde et al., 1985), aunque este aspecto no fue evaluado específicamente en el presente trabajo.

La mayor proporción de MC observada en uno de los regímenes de raleo más intensivos (500-325 árb. ha⁻¹) coincide con estudios previos que muestran que los cambios abruptos en el espaciamiento y en la estructura de la copa después del raleo pueden desestabilizar la postura del fuste, ya sea por desequilibrio de la copa o inclinación del tallo, y, de ese modo, favorecer la formación de madera de reacción,

especialmente bajo una mayor exposición al viento (Brazier, 1977; Burdon, 1975; Gardiner et al., 2014; Lachenbruch et al., 2010; Low, 1964).

No obstante, otro régimen altamente intensivo (500-200 árb. ha⁻¹) mostró una incidencia de MC bastante menor, lo que sugiere que la intensidad del raleo por sí sola no explica por completo los patrones observados. Las diferencias en el momento o secuencia de las intervenciones, así como en las condiciones estructurales del rodal al momento del raleo, podrían haber desempeñado un papel importante.

4.3. Distribución de la MC en anillos de crecimiento

Los mayores niveles de MC se registraron en los primeros años, lo cual responde a procesos hormonales ligados al establecimiento más que a las variables de manejo (Larson et al., 2001).

En todos los regímenes se observó un aumento de MC en los años inmediatamente posteriores al raleo, lo que sugiere que este período constituye una ventana crítica para la formación de MC. Los regímenes moderados y leves (1000-650, 800-600-400 y 700-450 árb. ha⁻¹) presentaron consistentemente los menores valores, mientras que los más intensos presentaron valores mayores. Estos resultados son coherentes con estudios que asocian incrementos de la tasa de crecimiento post raleo con mayor formación de MC (Barbour et al., 2003; Cown, 1973; De Villiers, 1966; Macdonald y Hubert, 2002). Estos patrones podrían estar relacionados con cambios fisiológicos y mecánicos inducidos por el raleo, incluyendo modificaciones en la estabilidad del árbol, la exposición al viento y la distribución de cargas en la copa, factores previamente vinculados a la formación de MC (Wilson et al., 1989; Yamaguchi et al., 1980).

En etapas avanzadas, la proporción de MC tendió a disminuir, lo que indica la desaparición de las causas predisponentes independientemente del régimen aplicado. Los máximos niveles ocurrieron entre los 18 y los 20 años, prolongándose algo más en los regímenes intensivos. Este patrón concuerda con lo reportado en *Pinus radiata* y *Pinus ponderosa* (Cown, 1973; Voorhies, 1982).

4.4. Influencia del raleo sobre defectos en tablas

La proporción de tablas con defectos siguió la misma tendencia que las manchas visibles en trozas. En términos generales, los raleos intensos presentaron una mayor proporción de tablas deformadas, aunque el régimen 500-325 árb. ha⁻¹ se destacó.

Los defectos asociados a MC se deben a la mayor contracción longitudinal respecto a la madera normal (Chen et al., 2007; Malan y Kassier, 2002). Esto se explica por un mayor ángulo microfibrilar en la capa S2, mayor contenido de lignina y polisacáridos y mayor espesor de pared en traqueidas (Brennan et al., 2012; Meylan, 1972; Harris, 1976). Estos factores actúan en conjunto y explican la magnitud de los defectos. Estudios en *Pinus radiata* muestran que el ángulo microfibrilar aumenta en raleos intensos (Lasserre et al., 2009; Watt et al., 2011), lo que vincula el espaciamiento con la calidad de la madera.

4.5. Influencia de variables de crecimiento y estructura del rodal

El análisis de correlación sugiere que el desarrollo de MC podría estar asociado a una combinación de factores relacionados tanto con la dinámica de crecimiento de los árboles como con la estructura del rodal.

Aunque varias variables mostraron asociaciones estadísticas con la incidencia de MC, como el G, el SDI y el AA, la mayoría de las relaciones fueron de intensidad moderada. Esto indica que ningún factor individual posee un poder predictivo fuerte por sí solo, pero resulta plausible que la interacción entre múltiples variables estructurales y fisiológicas esté relacionada con los patrones observados de MC.

En el momento de la segunda intervención, el régimen de 500-200 árb. ha⁻¹ (raleado a los 9 años) se encontraba aún en una fase de competencia moderada a baja. En cambio, el régimen de 500-325 árb. ha⁻¹ (raleado a los 12 años) ya había alcanzado un nivel de competencia más elevado al momento del raleo. Entre todos los regímenes evaluados, este fue el único caso en el que la competencia pasó de severa a creciente durante el segundo raleo. Este cambio se reflejó en la variación de la tasa de incremento del G, lo que podría ayudar a explicar la mayor presencia de MC (Barger y Ffolliott, 1976). Según De Villiers (1966), los raleos aplicados en etapas avanzadas

de la rotación tienden a generar una mayor proporción de árboles suprimidos (debido a la alta competencia), los cuales son relativamente más flexibles y menos estables.

Estas dinámicas contrastantes sugieren que el momento del raleo puede ser un factor clave que influye en el desarrollo de MC. Las intervenciones más tempranas podrían ser potencialmente efectivas para reducir la magnitud del estrés mecánico o de los ajustes fisiológicos que favorecen su formación.

Se observó una correlación positiva moderada entre el ancho de anillo y la proporción de MC ($\rho = 0,52$), y una correlación negativa moderada con el G ($\rho = -0,48$), lo que indica que un crecimiento radial acelerado puede estar asociado con una mayor formación de MC.

Estos resultados coinciden con los reportados por diversos autores, quienes encontraron correlaciones significativas entre la tasa de crecimiento y la incidencia de MC posterior al raleo en distintas especies de pinos (Cown, 1974; Gardiner et al., 2014; Malan, 2006). Este efecto se ha vinculado con el aumento del crecimiento individual, asociado a su vez con cambios hormonales, como se discutió previamente. Si bien la fuerza de las asociaciones observadas en este estudio fue menor, la dirección de las relaciones respalda la idea de que los incrementos de crecimiento posteriores al raleo pueden contribuir al desarrollo de MC.

Además de estas variables, otros factores como la acción del viento, más evidente en rodales con espaciamientos amplios, también han sido señalados como influyentes en la formación de MC.

Desde una perspectiva silvícola, variables que cuantifican el crecimiento (G), el nivel de competencia entre individuos (SDI) y el espaciamiento podrían utilizarse como herramientas de manejo para reducir la ocurrencia de MC. Desde un punto de vista aplicado, este resultado es especialmente relevante, ya que sugiere que los raleos moderados o leves podrían ayudar a minimizar la formación de MC y su impacto negativo sobre la calidad de los productos obtenidos.

4.6. Implicancias silvícolas

Los regímenes de raleo comercial aplicados en Uruguay suelen incluir una o dos intervenciones, aproximadamente a los 12-14 y 17 años. El número de árboles por

hectárea que se mantiene hasta la cosecha final ronda entre doscientos y trescientos, con el objetivo de alcanzar valores elevados de DAP.

Entre los tratamientos evaluados en este estudio, el régimen de 500-325 árb. ha⁻¹ es el que más se asemeja a las prácticas comerciales habituales, tanto en cuanto al momento de rotación como a la densidad remanente del rodal. Desde la perspectiva del rendimiento y la calidad de la madera, este régimen presentó los mayores niveles de crecimiento individual, pero también una de las incidencias más altas de MC y defectos en las tablas.

En este sentido, debería considerarse la posibilidad de implementar un raleo intermedio adicional, tomando como referencia los resultados obtenidos en los regímenes menos intensivos (1000-650 y 800-600-400 árb. ha⁻¹), en los cuales se observaron tasas de crecimiento adecuadas y menor exposición al viento.

Sin embargo, es evidente que estos regímenes difícilmente sean adoptados en la práctica comercial, ya que las altas densidades del rodal impedirían alcanzar los valores de DAP deseados. Por lo tanto, la información generada bajo condiciones de menor espaciamiento, como las mencionadas anteriormente, podría servir como guía para diseñar sistemas de manejo que mejoren la calidad de la madera, al tiempo que maximizan el crecimiento individual de los árboles.

En cualquier caso, es necesario evaluar la relación costo-beneficio de aplicar varios raleos leves en comparación con menos intervenciones más intensivas, considerando tanto la cantidad como la calidad de la madera producida.

4.7. Valor del análisis visual de manchas en trozas

La asociación significativa entre la presencia visible de manchas de MC en los extremos de las trozas y la proporción de tablas con defectos resalta la utilidad práctica de la clasificación visual como un método simple y no destructivo para estimar la calidad interna de la madera y las posibles pérdidas durante el procesamiento.

Las trozas con manchas de intensidad media a alta presentaron consistentemente mayores tasas de defectos, mientras que aquellas sin manchas visibles mostraron la menor incidencia de defectos.

Aunque la correlación fue moderada, estos resultados sugieren que las señales visuales externas pueden servir como indicadores eficaces en contextos operativos, especialmente cuando no es posible aplicar evaluaciones más avanzadas.

Cabe señalar, sin embargo, que no todos los árboles con MC severa exhiben las bandas oscuras características (Malan y Kassier, 2002).

Con base en los resultados obtenidos en Uruguay bajo condiciones similares a las de este estudio, puede afirmarse que la identificación de niveles severos de MC mejora la predicción de defectos observados después del aserrado.

La implementación de inspecciones visuales en la recepción de trozas durante las operaciones en campo o dentro del aserradero podría mejorar las estrategias de clasificación y priorización, reducir las pérdidas en el procesamiento y optimizar la recuperación de productos.

No obstante, la clasificación visual de trozas no es lo suficientemente precisa como indicador de la presencia de MC en cada árbol, por lo que podría resultar más adecuada como criterio de clasificación cuando se aplica a grupos de árboles antes del procesamiento industrial.

Este enfoque de bajo costo ofrece una herramienta valiosa para identificar trozas con mayor riesgo de producir tablas de baja calidad debido a la presencia de MC y podría contribuir a refinar los protocolos de clasificación industrial.

El potencial de la evaluación visual merece una investigación más profunda, especialmente si se pretende incorporarla de forma sistemática en los sistemas de control de calidad.

Dada la similitud observada en los valores de mancha de MC en los extremos de las trozas, la clasificación visual no parece ser suficientemente precisa para cuantificar la presencia de MC en todos los casos (Donaldson et al., 1999). Esta limitación es especialmente relevante cuando la MC ocurre en niveles bajos o moderados, como fue el caso en este estudio.

5. Conclusiones

La incidencia de MC en *Pinus taeda* está influenciada por una combinación de factores relacionados con el régimen de raleo, las condiciones del rodal y las características individuales de los árboles. Los regímenes de raleo moderados resultaron en menores niveles de defectos asociados a MC, lo que indica que el raleo puede utilizarse como una herramienta de manejo para mejorar la calidad de la madera, aunque esta estrategia debería evaluarse en función de su capacidad para minimizar la aparición de MC, al tiempo que se mantienen los objetivos de crecimiento en diámetro. Las condiciones de competencia y el momento de aplicación del raleo mostraron asociaciones consistentes con la formación de MC. Factores estructurales y ambientales, como la exposición al viento, podrían también contribuir a explicar los patrones observados. La mancha visible de MC en los extremos de las trozas puede ayudar a identificar trozas de mayor riesgo, aunque debe emplearse como una herramienta complementaria y no exclusiva. En general, las relaciones moderadas observadas confirman que la MC es un fenómeno multifactorial, lo que subraya la necesidad de futuras investigaciones que integren el contexto silvícola con factores estructurales del árbol (por ejemplo, inclinación del fuste y asimetría de copa) y factores ambientales (por ejemplo, exposición al viento) para explicar mejor la formación de MC y mejorar la calidad de la madera.

