



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
INGENIERÍA FORESTAL

**ANALISIS COMPARATIVOS DE PROPUESTAS SILVICULTURALES EN
PLANTACIONES DE *Pinus radiata* D.DON PARA LA PRODUCCION DE
MADERA ESTRUCTURAL**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de
Concepción para otorgar al título profesional de Ingeniero/a Forestal

POR: Valentina Urquiola Catrileo

Profesor Guía: Rosa María Alzamora Mallea

Octubre, 2025

Concepción, Chile

© 2025, Valentina Urquiola Catrileo

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

ANALISIS COMPARATIVOS DE PROPUESTAS SILVICULTURALES EN
PLANTACIONES DE *PINUS RADIATA* PARA LA PRODUCCION DE MADERA
ESTRUCTURAL, MEDIANTE SIMULACIONES

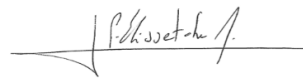


Profesor Guía

Rosa María Alzamora Mallea

Profesora Asociada

Ingeniero Forestal, PhD.



Profesor Guía

Juan Pedro Elissetche

Profesor Asistente, Dr.

DEDICATORIA

Es un honor para mí dedicar este trabajo y expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que han sido parte fundamental de este camino.

En especial, a una mujer fuerte, mi madre, quien ha sido, es y seguirá siendo mi mayor inspiración y motor en la vida. La primera persona que creyó en mí, que me enseñó el valor del esfuerzo y la perseverancia. Gracias por cada sacrificio, por tu dedicación y por todo el amor con que me has acompañado en cada etapa.

Sé que una vida no bastará para agradecerte todo lo que has hecho por mí. Tus sacrificios, tu fuerza y tu amor incondicional me enseñaron a no rendirme y a creer en mí. Cada logro que hoy celebro es el reflejo de todo lo que me diste. Este título no es solo mío, es nuestro, porque todo lo que soy y lo que he logrado, te lo debo.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo, quiero agradecer a Dios y a mis ángeles, quienes me han acompañado en cada paso de este proceso. Solo ellos saben lo difícil que fue llegar hasta aquí. Cómo olvidar aquel tiempo, en plena pandemia, cuando un ramo casi me hace dejarlo todo... pero la perseverancia, su compañía y las ganas de salir adelante me impidieron rendirme. Realmente espero que se sientan orgullosos de la mujer en la que me he convertido.

Quiero agradecer de manera especial a un angelito en particular: a ti, mi querido Ignacio. Dondequiera que estés, sé que nunca me has dejado caer y que siempre has creído en mí, incluso más de lo que yo misma lo he hecho. Fuiste quien abrió las puertas para que hoy esté donde estoy.

Recuerdo cuando en el liceo hablabas maravillas de una ciudad llamada Concepción, de su universidad, y tus palabras fueron las que me impulsaron a soñar con ese lugar que aún no conocía. Gracias a ti, sin dudarlo, elegí venir a esta ciudad, y no me equivoqué. Aunque al principio lamenté que no quisieras venir, hoy entiendo que todo tiene un propósito. Gracias por creer en mí, por decirme que sería la mejor en lo que hiciera. Te extraño siempre, y me gusta pensar que estás en algún lugar cumpliendo tu sueño de ser el médico que tanto anhelabas. Besitos al cielo.

A mi querido compañero de departamento, Simón, con quien un día tuvimos la loca idea de venirnos a estudiar a Concepción sin conocer nada, pero sabiendo que nos tendríamos el uno al otro. Desde el momento en que recibimos los resultados y realizamos la postulación, decidimos que viviríamos esta etapa juntos, acompañándonos como una familia lejos de casa. Gracias por el apañé incondicional durante todos estos años, por tu respeto, tu comprensión y por estar ahí siempre que lo necesité. Fuiste un gran pilar en este camino, y me alegra haber compartido esta etapa de vida contigo.

A mis compañeros y compañeras de la universidad, especialmente a quienes me acompañaron cuando la vida se volvió un poco difícil, gracias por su apoyo, cariño y amistad.

A ti, mi querido IG, gracias por creer en mí y apoyarme cuando tomé la decisión de venirme a estudiar lejos de casa, aun cuando eso significara poner distancia entre nosotros. Estuviste conmigo en todo momento, acompañándome con amor y paciencia en cada paso. Gracias por admirarme, por motivarme a ser mejor cada día, por celebrar conmigo cada pequeño logro como si fuera tuyo, y por no dejarme caer cuando el camino se volvía cuesta arriba. Tu apoyo ha sido una de mis fortalezas en este proceso.

A mi familia, que siempre confió en mí, especialmente a mi mamita, la luz de mi vida, mi fuente de inspiración, mi ejemplo y mi fuerza. Tus ganas de sacarme adelante y de verme crecer fueron mi mayor motor para convertirme en quien soy hoy.

Quiero agradecer especialmente a la profesora Rosa Alzamora, por tenderme la mano y mostrarme la luz cuando solo veía oscuridad y desesperanza al finalizar esta etapa. Gracias por creer en mí, profesora, y por ayudarme a recuperar la confianza en mí misma.

A mis compañeritos de la chamba (ellos saben quiénes son), gracias por acompañarme en esta última etapa universitaria, por los consejos, la ayuda y por regalarme su tiempo.