6. Bibliografía

- Barbour, R. J., Marshall, D. D. y Lowell, E. C. (2003). Managing for wood quality. En J. Evans (ed.), *Sustainability and yield in plantation forests* (pp. 299-336). Springer. doi: 10.1007/978-94-017-0309-3_11
- Bamber, R. K. y Burley, J. (1983). The wood properties of conifers. *Forestry Abstracts*, 44, 567-643.
- Barger, R. y Ffolliott, P. (1976). Factors affecting occurrence of compression wood in individual ponderosa pine trees. *Wood Science*, 8(3), 201-208.
- Brazier, J. D. (1977). The effect of forest practices on quality of the harvested crop. *Forestry*, 50(1), 49-66. <https://doi.org/10.1093/forestry/50.1.49>
- Brennan, M., McLean, J. P., Altaner, C. M., Ralph, J. y Harris, P. J. (2012). Cellulose microfibril angles and cell-wall polymers in different wood types of *Pinus radiata*. *Cellulose*, 19(4), 1385-1404.
- Burdon, R. D. (1975). Compression wood in *Pinus radiata* clones on four different sites. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 5(2), 152-64.
- Casaravilla, V. (2022). Anatomía de la MC anormal de *Pinus taeda* L. [informe final de pasantía]. Universidad de la República.
- Cameron, A.; Thomas, K. Effect of thinning on the development of compression wood in stems of Corsican pine (*Pinus nigra* L.). *Eur. J. For. Res.* 2008, 127, 247–251. <https://doi.org/10.1007/s10342-007-0200-8>.
- Castedo-Dorado, F., Crecente-Campo, F., Álvarez-Álvarez, P., & Barrio-Anta, M. (2009). Development of a stand density management diagram for radiata pine stands including assessment of stand stability. *Forestry*, 82(1), 1–16.
- Chen, Q., Hu, Z. y Chang, H. (2007). Micro analytical methods for determination of compression wood content in loblolly pine. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 27(2), 169-178. <https://doi.org/10.1080/02773810701700810>
- Cown, D. J. (1973). Comparison of the effects of two thinning regimes on some wood properties of radiata pine. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 4, 540-551.
- Cown, D. J. (1974). Effects of severe thinning and growth rate on wood characteristics of *Pinus radiata*. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 4, 456-471.

- Crechi, E., Fassola, H., Friedl, A., y Fernández, R. (2000). *Efectos de la intensidad y oportunidad de raleo en Pinus taeda L. sobre el crecimiento y la producción hasta los 13 años de edad, en el departamento de Iguazú, provincia de Misiones, Argentina*. INTA, EEA Montecarlo.
- De Villiers, A. M. (1966). Silvicultural, exploitation and conversion methods that affect timber quality. *South African Forestry Journal*, 56, 5-10. <https://doi.org/10.1080/00382167.1966.9629939>
- Díaz-vaz, J. E., Fernández, A., Valenzuela, L. y Torres, M. (2007). MC en *Pinus radiata* D: Don: I, características anatómicas. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 9(1), 29-43.
- Díaz-Vaz, J. E., Ananías, R. A., Rodríguez, S., Torres, M., Fernández, A. y Poblete, W. H. (2009). Compression wood in *Pinus radiata* II: Density and chemical composition. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 11(2), 139-151.
- Donaldson, L. A., Singh, A. P., Yoshinaga, A. y Takabe, K. (1999). Lignin distribution in mild compression wood of *Pinus radiata*. *Canadian Journal of Botany*, 77(1), 41-50. doi: 10.1139/b98-190
- Donaldson, L. A., Grace, J. y Downes, G. M. (2004). Within-tree variation in anatomical properties of compression wood in radiata pine. *IAWA Journal*, 25(3), 253-271.
- Duncker, P. y Spiecker, H. (2014). Incidence and structural properties of compression wood in European conifers-A review. *Forestry*, 87, 456-471.
- Durán, A. (1987). *La cartografía de suelos CONEAT y sus posibilidades de utilización*. Facultad de Agronomía.
- Espinosa, B. M. y Muñoz, S. F. (2005). *Silvicultura de plantaciones forestales: apuntes de clases*. Facultad de Ciencias Forestales (Universidad de Concepción). https://www2.udec.cl/~fmunoz/Apuntes_Silvicultura_Plantaciones.pdf
- Fassola, H. E., Moscovich, F. A., Ferrere, P. y Rodríguez, F. A. (2002). Evolución de las principales variables de árboles de *Pinus taeda* L. sometidos a diferentes tratamientos silviculturales en el nordeste de la provincia de Corrientes, Argentina. *Ciência Florestal*, 12(2), 51-60. 10.5902/198050981680

- Gardiner, B., Barnett, J., Saranpää, P. y Gril, J. (2014). The biology of reaction wood. Springer. doi: 10.1007/978-3-642-10814-3
- Gautreau, P. (2014). *Forestación, territorio y ambiente. 25 años de silvicultura trasnacional en Uruguay, Brasil y Argentina*. Trilce.
- Gort, J., Zubizarreta Gerendiain, A., Peltola, H., Kilpeläinen, A., Pulkkinen, P., Jaatinen, R. y Kellomäki, S. (2010). Differences in branch characteristics of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) genetic entries grown at different spacing. *Annals of Forest Science*, 67(7), 705.
- Grigoreva, O., et al. (2021). Comparative analysis of thinning techniques in pine forests. *Journal of Forestry Research*, 32, 2453–2462.
- Harris, J. M. (1976). Shrinkage and density of radiata pine compression wood in relation to its anatomy and mode of formation. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 7(1), 91-106.
- Hart, J. F. (2010). *A review of the effects of silviculture on wood quality* [artículo científico de grado]. The University of British Columbia. 10.14288/1.0103111
- Herman, D. A. (1988). Compression wood: its structure, formation and influence on end-use. *Wood and Fiber Science*, 20, 243-252.
- Instituto Uruguayo de Meteorología (Inumet). (2021). Tablas estadísticas. Último acceso el 13 de julio de 2025. <https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas/tablas-estadisticas>
- Kraus, J. E. y Arduin, M. (1997). *Manual Básico de Métodos em Morfologia Vegetal*. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
- Lachenbruch, B., Droppelmann, F., Balocchi, C., Peredo, M. y Perez, E. (2010). Stem form and compression wood formation in young *Pinus radiata* trees. *Canadian Journal of Forest Research*, 40(1), 26-36.
- Lasserre, J. P., Mason, E. G., Watt, M. S. y Moore, J. R. (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. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.07.028>

- Larson, P. R., Kretschmann, D. E., Clark, A. C. y Isebrands, J. G. (2001). *Formation and properties of juvenile wood in southern pines: A synopsis*. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Low, A. J. (1964). A study of compression wood in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Forestry*, 37(2), 179-201. <https://doi.org/10.1093/forestry/37.2.179>
- Macdonald, E. y Hubert, J. (2002). A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce. *Forestry*, 75(2), 107-138. <https://doi.org/10.1093/forestry/75.2.107>
- Maclaren, J. P. (2002). Internal wood quality of radiata pine on farm sites - a review of the issues. *New Zealand Journal of Forestry*, 47(4), 24-28.
- Mäkinen, H. e Isomäki, A. (2004). Thinning intensity and growth of Scots pine stands in Finland. *Forest Ecology and Management*, 201(2-3), 311-325. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.07.016>
- Malan, F. S. (2002). The influence of site and silvicultural practices on the incidence of compression wood. *South African Forestry Journal*, 195, 39-46.
- Malan, F. S. y Kassier, H. W. (2002). Abnormal compression wood in *Pinus taeda*: A review of current knowledge and proposed future strategy. *South African Forestry Journal*, 194(1), 43-51. 10.1080/20702620.2002.10434590
- Malan, F. S. (2006). Wood quality: A brief South African perspective. *Wood Structure and Properties*, 461.
- Martiarena, R., Crechi, E., Von Wallis, M. P. A., Marquina, J. y Monteoliva, S. (2014). Effect of thinning treatment on growth and wood density of *Pinus taeda* planted in Misiones, Argentina. *Ciência Florestal, Santa Maria*, 24(3), 655-663.
- McLean, J. P., Jin, G., Brennan, M., Nieuwoudt, M. y Harris, P. J. (2014). Using NIR and ATR-FTIR spectroscopy to rapidly detect compression wood in *Pinus radiata*. *Canadian Journal of Forest Research*, 44(7), 820-830. doi: 10.1139/cjfr-2013-0329
- Meneses, M. y Velasco, R. (1992). *Efectos del raleo y la poda en el crecimiento diametral de ramas* [tesis de grado]. Universidad Austral de Chile.

- Meylan, B. A. (1972). The influence of microfibril angle on the longitudinal shrinkage-moisture content relationship. *Wood Science and Technology*, 6(4), 293-301. doi: 10.1007/BF00357051
- Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca-Dirección General Forestal (MGAP-DGF). (2024). *Superficie forestal del Uruguay (bosques plantados)*. Último acceso 12 de julio de 2025. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2025-02/Superficie%20Plantado%20Informe%202024.pdf>
- Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca-Dirección General Forestal (MGAP-DGF). (2025). Resultados de la cartografía forestal nacional 2024. Último acceso el 12 de julio de 2025. <https://descargas.mgap.gub.uy/Documentos%20compartidos/CARTOGRAFIA%202024/Informe%20de%20resultados%202025.pdf>
- Nanayakkara, B., Lagane, F., Hodgkiss, P., Dibley, M., Smaill, S., Riddell, M., Harrington, J. y Cown, D. (2014). Effects of induced drought and tilting on biomass allocation, wood properties, compression wood formation and chemical composition of young *Pinus radiata* genotypes. *Holzforschung*, 68(5), 455-465. <https://doi.org/10.1515/hf-2013-0053>
- Nyland, R. D. (2016). *Silviculture: Concepts and applications* (2nd ed.). Waveland Press.
- Reineke, L. H. (1933). Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *Journal of Agricultural Research*, 46, 627-638.
- Saarinen, N., Kankare, V., Yrttimaa, T., Viljanen, N., Honkavaara, E., Holopainen, M., Hyyppä, J., Huuskonen, S., Hynynen, J. y Vastaranta, M. (2020). Assessing the effects of thinning on stem growth allocation of individual Scots pine trees. *Forest Ecology and Management*, 474, 118344. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118344>
- Segtowich, A. C., Huuskonen, S., Fahlvik, N., & Holmström, E. (2023). Select or not? Comparing the impact of selective and schematic thinning on Scots pine tree growth and stand structure. *Forests*, 14(6), 1194.

- Schweitzer, V. R. (2016). *Origem do “lenho anormal de compressão” e efeitos sobre a qualidade da madeira de Pinus taeda da Região Serrana de Santa Catarina* [tesis de doctorado, Universidade Federal do Paraná]. Repositório Digital da UFPR. <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/44109>
- Timell, T. E. (1986). *Compression wood in gymnosperms: formation, structure, and properties of wood formed under stress*. Springer.
- Tomazello, M. y Silva, D. A. (1987). Formação e caracterização da madeira de compressão em *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. *Scientia Forestalis*, 37, 51-59.
- Uranga, M. L. (2017). *Modelación de la respuesta de Pinus taeda a diferentes regímenes de raleo en la zona norte del país* [tesis de maestría]. Universidad de la República.
- Van der Sijde, H. A., Shaw, M. y van Wyk, G. (1985). Reaction wood in *Pinus taeda*: A preliminary report. *South African Forestry Journal*, 133(1), 27-32. <https://doi.org/10.1080/00382167.1985.9629570>
- Voorhies, G. (1982). Incidence and severity of compression wood in thinned stands of young-growth ponderosa pine. *Arizona Forestry Notes*, 15, 12.
- Watt, M. S., Zoric, B., Kimberley, M. O. y Harrington, J. (2011). Influence of stocking on radial and longitudinal variation in modulus of elasticity, microfibril angle, and density in a 24-year-old *Pinus radiata* thinning trial. *Canadian Journal of Forest Research*, 41, 1422-1431. <https://doi.org/10.1139/x11-070>
- Westing, A. H. (1965). Formation and function of compression wood in gymnosperms. *The Botanical Review*, 31, 381-480.
- Wilson, B. F., Chien, C. -T. y Zaerr, J. B. (1989). Distribution of endogenous indole-3-acetic acid and compression wood formation in reoriented branches of Douglas-fir. *Plant Physiology*, 91(1), 338-344. <https://doi.org/10.1104/pp.91.1.338>
- Wimmer, R. y Johansson, M. (2013). Effects of reaction wood on the performance of wood and wood-based products. En B. Gardiner, J. Barnett, P. Saranpää y J. Gril (eds.), *The biology of reaction wood* (pp. 225-248). Springer. doi: 10.1007/978-3-642-10814-3_8

- Wloch, W. (1975). Longitudinal shrinkage of compression wood in dependence on water content and cell wall structure. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 44(2), 217-229. <https://doi.org/10.5586/asbp.1975.019>
- Xu, P., Donaldson, L. A., Gergely, Z. R., Staehelin, L. A. y Walker, J. C. F. (2011). Mechanical performance and cellulose microfibrils in wood with high S2 microfibril angles. *Journal of Materials Science*, 46(2), 534-540. doi: 10.1007/s10853-010-5000-8
- Yamaguchi, K., Itoh, T. y Shimaji, K. (1980). Compression wood induced by 1-N-naphthylphthalamic acid (NPA), an IAA transport inhibitor. *Wood Science and Technology*, 14(2), 181-185. doi: 10.1007/BF00350568
- Zobel, B. J. y van Buijtenen, J. P. (1989). *Wood Variation: Its Causes and Control*. Springer-Verlag. doi:10.1007/978-3-642-74069-5

7. Anexos

7.1. Evaluation of Compression Wood Incidence Under Different Thinning Regimes in Late Rotation of *Pinus taeda*

Carla Padilla ^{1,*†}, Fernando Resquin ^{2,*†}, Cecilia Rachid ², Andrés Hirigoyen ³,

¹ Faculty of Agronomy, Universidad de la República (Udelar), Montevideo CP 11200 Uruguay.

² National Research System of Forestry Production, National Agriculture Research Institute, INIA Tacuarembó, Route 5 km 386, CP 45000 Tacuarembó CP 45000 Uruguay; crachid@inia.org.uy

³ National Research System of Forestry Production, National Agriculture Research Institute, INIA Las Brujas, Ruta 48 km 10, Rincón del Colorado, Canelones CP 90100, Uruguay

Correspondence: carlapadc@gmail.com (C.P); fresquin@inia.org.uy (F.R)

† These authors contributed equally to this work.

Artículo publicado en la revista *Forests*.

7.1.1. Resumen: Evaluación de la incidencia de madera de compresión bajo diferentes regímenes de raleo en *Pinus taeda* a turno final

La madera de compresión (MC) afecta negativamente la calidad industrial de *Pinus taeda*, ya que provoca distorsiones en las tablas aserradas y se caracteriza visualmente por un color rojizo más oscuro. El raleo se considera un factor clave que influye en su formación, pero los efectos reportados en bibliografía han sido inconsistentes. Este estudio evaluó la incidencia de MC al final de la rotación bajo cinco regímenes de raleo: 500-200, 500-325, 800-600-400, 700-450 y 1000-650 árboles·ha⁻¹. El defecto fue evaluado en extremos de trozas, discos basales y tablas aserradas. Aunque la severidad general de la MC fue baja, se observaron diferencias significativas entre los regímenes. El régimen de 500-325 árboles·ha⁻¹ presentó la mayor proporción de mancha y defectos en tablas, mientras que otro régimen de intensidad similar (500-200 árboles·ha⁻¹) mostró valores menores, lo que indica que la intensidad por sí sola no explica la aparición de los defectos. Después del raleo, la MC en los anillos de crecimiento aumentó y se asoció positivamente con el ancho de anillo y negativamente con el índice de densidad del rodal, lo que sugiere que la menor competencia y el crecimiento radial acelerado están vinculados a mayores niveles de formación. La mancha visible de MC en los extremos de las trozas mostró una correlación moderada con los defectos en tablas, lo que indica su potencial como un indicador práctico y de bajo costo de la calidad de la troza. El raleo afecta la formación de madera de compresión a través de su impacto en el crecimiento y la estructura del rodal. Además de la intensidad, deben considerarse el momento de aplicación y el efecto del viento. Los regímenes moderadamente intensivos ayudan a minimizar los defectos, aunque su adopción práctica puede verse limitada por prioridades comerciales.

Palabras clave: pino loblolly; manejo silvícola; madera de reacción; calidad de la madera

7.1.2. Summary

Compression wood (CW) negatively affects the industrial quality of *Pinus taeda* by causing distortion in sawn boards and is visually characterized by a darker reddish

colour. Thinning is considered a key factor influencing its formation, but the reported effects have been inconsistent. This study evaluated CW incidence at final rotation under five thinning regimes: 500-200, 500-325, 800-600-400, 700-450, and 1000-650 trees.ha⁻¹. The defect was assessed on log ends, basal discs, and sawn boards. Although overall CW severity was low, regimes differed significantly. The 500-325 trees.ha⁻¹ regime showed the highest stain and board defects, while the 500-200 trees.ha⁻¹ regime of similar intensity had lower values, indicating that intensity alone does not explain the occurrence of defects. After thinning, CW in growth rings increased and was positively associated with ring width and negatively with stand density index, indicating that reduced competition and accelerated radial growth are linked to higher formation levels. Visible CW staining on log ends was moderately correlated with board defects, indicating its potential as a practical, low-cost indicator of log quality. Thinning affects compression wood through its impact on growth and stand structure. In addition to intensity, timing and the effect of the wind must also be considered. Moderately intensive regimes help minimize defects, although their practical adoption may be limited by commercial priorities.

Keywords: loblolly pine; silvicultural management; reaction wood; wood quality

7.2. Introduction

Pinus taeda is widely cultivated as a commercial forest species in various regions around the world, valued for its fast growth and suitability for solid wood production. Originally native to the southeastern United States, it has been successfully established in countries such as Argentina, Brazil, Uruguay, Venezuela, China, South Africa, Australia, and New Zealand [1]. The formation of CW has been recorded in South Africa in *Pinus taeda* plantations in the Mpumalanga and Limpopo provinces [2]. It has also been reported in Brazil, where it is recognized as a factor that compromises wood quality and limits its industrial utilization [3]. Beyond *Pinus taeda*, the occurrence of compression wood has also been reported in other conifer species cultivated in plantations. For instance, its presence has been documented in *Pinus radiata* in Chile [4,5], South Africa [6], and New Zealand [7,8]; in *Pinus sylvestris* in the UK [9] and Spain [10]; and in *Pinus nigra* in the UK [11,12].

In Uruguay, *Pinus taeda* is one of the most important forest species in terms of planted area, representing a significant portion of the 128,000 hectares occupied by pine trees, which accounts for 14.3% of the country's total forested area [13]. Its primary use is for industrial processing to produce solid wood products, mainly intended for export.

These plantations have been developed from genetic material introduced from the United States and South Africa [14], under silvicultural regimes focused on high-quality wood production. A pre commercial thinning is usually conducted in the early stages, followed by one or two commercial thinnings during the rotation.

Among the various factors affecting the industrial quality of this wood, compression wood is identified as having the most significant negative impact. Based on internal assessments and observations within the Uruguayan forest industry, CW is estimated to cause around a 10% loss of the potential foreign exchange earnings from Uruguay's pine mechanical transformation sector. Compression wood is a type of reaction wood found in conifer species that exhibits markedly different physical, chemical, and mechanical properties compared to normal wood [15]. One of its most distinctive features is a darker reddish-brown colour (stain), resulting from its highly lignified, thick-walled tracheids [16]. CW causes defects in sawn boards and veneer sheets, such as distortion, cracking, reduced dimensional stability, and lower mechanical strength [17–19]. Consequently, it disrupts production processes, causing misalignments and even equipment damage, reducing both yield and final product quality.

CW formation can result from several factors, including wind, growth rate, genetic material, and thinning plays a particularly relevant role. Schweitzer [3] reported that severe thinning has been associated with increased CW formation in *Pinus taeda*. Similarly, Bamber and Burley [20] suggested that thinning can promote CW development by altering the vertical equilibrium of tree stems. Post-thinning canopy opening encourages lateral crown growth and may induce trunk leaning, both of which are conducive to CW formation. Increased spacing between trees also enhances wind exposure, potentially intensifying this effect. In this context, Cown [21] found that, in *Pinus radiata*, CW formation was directly related to growth rate

increases following thinning. The author proposed that this could be linked to hormonal changes, such as elevated auxin production from crown expansion, or to increased stem oscillation from wind, with both acting as stimuli for reaction wood development.

In contrast, Cameron [11] found that unthinned trees exhibited significantly higher CW incidence, up to three times more, than those that were thinned. His findings indicate that high stand density leads to intense competition for space, prompting trees to prioritize height growth over stem and root development. As a result, CW development in dense stands is believed to be strongly influenced by phototropic movements in response to light competition.

Given CW's detrimental impact on product quality, a thorough understanding of the factors contributing to its formation is essential. Among silvicultural practices, thinning is one of the main tools used in *Pinus taeda* management. However, most available studies have focused on other species or planting conditions and have reported differing outcomes regarding the influence of thinning on CW development. This variability across existing studies suggests that certain thinning regimes may be more effective than others in reducing CW formation. Our study design includes thinning schemes that consider the contrasting number of suckering trees per hectare and the stages of the crop cycle at which thinning is applied. This allows us to evaluate a wide range of management situations, ultimately providing a comprehensive overview of the effects of these management practices.

Our hypothesis is that different thinning schemes affect compression wood formation due to mechanisms related to growth and competition among individuals. The primary objective of this study was to characterize compression wood formation in *Pinus taeda* under different thinning regimes and to analyze its relationship with growth parameters under northern Uruguay conditions. The specific objectives were as follows: (i) quantify the CW presence for each of the thinning schemes evaluated; (ii) measure the relationship between CW presence and individual and population growth; and (iii) determine the usefulness of the visual log grading as a predictor of the deformations observed in the boards after sawing.

7.3. Materials and Methods

7.3.1. Study area

The study was conducted in a *Pinus taeda* thinning trial, located in the Tacuarembó department in northern Uruguay (31°33'22" S, 55°44'40" W) (Figure 1). The soils at the site are deep, sandy-textured, highly acidic, and have low natural fertility. According to the USDA soil taxonomy, they are classified as Hapludult and Hapludalf [22]. The distribution of rainfall during the historical period (2002-2025) averaged 1386.8 mm per year. The average temperature was 17.6 °C, with maximum and minimum values of 32.6 °C and 7 °C, respectively. The test site is located in a region where the most frequent and fastest winds come from the northeast to southeast directions with an average speed of 1.9×10^5 and an average maximum speed of 3.2×10^5 m.s⁻¹, respectively [23].

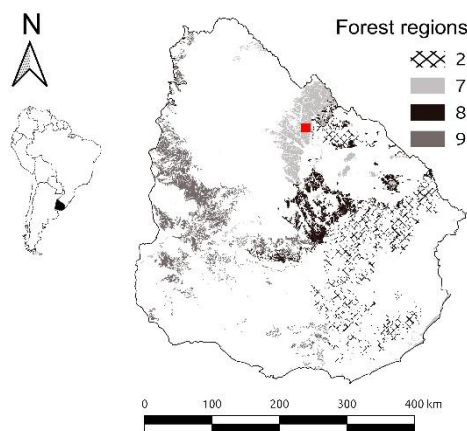


Figure 1. Geographic location of the experimental site. Regions prioritized for forest plantations (Forests regions) including trial locations at Rivera (red square), according to the National Commission for Agroeconomic Studies of the Land Classification (Coneat), soils correspond to groups 2, 7, 8 and 9 have an adequate soil fertility for forest plantation.

The stand was planted in 1997 using seed from a first generation seed orchard in Coastal Plain region, Georgia, USA, at an initial density of 1000 trees.ha⁻¹ with a

spacing of 4 m between rows and 2.5 m between trees. The stand was pruned five times and $\leq 40\%$ of the live crown was removed in each intervention.

7.3.2. Trial Design and Thinning's Regimes

The thinning trial was installed in the year 2000, when the stand was three years old. A total of 58 square plots of 30 m $\times$ 30 m were established using a randomized complete block design with three blocks defined by the initial basal area as follows: Block 1 ($>4.47 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$), Block 2 ($3.96\text{-}4.47 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$), and Block 3 ($<3.96 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$) (Figure S1, Supplementary Materials). A total of 19 different thinning treatments were originally implemented in the trial, varying in the number of interventions, timing (ages at which thinning occurred), intensity (final residual stand density), and the interval between successive thinnings.

For this study, five thinning regimes were selected (Table 1). These were chosen because they represent the range of residual stand densities relevant to current silvicultural practices in the Uruguayan forest sector, while the remaining regimes were either operationally impractical or too similar to others in terms of final stand density and thinning regime. The number of rows and trees in each of the plots evaluated in this study are described in Table S1, Supplementary Materials.

Table 1. Description of the Selected Treatment

Thinning Regime	Initial Density (Trees.ha ⁻¹)	Target Density after Thinning (Trees.ha ⁻¹)				Last Density (Trees.ha ⁻¹)
		Age (years)				Age (years)
		3	6	9	12	22
500-200	1000	500		200		204
500-325	1000	500			325	304
800-600-400	1000	800	600	400		393
700-450	1000	700			450	437
1000-650	1000				650	559

7.3.3. Tree Selection and Field Sampling

To ensure a representative sample of tree sizes, individuals were selected based on the diameter at breast height (DBH, cm) distribution within each thinning regime.

DBH was measured at 25 years of age for all trees within each plot, and diameter classes were defined for each thinning. Based on the relative frequency of each class, seven trees were selected per plot, following the class proportions established at the thinning regime level. This resulted in a total of 105 trees (21 per thinning regime, 7 per plot) which were manually felled using a chainsaw. After felling, a basal disc (~5 cm thick) was collected from each tree for visual assessment of *CW* the growth rings, and a 3.5 m log was extracted from the base of the stem for sawing and subsequent evaluation of *CW* in the resulting boards.

7.3.4. Visual Analysis of Compression Wood in End Logs

Both ends of each log were visually examined for *CW* presence and classified on a scale from 0 to 3 based on the proportion of the cross-sectional occupied by the stain (0: absent, 1: $<1/3$, 2: $1/3-2/3$, 3: $>2/3$) (Figure 2). Each log was assigned a final score, obtained as the average of its two ends (basal and upper). All evaluations were performed by a single trained observer to avoid inter-rater variability, and the scoring procedure was calibrated in previous surveys of >300 trees from the same research project. Similar categorical approaches for visual *CW* severity have been used in conifer species [24,25]. The use of stain as a proxy for *CW* has been previously validated for *Pinus taeda* under similar site and management conditions, where stained areas consistently showed anatomical features of *CW* (shorter tracheids and thicker cell walls; Table S2, Supplementary Materials), in agreement with published characterizations of *CW* in conifers [26-28].



Figure 2. Categories of compression wood presence: **(a)** absent, **(b)** low, **(c)** moderate, and **(d)** severe.

7.3.5. Preliminary Sampling for Juvenile-Mature Wood Transition

To determine the juvenile–mature wood transition, fibre length was analyzed in 10 basal discs representing different diameter classes from the study stand. Measurements were conducted on earlywood tracheids from successive rings, samples were macerated following Kraus and Arduin protocol [29], and fibre length was measured. The transition ring was defined as the point where fibre length values showed a clear stabilization trend, indicating the onset of mature wood formation. Based on this change in slope, the transition occurred around ring 11, consistent with previous reports for *Pinus taeda* [30-31]. This ring was used as the boundary to separate juvenile (inner) and mature (outer) boards during sawing (Figure S2, Supplementary Materials).

7.3.6. Sawing methodology

Logs were sawn into 1-inch-thick boards using successive parallel cuts (Figure 3), corresponding to commercial dimensions. Boards were not edged, and therefore retained bark on their sides. From the 105 processed logs, between 9 and 15 boards were obtained per log, yielding a total of 1144 boards for evaluation. During this process, boards originated from the inner zone, expected to contain juvenile wood, were intentionally kept separate from those obtained from the outer zone, where mature wood was expected to be present, based on the estimated transition point determined through preliminary sampling (Section 2.6).

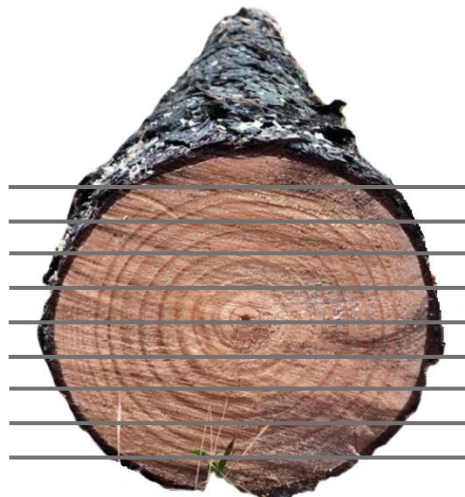


Figure 3. Schematic representation of the log sawing system.

7.3.7. Visual Analysis of CW in Green Boards

Both faces of each board were visually examined for CW presence and classified on a scale from 0 to 3, based on the proportion of the surface area occupied by visible CW stain (0: absent, 1: $<1/3$, 2: $1/3-2/3$, 3: $>2/3$). A final score was assigned to each board, using either the maximum or the average of the two faces.

7.3.8. Evaluation of Defects in Dried Boards

Boards were dried in a conventional kiln under controlled industrial drying conditions, following a standard softwood drying schedule. After drying, boards were evaluated for crook, bow, and twist, based on the UNIT 1461 standard [32]. Rather

than using absolute deformation values, which do not necessarily reflect the board's industrial usability, each board was classified into one of two practical categories: "with defects" or "without defects". This classification was based on threshold values provided by a local industrial company, which defines acceptable limits for each type of deformation according to commercial quality requirements (Table S3, Supplementary Materials). These thresholds were developed in accordance with the UNE-EN 14081-1 standard [33] for structural timber grading.

7.3.9. Visual Analysis of CW in Discs

Basal discs from all selected trees were visually assessed to quantify the presence of CW. Each disc was divided into eight equal sectors by drawing equidistant radii, and CW was evaluated ring by ring. Each sector, defined as the portion of a ring between two consecutive radii, was scored based on the extent of visible stain (0: absent; 0.5: small but clearly identifiable stain; or 1: large and prominent stain).

Ring widths were measured along each radius using a ruler to estimate the area of each sector. These values were used to calculate the CW area per sector by weighting the stained proportion accordingly. Summing the stained sectors yielded the total CW area per ring, which was then expressed as a percentage of the total ring area. These results were used to calculate the average CW percentage per ring across trees within each thinning, and the total CW percentage per disc.

To quantify the post-thinning CW response over time, the area under the curve (AUC) of CW proportion was calculated from ring 9 onward using numerical integration. Therefore, AUC represents the cumulative CW proportion over time, combining both the magnitude and duration of CW formation after thinning.

7.3.10. Statistical Analysis

As several variables did not meet normality assumptions, non-parametric tests were applied. Kruskal-Wallis tests were used to evaluate the effect of thinning on the proportion of boards with defects, the CW stain score in boards, the CW stain score on log ends, and the CW proportion in growth rings. When significant differences were detected, pairwise comparisons were performed using Dunn's test, applying a significance level of $\alpha = 0.05$.

Spearman correlation coefficients (r_s) were calculated to explore the relationship between CW incidence at the growth ring level and several dendrometric and silvicultural variables, as well as between the proportion of boards with defects and stained area in rings, and between visual CW scores on log ends and boards with defects. The variables considered were Basal Area (G , $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$), Stand Density Index (SDI) [34], Stand Age (Age , years), Diameter at Breast Height (DBH , cm), Total Height (Ht , m), Age at Thinning ($AgeT$, years), Number of Trees per Hectare (N), Ht/DBH ratio ($\text{m} \cdot \text{cm}^{-1}$), and Ring Width (Grw , mm). All analyses were performed using InfoStat software version 2020 [34].

7.4. Results

7.4.1. Effect of Thinning on Growth and Competition Between Trees

In general, growth and competition results among individuals begin to diverge from age 6 onward, coinciding with the application of the first commercial thinning (Figure 4). Individual growth results (DBH and Ht) across thinning regimes were within expectations, being higher under wider spacings. The Ht/DBH ratio showed that trees under narrower spacings were more slender, since higher competition promoted greater height growth relative to DBH . The greatest change in this relationship is observed after the thinning applied at 9 years of age, and this is the moment from which an increase in the presence of CW begins to be detected. The G exhibited the opposite trend, as this parameter was directly related to stand density. Beyond the early years, the maximum Grw peak occurred after the thinning at age 12, when competition (SDI) was most reduced. Less intensive thinning regimes (1000-650 and 700-450 trees $\cdot \text{ha}^{-1}$) spent most of the rotation under severe competition, while the more intensive regimes (500-200 and 500-325 trees $\cdot \text{ha}^{-1}$) remained under increasing competition. Changes in tree populations across thinning regimes were not proportionally reflected in growth variables, either at the individual or per-hectare level.

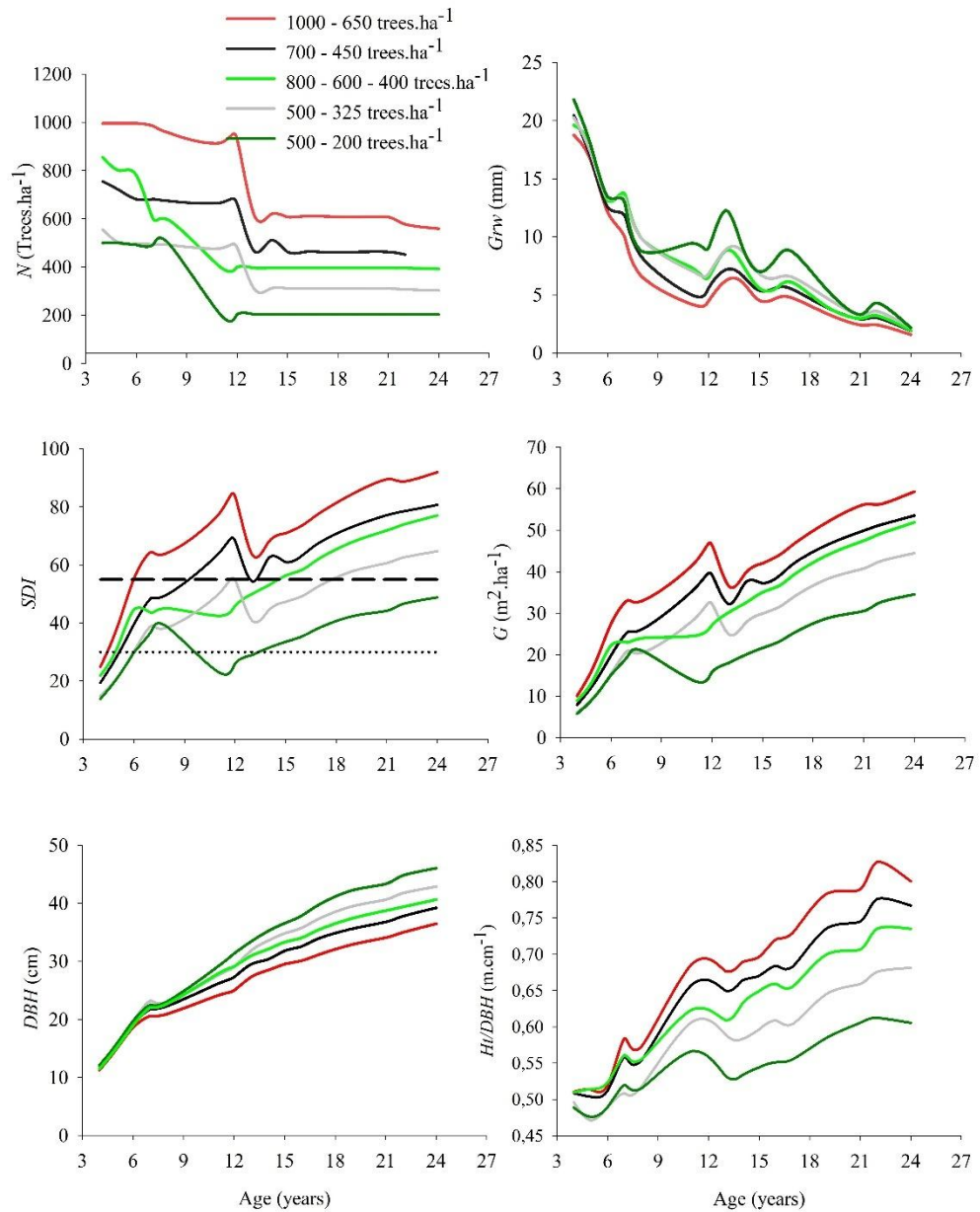


Figure 4. Evolution of stand and growth variables under the different thinning regimes. Below the dotted line: Free growth ($SDI < 30\%$), between the dotted and dashed line: increasing competition ($30\% < SDI < 55\%$), above the dashed line: fully stocked ($SDI > 55\%$).

7.4.2. CW Incidence by Thinning Regime

7.4.2.1. CW Stain on Log Ends

CW presence levels were generally very low across all thinning regimes; however, data analysis indicated significant differences among treatments ($H = 14.5$,

$p\text{-value} \leq 0.0001$) (Figure 5). The 500-325 trees·ha⁻¹ regime exhibited the highest mean CW stain proportion, significantly greater than the other thinning treatments. No significant differences were detected among the remaining regimes, which showed lower and more uniform values. Among the intensive thinning regimes, only 500-325 trees·ha⁻¹ showed elevated CW stain levels, while 500-200 trees·ha⁻¹ remained comparable to the lighter regimes. Moreover, except for the 500-325 trees·ha⁻¹ regime, both boards and log ends exhibited only a very reduced stained surface.

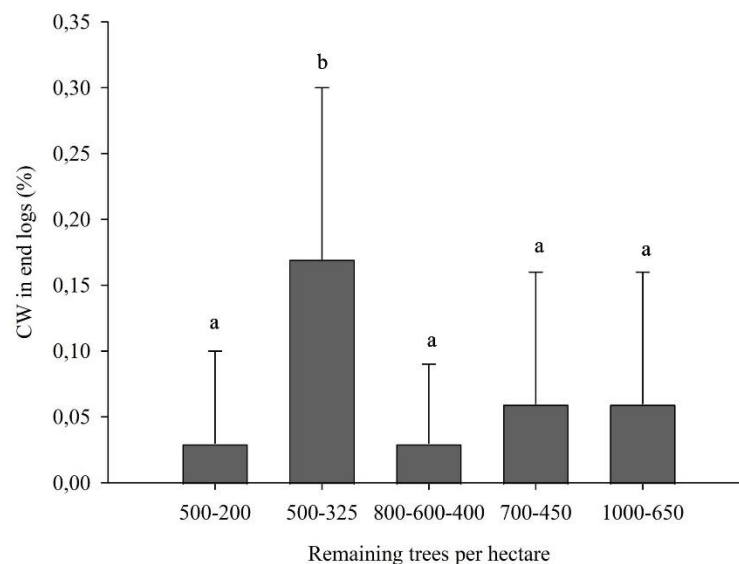


Figure 5. Mean CW stain proportion ($\pm$ SD) by thinning regime. Different letters indicate significant differences between thinning regimes, by means of the Dunn test posteriori of the ANOVA with a probability level of 5%.

7.4.2.2. CW Distribution across Annual Rings

Across all thinning treatments, an increase in CW proportion was observed in the years following thinning response (Figure 6). The magnitude and duration of this increase varied among regimes, but in all cases CW levels declined toward the final stage of the rotation.

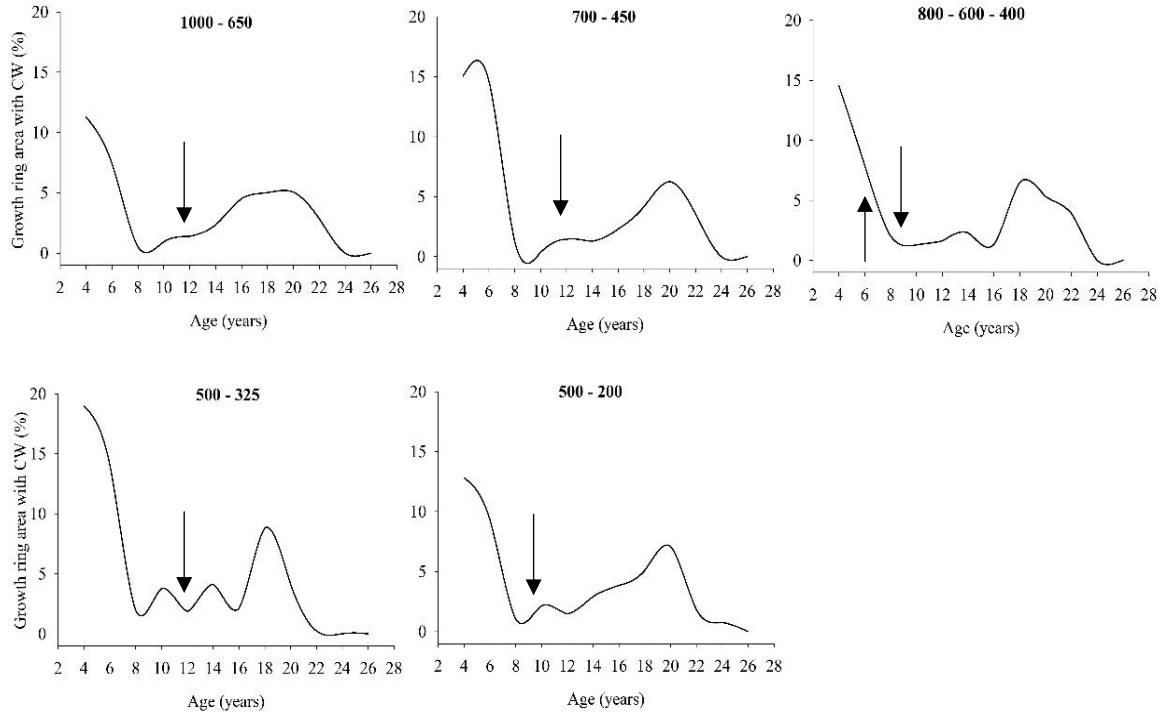


Figure 6. Temporal evolution of growth ring area with CW for each thinning regime. Arrows indicate the timing of thinning events.

The area under the curve (AUC) of CW proportion, calculated from ring 9 onward to represent the post-thinning period, did not differ significantly among thinning regimes (Figure 7). However, lower mean AUC values were associated with the moderate thinning regimes (800-600-400 and 700-450 trees.ha⁻¹), while both intensive (500-325 and 500-200 trees.ha⁻¹) regimes showed higher values. This was consistent with the log end stain results.

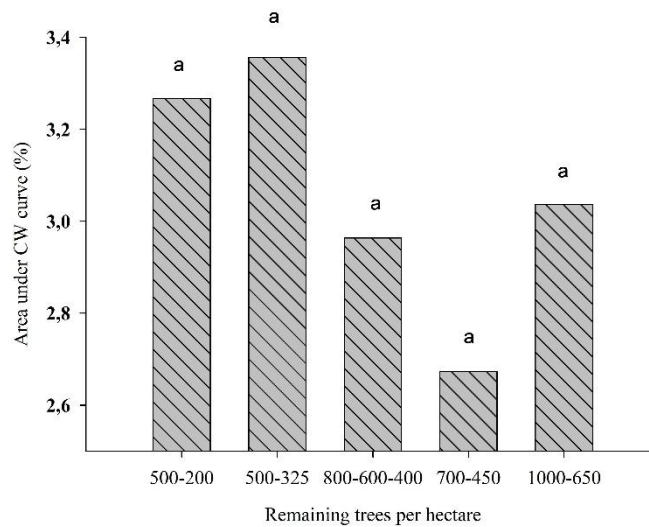


Figure 7. Mean *AUC* of *CW* for each thinning regime. Different letters indicate significant differences between thinning regimes, by means of the Dunn test posteriori of the ANOVA with a probability level of 5%.

7.4.2.3. *CW* Stain in Boards

A significant effect of thinning regime was observed on the mean *CW* stain proportion in boards (Figure 8). Both the average stain across board faces ($H = 121.89$, $p\text{-value} \leq 0.0001$) and the maximum ($H = 115.27$, $p\text{-value} \leq 0.0001$) yielded consistent results. The 500-325 trees.ha⁻¹ regime showed the highest mean values, significantly greater than all other treatments. No significant differences were found among the remaining thinning regimes.

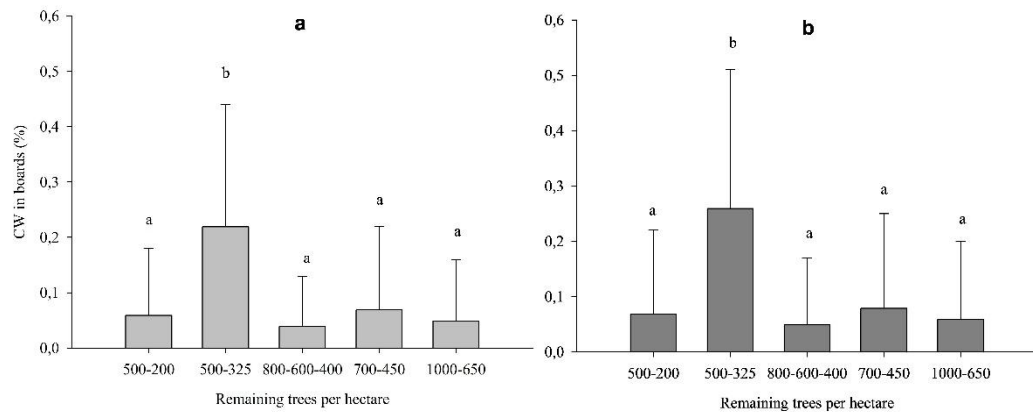


Figure 8. Mean CW stain in boards ($\pm$ SD) by thinning regime, showing (a) average stain across both faces and (b) maximum stain observed on either face. Different letters indicate significant differences between thinning regimes, by means of the Dunn test posteriori of the ANOVA with a probability level of 5%

7.4.2.4. Board Defects

No significant differences were found in the proportion of boards, with defects between the innerwood (up to ring 11) and outerwood (beyond ring 11) regions ($H = 0.79$, p -value = 0.37) (Figure 9). The proportion of boards with defects was similar in both radial positions, with relatively high averages and considerable variability in each region.

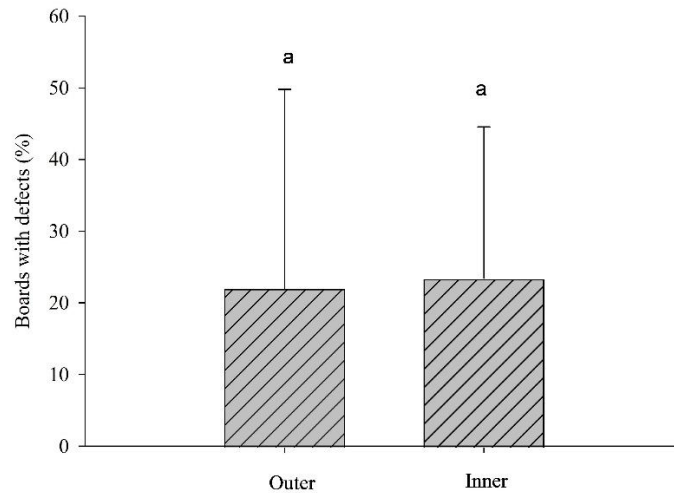


Figure 9. Mean of boards with defects ($\pm$ SD) of all evaluated logs. Different letters indicate significant differences between thinning regimes, by means of the Dunn test posteriori of the ANOVA with a probability level of 5%

Significant differences were observed in the proportion of boards with defects among the different thinning regimes ($H = 12.37$, $p\text{-value} = 0.0148$) (Figure 10). The 500-325 trees ha^{-1} thinning regime showed the highest mean value (61.9%), significantly higher than all other regimes. It was followed by the 500-200 trees ha^{-1} regime, which, although not significantly different from 500 to 325 trees. ha^{-1} , had a much lower proportion (17.6%). The 800-600-400 (13.2%), 1000-650 (10.3%), and 700-450 trees ha^{-1} (5.9%) regimes showed lower proportions of defects, with no significant differences among them or compared to the 500-200 regime. The 700-450 trees. ha^{-1} regime had the lowest proportion of defects and was significantly different from the 500-325 trees. ha^{-1} regime.

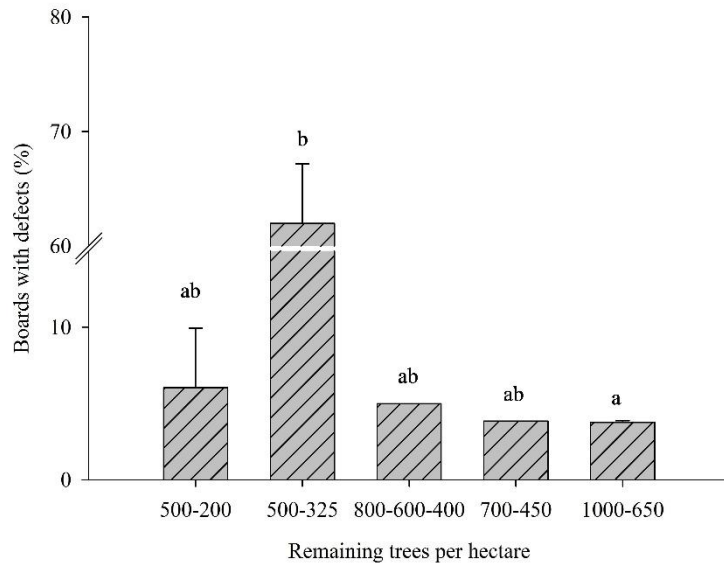


Figure 10. Mean of boards with defects ($\pm$ SD) separated by thinning regime. Different letters indicate significant differences between thinning regimes, by means of the Dunn test posteriori of the ANOVA with a probability level of 5%

A significant effect of thinning regime was also observed when considering the proportion of trees yielding boards with severe defects, defined as those in which more than 50% of their boards were classified as boards with defects ($H = 7.36$, p -value = 0.0334) (Figure 11). The mean proportion of such trees also varied across treatments. The 500-325 trees.ha⁻¹ regime again showed the highest incidence, with over 80% of trees affected. In contrast, the remaining thinning treatments exhibited much lower and more homogeneous proportions, particularly under the moderate thinning regimes.

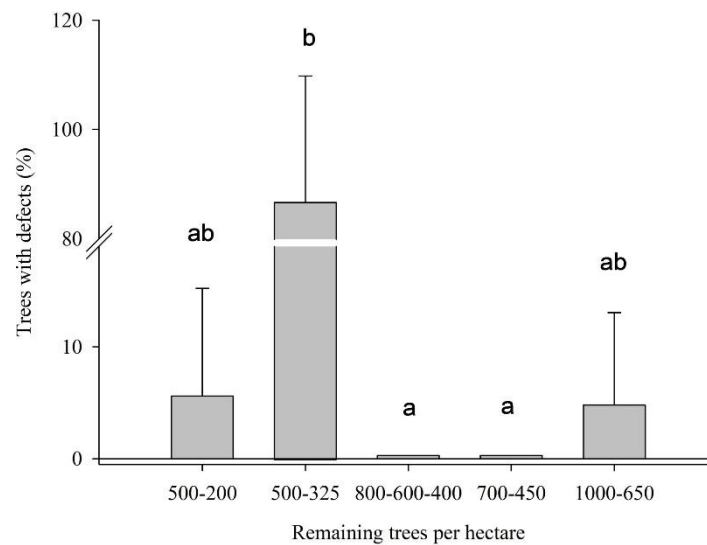


Figure 11. Mean of trees with >50% boards with defects ($\pm$ SD) by thinning regime. Different letters indicate significant differences between thinning regimes, by means of the Dunn test posteriori of the ANOVA with a probability level of 5%.

7.4.3. Relationship of Dasometric and Silvicultural Variables with CW at the Growth Ring Level

To explore these relationships, the dynamics of stand and dendrometric parameters were analyzed throughout the rotation. Correlation analysis identified notable associations between silvicultural and dendrometric variables and the proportion of *CW* in basal stem discs (Figure 12). The most pronounced negative associations were found for stand-level variables, such as *G*, *SDI*, and *Age* (Figures S3 and S4, Supplementary Material). In contrast, *Grw* exhibited the strongest positive correlation ($r_s = 0.52$), indicating a tendency for greater radial growth (reflecting lower inter-tree competition) to be associated with increased *CW* formation. Other variables, including *Age* and *AgeT*, showed moderate negative correlations, while *N* displayed a weaker but still significant positive relationship. Individual growth variables such as *DBH* and *Ht* also showed moderate negative correlations with *CW* incidence.

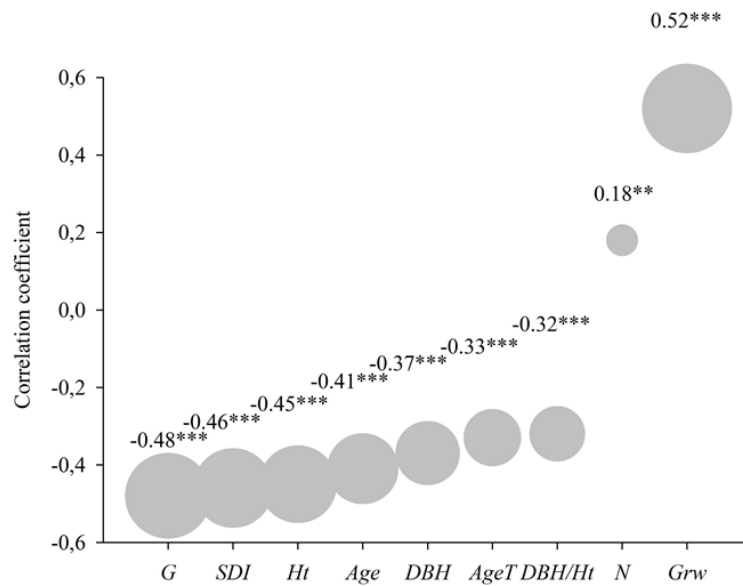


Figure 12. Correlation coefficients between silvicultural and dendrometric variables and the proportion of CW in growth rings of basal stem discs. Signif. codes: *** p value between 0 and 0.001; ** p value between 0.001 and 0.01; * p value between 0.01 and 0.05.

7.4.4. Predictive Value of Visual CW Assessment on Log Ends

Significant differences were also observed when grouping logs by average CW stain category (0, 0.5, 1) ($H = 12.6$, $p\text{-value} < 0.0001$) (Figure 13a). Logs classified in categories 0.5 and 1 had higher proportions of boards with defects, while logs in category 0 showed the lowest values. A moderate positive correlation ($r_s = 0.44$, $p\text{-value} \leq 0.0001$) was found between the CW stain score on log ends and the proportion of boards with defects (Figure 13b). No significant relationship ($r_s = 0.12$, $p\text{-value} = 0.23$) was detected between CW proportion in basal discs and the proportion of boards with defects (Figure 14).

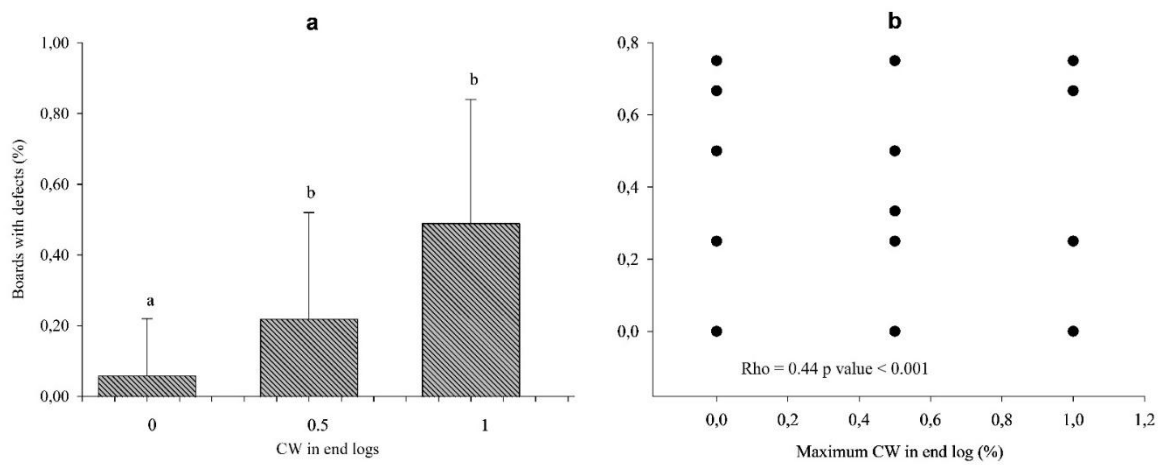


Figure 13. Mean of boards with defects ($\pm$ SD) by average CW stain category (a: upper figure) (Different letters indicate significant differences based on a Dunn test, $\alpha = 0.05$) and correlation between percentage of boards with defects and CW stain level (b: bottom figure).

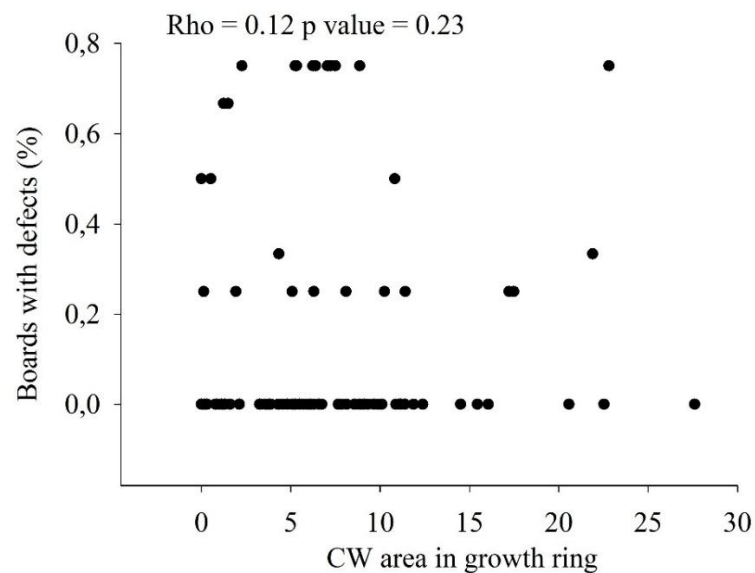


Figure 14. Relationship between CW in basal stem discs and of boards with defects

7.5. Discussion

The results of this study provide new insights into CW development in *Pinus taeda* plantations under different thinning regimes in northern Uruguay. The findings

support the hypothesis that thinning influences CW formation, although the relationship observed between both parameters is not particularly strong. The detection of a low proportion of CW suggests that its association with some silvicultural parameters is of limited magnitude. Thinning is a common management practice in these plantations, which highlights the need to understand its effect on CW formation. Previous studies conducted in the planting areas of Uruguay have shown that the presence of CW generally does not exceed 10% of the total wood volume produced. According to Bendtsen and Senft [35], *Pinus taeda* is highly susceptible to CW formation, particularly during the early years of growth. At these stages, CW formation occurs simultaneously with juvenile wood [30], although the two wood types differ in their chemical composition and anatomical features and arise from different causes [35]. Therefore, studying CW formation at later stages, coinciding with responses to management interventions such as pruning and thinning, is of particular interest. In general, thinning may affect growth-related variables (which are the primary target of this practice) but also crown structure, branch size, and stem inclination [9]. These factors have been identified as sources of asymmetry in light availability, ultimately causing mechanical imbalances within the stem [36]. In addition, wind exposure plays a role, particularly in stands with wider spacing, where trees are more exposed [37]. For these reasons, it is necessary to examine the relationship between silvicultural parameters and the intensity and timing of CW formation. Identifying management variables that reduce the occurrence of this abnormal wood could have a positive effect on wood quality under these production conditions. Nevertheless, results reported in the literature indicate difficulties in isolating the effect of single variables, as growth conditions strongly interact with site characteristics [38].

7.5.1. Influence of Thinning on Growth and Competition Among Trees

The effects of thinning were evident across all variables analyzed, which is consistent with evaluations conducted on *Pinus taeda*, including those from this trial [39,42]. A fairly strong indirect relationship was observed between the rate of individual tree growth and thinning intensity. The most pronounced changes occurred between years 12 and 15, a period characterized by the lowest levels of competition

across all treatments. Up to this stage of the rotation, the more intensive thinning regimes (500-325, 500-200, and 800-600-400 trees.ha⁻¹) achieved *G* and *N* values that allowed the growth potential of this species to be maximized. In contrast, the other thinning regimes entered stages of severe competition or “overstocking” from the early years [43]. These differences in site occupancy may reflect varying levels of wind exposure and their possible association with *CW* formation, which will be analyzed in the following sections.

7.5.2. Influence of Thinning Intensity and Timing on *CW* Formation

The low proportion of *CW* detected across all thinning regimes may be explained by the seed source evaluated in this case (Coastal Plain, USA), since the incidence of this parameter has been reported by several authors [44,45]. The high proportion of *CW* observed under one of the most intensive thinning regimes (500-325 trees·ha⁻¹) is consistent with previous studies showing that abrupt changes in spacing and canopy structure after thinning. This can destabilize stem posture through crown imbalance or stem inclination, and thereby promote reaction wood formation, particularly under increased wind exposure [5,38]. This thinning regime combines advanced age and a low number of remaining trees, which alters the conditions of competition between individuals, as will be analyzed later.

However, another highly intensive regime (500-200 trees ha⁻¹) showed a notably lower incidence of *CW*, suggesting that thinning intensity alone does not fully explain the patterns observed. This could be because in situations of greater competition from neighbouring trees, stems tend to deviate toward areas with increased light availability

The higher levels of *CW* observed during the early years of growth were not related to the management variables evaluated in this study and, according to Larson et al. [30], are associated with the action of growth-promoting hormones. The temporal distribution of *CW* in growth rings indicated an increase in *CW* formation during the years following thinning across all regimes. This pattern suggests that the post-thinning period may represent a critical window for *CW* development. These results are consistent with numerous studies reporting that *CW* formation tends to increase in the years following thinning [2,46]. According to some authors, this effect is attributed to elevated levels of indole-3-acetic acid in the cambial region of several conifer

species, including pines [47]. These hormonal changes are also associated with wind action, which may be more evident in more intensively thinned stands. Stem curvature due to crown weight in sites frequently exposed to wind has also been reported as a contributing factor [37]. Additionally, some authors have linked stem taper with CW formation, although through mechanisms other than tree population density [48]. Results obtained from a trial of different pruning schemes located near our thinning trial show that CW presence occurs to a greater extent on the side opposite the predominant wind direction in that area (See Figure S5, Supplementary Materials). Records from 2009 onwards of wind direction and speed in the test area show that the most intense and most frequent winds occur from the south–southeast areas [23]. CW levels in the final stages of growth decreased markedly, indicating the disappearance of predisposing factors for its formation regardless of the thinning regime applied. The highest incidence of CW following thinning was detected around ages 18–20, but under the more intensive thinning regimes this effect persisted over longer periods. The reduction in CW presence after the thinning phase is consistent with the findings of Cown [49] and Voorhies [50], who evaluated *P. radiata* and *P. ponderosa*, respectively.

7.5.3. Implications of CW on Product Quality

The results obtained from board defects followed the same trend as the visual observations of CW presence on the log faces. The defects observed in boards containing CW are primarily attributed to greater longitudinal shrinkage compared to normal wood [2,51]. These shrinkage effects, which are more evident after drying, are mainly due to three characteristic features of CW relative to normal wood: (i) a larger microfibril angle in the S2 layer of tracheid walls [52,53], (ii) higher lignin and polysaccharide content [54–56], and (iii) greater tracheid wall thickness [57]. Several studies on *Pinus radiata* have also shown that the microfibril angle can be influenced by spacing, with more intensive thinning leading to an increase in this variable [58–61]. The increase in CW content can also affect wood properties that have implications for its end use. Results obtained by Diaz-Vaz et al. [4] show that CW has higher basic density values than normal wood, although these differences depend largely on the

level of this abnormal wood. This is mainly explained by an increase in the thickness of the tracheid walls, which in turn leads to higher compressive strength values parallel to the grain [62] while simultaneously decreasing the modulus of elasticity due to alterations in the microfibril angle [63], as mentioned previously. Another negative effect of the presence of *CW* is a reduction in the drying rate of boards in the order of 40 to 100% [64].

7.5.4. Relationship Between *CW* and Growth Dynamics

The correlation analysis suggests that *CW* development may be influenced by a combination of factors related to both tree growth dynamics and stand structure.

Although several variables were statistically associated with *CW* incidence, such as *G*, *SDI*, and *Grw*, most relationships were of moderate strength. The apparent contradiction in the relationship obtained between individual growth rates (obtained with more intensive thinning) and the presence of *CW* could indicate that the correlation values obtained (-0.45 and -0.37) are not due to a biological cause. Therefore, individual growth rates do not appear to be a relevant factor in the formation of this type of wood. At the time of the second intervention, the 500-200 trees ha⁻¹ regime (thinned at age 9) was still in a phase of moderate-to-low competition. On the other hand, the 500-325 trees ha⁻¹ regime (thinned at age 12) had already reached higher competition pressure by the time of intervention. Among all the regimes evaluated, this was the only case where competition level changed from severe to increasing at the time of the second thinning. This was reflected in the change in basal area growth rate, which may help explain the higher presence of *CW* [65]. According to de Villiers [66], thinning at advanced stages of the rotation tends to result in a high proportion of suppressed trees (due to elevated competition), which are relatively flexible and less stable.

In addition to these variables, other factors, such as wind action—which tends to be more evident under wider spacing—have also been reported to influence *CW* formation. From the stand management perspective, this outcome is particularly relevant, as it suggests that moderate or light thinning may help minimize *CW* formation and its negative impact on product quality.

Among the treatments evaluated in this study, the 500-325 trees ha⁻¹ regime most closely resembles those applied in commercial practice in terms of rotation timing and residual stand density. From the perspective of yield and wood quality, this regime recorded the highest levels of individual growth, as well as one of the highest levels of CW and board defects. In this regard, the implementation of some intermediate thinning should be considered, for example, around the age of 6, with a remaining population of 650 trees.ha⁻¹. This would prevent a more abrupt change in growth rates and exposure to wind. With a thinning scheme of around 650-450-325 trees.ha⁻¹, it would be possible to achieve high DBH values, which is one of the desired objectives, in addition to a low presence of CW. Implementing additional thinning would increase operating costs, so it would be necessary to analyze the cost-benefit ratio of this type of thinning scheme.

7.5.5. Value of Visual Assessment on Log Ends

Given the similarity observed in CW stain values at the ends of logs, visual grading does not appear to be sufficiently precise to quantify CW presence in all cases [67]. This limitation is particularly relevant when CW occurs at low to moderate levels, as was the case in this study.

Although the correlation was moderate ($r_s = 0.44$, p value < 0.0001), these findings confirm that external visual cues can serve as effective proxies in operational settings, particularly when more advanced assessments are not feasible. It should be noted, however, that not all trees with severe CW exhibit the characteristic darker staining bands [2]. Based on the results obtained in Uruguay under conditions similar to those of this study, identifying severe levels of CW presence improves the prediction of defects observed after sawing. However, the visual grading of logs is not very accurate as an indicator of the presence of WC in cases of low levels of this type of abnormal wood.

7.6. Conclusions

CW occurrence in *Pinus taeda* was influenced by thinning regime and subsequent stand development. Moderate thinning regimes resulted in lower CW-

related defects, indicating that thinning can be used as a management tool to improve wood quality. Therefore, operational thinning strategies should be evaluated for their ability to minimize CW occurrence while maintaining diameter growth objectives. Competition conditions, thinning time, and wind exposure are the factors that together have the greatest relationship with the formation of CW. Visible CW stain on log ends can assist in identifying higher-risk logs, but this should be used as a supportive, not exclusive, screening tool. The overall moderate relationships observed confirm that CW is multifactorial, highlighting the need for future research integrating silvicultural context with tree structural (e.g., stem lean and crown asymmetry) and environmental (e.g., wind exposure) factors to better explain CW formation and improve wood quality.

7.7. References

1. Gonzalez-Benecke, C.A.; Gezan, S.A.; Albaugh, T.J.; Allen, H.L.; Burkhart, H.E.; Fox, T.R.; Jokela, E.J.; Maier, C.A.; Martin, T.A.; Rubilar, R.A.; et al. Local and general above-stump biomass functions for loblolly pine and slash pine trees. *For. Ecol. Manag.* 2014, 334, 254–276. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.09.002>.
2. Malan, F.S.; Kassier, W.E. Compression wood in South African-grown *Pinus taeda*: Extent, causes and economic impact. *S. Afr. J. For.* 2002, 194, 27–36.
3. Schweitzer, V.R.; Matos, J.L.M.D. Origem do “lenho anormal de compressão” e efeitos sobre a qualidade da madeira de *Pinus taeda* da Região Serrana de Santa Catarina. *Aust. J. Basic Appl. Sci.* 2019, 13, 36–45. <https://doi.org/10.22587/ajbas.2019.13.10.7>.
4. Díaz-Vaz, J.E.; Valenzuela, L.; Vera, S. Compression wood in *Pinus radiata* II: Density and chemical composition. *Maderas Cienc. Tecnol.* 2009, 11, 123–132. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2009000200005>.
5. Lachenbruch, B.; Droppelmann, F.; Balocchi, C.; Peredo, M.; Pérez, E. Stem form and compression wood formation in young *Pinus radiata* trees. *Can. J. For. Res.* 2010, 40, 26–36. <https://doi.org/10.1139/X09-169>.

6. Du Toit, A.J. A study of the influence of compression wood on the warping of *Pinus radiata* D. Don timber. S. Afr. J. For. 1963, 44, 11–15.
7. Burdon, R.D. Compression wood in *Pinus radiata* clones on four different sites. N. Z. J. For. Sci. 1975, 5, 152–164.
8. Cown, D.J.; McConchie, D.L. Effects of thinning and fertiliser application on wood properties of *Pinus radiata*. N. Z. J. For. Sci. 1981, 11, 79–91.
9. Low, A.J. A study of compression wood in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Forestry 1964, 37, 179–201. <https://doi.org/10.1093/forestry/37.2.179>.
10. Riesco Muñoz, G.; Soilán Cañas, M.A.; Rodríguez Soalleiro, R. Physical properties of wood in thinned Scots pines (*Pinus sylvestris* L.) from plantations in northern Spain. Ann. For. Sci. 2008, 65, 507. <https://doi.org/10.1051/forest:2008026>.
11. Cameron, A.; Thomas, K. Effect of thinning on the development of compression wood in stems of Corsican pine (*Pinus nigra* L.). Eur. J. For. Res. 2008, 127, 247–251. <https://doi.org/10.1007/s10342-007-0200-8>.
12. Kılıç, A.; Sariusta, S.E.; Hafizoğlu, H. Chemical structure of compression wood of *Pinus sylvestris*, *P. nigra* and *P. brutia*. J. Bartın Fac. For. 2010, 12, 33–39. Available online: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20113211773> (accessed on April 2025).
13. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP). Superficie Forestal del Uruguay (Bosques Plantados). Available online: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca> (accessed on 12 July 2025).
14. Cattáneo, A.; Metol, C. Mejoramiento Genético Forestal en Uruguay. In Plan Nacional de Investigación Forestal; MGAP-INIA: Montevideo, Uruguay, 2003; pp. 35–49.
15. Duncker, P.; Spiecker, H. Incidence and structural properties of compression wood in European conifers-A review. Forestry 2014, 87, 456–471.
16. Díaz Vaz, O.J.E. Anatomía de Maderas; Universidad Austral de Chile: Valdivia, Chile, 2003.

17. Timell, T.E. Compression Wood in Gymnosperms; Springer-Verlag: Berlin, Germany, 1986.
18. Donaldson, L.A.; Singh, A.P. Formation and Structure of Compression Wood. In Cellular Aspects of Wood Formation; Fromm, J., Ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2013; pp. 225–256. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36491-4_9.
19. Wimmer, R.; Johansson, K. Effects of reaction wood on the performance of wood and wood-based products. In Reaction Wood; Gardiner, B., Barnett, J., Saranpää, P., Gril, J., Eds.; Springer: Berlin, Germany, 2013; pp. 211–234.
20. Bamber, R.K.; Burley, J. The wood properties of conifers. *For. Abstr.* 1983, 44, 567–643.
21. Cown, D.J. Effects of severe thinning and growth rate on wood characteristics of *Pinus radiata*. *N. Z. J. For. Sci.* 1974, 4, 456–471.
22. Museo Virtual de Suelos. Available online: <https://museovirtualdesuelos.net/> (accessed on 12 September 2025).
23. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). GRAS—Banco de Datos Agroclimáticos. Available online: <https://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico> (accessed on 16 October 2025).
24. Donaldson, L.; Xu, P.; Cairns, T.; Nieuwoudt, M. Quantification of Compression Wood Severity in Tracheids of Radiata Pine (*Pinus radiata* D. Don) Using Confocal Microscopy and Image Analysis. *Wood Sci. Technol.* 2009, 43, 557–575. doi:10.1016/j.jsb.2009.09.006.
25. Duncker, P. Detection and Grading of Compression Wood. In From Science to Quality Products; Springer: Berlin, Germany, 2010; pp. 155–175. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10814-3_7.
26. Wardrop, A.B.; Dadswell, H.E. The nature of reaction wood II. The cell wall organization of compression wood tracheids. *Aust. J. Sci. Res. B Biol. Sci.* 1950, 3, 1–13. <https://doi.org/10.1071/B19500001>.
27. Wardrop, A.B.; Davies, G.W. The nature of reaction wood VIII. The structure and differentiation of compression wood. *Aust. J. Bot.* 1964, 12, 24–38. <https://doi.org/10.1071/BT9640024>.

28. Côté, W.A., Jr.; Day, A.C.; Kutscha, N.P.; Timell, T.E. Studies on compression wood V. Nature of compression wood formed in the early springwood of conifers. *Holzforschung* 1967, 21, 180–186. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1967.21.6.180>.
29. Kraus, J.E.; Arduin, M. *Manual Básico de Métodos em Morfologia Vegetal*; Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro: Seropédica, Brazil, 1997.
30. Larson, P.R.; Kretschmann, D.E.; Isebrands, J.G. *Formation and Properties of Juvenile Wood in Southern Pines: A Synopsis*; USDA Forest Service, Forest Products Laboratory: Rhinelander, WI, USA, 2001.
31. Zobel, B.J.; van Buijtenen, J.P. *Wood Variation: Its Causes and Control*; Springer-Verlag: Berlin, Germany, 1989. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-74069-5>
32. Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT). *Maderas—Determinación de las deformaciones: Arqueadura, encorvadura, alabeo y torsión (UNIT 1461)*; UNIT: Montevideo, Uruguay, 2010.
33. UNE-EN 14081-1:2016+A1:2020; *Timber Structures—Strength Graded Structural Timber with Rectangular Cross Section—Part 1: General Requirements*. Asociación Española de Normalización (UNE): Madrid, Spain, 2020.
34. Di Rienzo, J.A.; Casanoves, F.; Balzarini, M.G.; González, L.; Tablada, M.; Robledo, C.W. *InfoStat Software, Version 2020*; Grupo InfoStat, FCA; Universidad Nacional de Córdoba: Córdoba, Argentina, 2020.
35. Bendtsen, B.A.; Senft, J. Mechanical and anatomical properties in individual growth rings of plantation-grown eastern cottonwood and loblolly pine. *Wood Fiber Sci.* 1986, 18, 23–38.
36. Fourcaud, F.; Blaise, P.; Lac, P.; Castéra, P.; De Reffye, P. Numerical modelling of shape regulation and growth stresses in trees: II. Implementation in the AMAPpara software and simulation of tree growth. *Trees* 2003, 17, 31–39. <https://doi.org/10.1007/s00468-002-0203-5>.
37. Macdonald, E.; Gardiner, B.; Mason, W. The effects of transformation of even-aged stands to continuous cover forestry on conifer log quality and wood properties in the UK. *Forestry* 2010, 83, 1–16. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpp023>.

38. Gardiner, B.; Barnett, J.; Saranpää, P.; Gril, J. The Biology of Reaction Wood; Springer: Berlin, Germany, 2014.
39. Fassola, H.E.; Moscovich, F.A.; Ferrere, P.; Rodríguez, F.A. Evolución de las principales variables de árboles de *Pinus taeda* L. sometidos a diferentes tratamientos silviculturales en el nordeste de la provincia de Corrientes, Argentina. *Ciência Florest.* 2002, 12, 51–60. <https://doi.org/10.5902/198050981735>.
40. Crechi, E.; Fassola, H.; Moscovich, F.; Fernández, R.; Friedl, R.; Falher, J. Efecto de la intensidad y oportunidad de raleo en *Pinus taeda*. 2000. Informe Técnico N° 25. Publicado en: 2° Simposio Latino-Americano Sobre Manejo Forestal. UFSM. Pós Graduação En Ingeniería Forestal. Santa María, RS, Brasil. p. 189-210.
41. Martiarena, R.; Crechi, E.; Von Wallis, M.P.A.; Marquina, J.; Monteoliva, S. Effect of thinning treatment on growth and wood density of *Pinus taeda* planted in Misiones, Argentina. *Ciência Florest.* 2014, 24, 655–663.
42. Uranga, M.L. Modelación de la Respuesta de *Pinus taeda* a Diferentes Regímenes de Raleo en la Zona Norte del País. Master's Thesis, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, 2017.
43. Pezzutti, R.; Caldato, S.; Schenone, R.; Chrapek, C. Elaboración de un diagrama de manejo de densidad de plantaciones de *Pinus taeda* para productores forestales. In Proceedings of the XXXIX Jornadas Forestales de Entre Ríos, Concordia, Argentina, 7 November 2020; pp. 1–5.
44. Malan, F.; Kassier, H. Abnormal compression wood in *Pinus taeda*: A review of current knowledge and proposed future strategy. *S. Afr. J. For.* 2002, 194, 43–51.
45. Nanayakkara, B.; Lagane, F.; Hodgkiss, P.; Dibley, M.; Smaill, S.; Riddell, M.; Harrington, J.; Cown, D. Effects of induced drought and tilting on biomass allocation, wood properties, compression wood formation and chemical composition of young *Pinus radiata* genotypes (clones). *Holzforschung* 2014, 68, 455–465. <https://doi.org/10.1515/hf-2013-0053>.
46. Barbour, R.J.; Marshall, D.D.; Lowell, E.C. Managing for wood quality. In Applications of Process Modeling in Forest Management; Springer: Dordrecht,

- The Netherlands, 2003; pp. 299–336. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0309-3_11.
47. Sundberg, B.; Tuominen, H.; Anthony, C.H. Effects of indole-3-acetic acid (IAA) transport. In *Plant Growth Substances 1991*; Springer: Berlin, Germany, 1994; pp. 469–476.
 48. Van Der Sijde, H.A.; Shaw, M.; Van Wyk, G. Reaction wood in *Pinus taeda*-A preliminary report. *S. Afr. J. For.* 1985, 133, 27–32. <https://doi.org/10.1080/00382167.1985.9629570>.
 49. Cown, D.J. Comparison of the effects of two thinning regimes on some wood properties of radiata pine. *N. Z. J. For. Sci.* 1973, 4, 540–551.
 50. Voorhies, G. Incidence and severity of compression wood in thinned stands of young-growth ponderosa pine. *Ariz. For. Notes* 1982, 15, 12.
 51. Chen, Q.; Hu, Z.; Chang, H. Micro analytical methods for determination of compression wood content in loblolly pine. *J. Wood Chem. Technol.* 2007, 27, 169–178. <https://doi.org/10.1080/02773810701700810>.
 52. Donaldson, L.A.; Turner, J.C.P. The influence of compression wood and microfibril angle on the occurrence of distortion in window frames made from *Pinus radiata*. *Holz Roh Werkst.* 2001, 59, 163–168. <https://doi.org/10.1007/s001070100201>.
 53. Xu, P.; Liu, H.; Evans, R.; Donaldson, L.A. Longitudinal shrinkage behaviour of compression wood in radiata pine. *Wood Sci. Technol.* 2009, 43, 423–439. <https://doi.org/10.1007/s00226-008-0228-z>.
 54. Brennan, M.; McLean, J.P.; Altaner, C.M.; Ralph, J.; Harris, P.J. Cellulose microfibril angles and cell-wall polymers in different wood types of *Pinus radiata*. *Cellulose* 2012, 19, 1385–1404. <https://doi.org/10.1007/s10570-012-9697-1>.
 55. Leonardon, M.; Altaner, C.M.; Vihermaa, L.; Jarvis, M.C. Wood shrinkage: Influence of anatomy, cell wall architecture, chemical composition and cambial age. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 2010, 68, 87–94. <https://doi.org/10.1007/s00107-009-0355-8>.
 56. Zhang, M.; Smith, B.G.; McArdle, B.H.; Chavan, R.R.; James, B.J.; Harris, P.J. Dimensional changes of tracheids during drying of *Pinus radiata* compression

- woods: A study using variable-pressure scanning electron microscopy (VP-SEM). *Plants* 2018, 7, 14. <https://doi.org/10.3390/plants7010014>.
57. Harris, J.M. Physical properties, resin content, and tracheid length of lodgepole pine grown in New Zealand. *N. Z. J. For. Sci.* 1973, 3, 263–278.
 58. Lasserre, J.P.; Mason, E.G.; Watt, M.S.; Moore, J.R. Influence of initial planting spacing and genotype on microfibril angle, wood density, fibre properties and modulus of elasticity in *Pinus radiata* D. Don corewood. *For. Ecol. Manag.* 2009, 258, 1924–1931. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.07.028>.
 59. Watt, M.S.; Zoric, B.; Kimberley, M.O.; Harrington, J. Influence of stocking on radial and longitudinal variation in modulus of elasticity, microfibril angle, and density in a 24-year-old *Pinus radiata* thinning trial. *Can. J. For. Res.* 2011, 41, 1422–1431. <https://doi.org/10.1139/x11-070>.
 60. Grace, J.C.; Evans, R. Impact of thinning and pruning on selected wood properties in individual radiata pine trees in New Zealand. *N. Z. J. For. Sci.* 2012, 42, 117–129. ISSN 1179-5395 (on-line).
 61. Erasmus, J.; Kunneke, A.; Drew, D.M.; Wessels, C.B. The effect of planting spacing on *Pinus patula* stem straightness, microfibril angle and wood density. *Forestry* 2018, 91, 247–258. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpy005>.
 62. Gindl, W. Comparing mechanical properties of normal and compression wood in Norway spruce: The role of lignin in compression parallel to the grain. *Holzforschung* 2002, 56, 395–401. <https://doi.org/10.1515/HF.2002.062>.
 63. Sonderegger, W.; Mandallaz, D.; Niemz, P. An investigation of the influence of selected factors on the properties of spruce wood. *Wood Sci. Technol.* 2008, 42, 281–298. <https://doi.org/10.1007/s00226-007-0173-2>.
 64. Davis, C.P.; Carrington, C.G.; Sun, Z.F. The influence of compression wood on the drying curves of *Pinus radiata* dried in dehumidifier conditions. *Dry. Technol.* 2007, 20, 2005–2026. <https://doi.org/10.1081/DRT-120015581>.
 65. Barger, R.; Ffolliott, P. Factors affecting occurrence of compression wood in individual ponderosa pine trees. *Wood Sci. Technol.* 1976, 8, 201–208.

66. de Villiers, A.M. Silvicultural, exploitation and conversion methods that affect timber quality. S. Afr. For. J. 1966, 56, 5–10. <https://doi.org/10.1080/00382167.1966.9629939>.
67. Donaldson, L.A.; Singh, A.P.; Yoshinaga, A.; Takabe, K. Lignin distribution in mild compression wood of *Pinus radiata*. Can. J. Bot. 1999, 77, 41–50. <https://doi.org/10.1139/b98-190>.