A mi querido señor Constanzo, por acompañarme en esta recta final, por tus palabras de aliento, tus consejos, por escucharme y por prestarme tu monitor para poder terminar este trabajo.

No puedo dejar fuera a mis compañeritas de cuatro patas, Niña y Bella, quienes me acompañaron tantas noches de estudio y fueron mis partner durante las clases online en pandemia. Gracias por ser mi compañía y mi contención en los días difíciles

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	xiii
ABSTRACT.....	xiv
I. INTRODUCCIÓN.....	15
II. METODOLOGÍA	19
2.1 Descripción del área de estudio	19
2.2 Fuente de datos.....	20
2.3 Evaluación económica y rendimiento volumétrico	22
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
3.1 Análisis económico del rendimiento volumétrico derivado de alternativas silvícolas de plantaciones de <i>Pinus radiata</i> orientadas a la producción de madera estructural. ..	25
3.2 Análisis de la aplicación del supuesto de aumentar el valor de la primera troza en un 20%.	28
3.3 Análisis comparativo del rendimiento volumétrico derivado de alternativas silvícolas de plantaciones de <i>Pinus radiata</i> orientadas a la producción de madera estructural. ..	29
CONCLUSIONES.....	38
BIBLIOGRAFÍA.....	41

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Esquemas de manejo	21
Tabla 2.2. Esquema de productos	22
Tabla 3.1. Diferencia de VPS de cada uno de los esquemas de manejo aplicados con y sin fertilización en un IS 25.	26
Tabla 3.2. Diferencia de VPS de cada uno de los esquemas de manejos aplicados con y sin fertilización en un IS 27.	27
Tabla 3.3. Diferencia de volumen aserrable estructural con volumen aserrable total de cada esquema de manejo con y sin fertilización en un IS 25.	32
Tabla 3.4. Diferencia de volumen aserrable estructural con volumen aserrable total de cada esquema de manejo con y sin fertilización en un IS 27.	35

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 3.1. Gráfico de comparación del VPS entre los manejos con y sin fertilización en índices de sitio 25.	26
Figura 3.2. Gráfico de comparación del VPS entre los manejos con y sin fertilización en índices de sitio 27.	27
Figura 3.3. Gráfico de comparación del VPS entre los manejos con y sin fertilización en ambos índices de sitio con el aumento del 20% de valor de la primera troza.....	29
Figura 3.4. Volumen total de producto aserrable estructural en comparación al volumen total aserrable para cada manejo en sitios IS 25.....	33
Figura 3.5. Volumen total de productos aserrable estructural en comparación al volumen total aserrable para cada manejo, en sitios IS 27.....	35

RESUMEN

Se evaluó, mediante simulaciones con el Modelo Nacional de Simulación (MNS), el efecto de seis esquemas silvícolas con y sin fertilización sobre el volumen y rentabilidad en plantaciones de *Pinus radiata* ubicadas en sitios de baja y media productividad (IS 25 e IS 27). Se definió como madera estructural la suma de los tres primeros productos aserrables (Aserrable 1–3), proyectados a la edad de rotación óptima determinada por el mayor Valor Potencial del Suelo (VPS) al 8 %.

En sitios IS 25, el esquema 6 (800 árb/ha, con poda y fertilización) alcanzó el mayor volumen estructural (66,8 m³/ha), aunque con menor VPS que el esquema más rentable. En IS 27, el esquema 6 también obtuvo el mayor volumen (72,1 m³/ha), mientras que el esquema 3 (1000 árb/ha, con fertilización) logró el mayor VPS (1936 USD/ha). Esto evidencia que densidades intermedias logran un equilibrio entre volumen y rentabilidad.

La fertilización mostró un efecto positivo principalmente en sitios más productivos, mientras que en IS 25 su impacto fue limitado. Los resultados confirman que es posible orientar el manejo silvícola hacia la producción de madera estructural, incluso en sitios tradicionalmente marginales, mejorando su valor y competitividad forestal.

ABSTRACT

Using the National Simulation Model (MNS), six silvicultural schemes with and without fertilization were simulated to assess volume and profitability in *Pinus radiata* plantations located on low- and medium-productivity sites (SI 25 and SI 27). Structural timber volume was defined as the sum of the first three sawlog products (Sawlog 1–3), evaluated at the optimal rotation age determined by the maximum Soil Expectation Value (SEV) at an 8% discount rate.

In SI 25, Scheme 6 (800 trees/ha, pruning + fertilization) achieved the highest structural volume (66.8 m³/ha) but a lower SEV than the most profitable scheme. In SI 27, Scheme 6 also reached the highest structural yield (72.1 m³/ha), while Scheme 3 (1000 trees/ha, with fertilization) obtained the highest SEV (USD 1936/ha). This indicates that intermediate densities offer a better balance between volume and economic return.

Fertilization showed a stronger positive effect in higher-productivity sites, while its influence in SI 25 was limited. Results demonstrate that *Pinus radiata* plantations can be effectively managed for structural timber production, even in marginal sites, by optimizing density, pruning, and fertilization to enhance wood quality and market value.

I. INTRODUCCIÓN

El sector forestal chileno constituye uno de los pilares fundamentales de la economía nacional, aportando significativamente al producto interno bruto, las exportaciones y el empleo (INFOR, 2024). Este desarrollo ha sido impulsado principalmente por el manejo de plantaciones forestales, que abarcan aproximadamente 3,1 millones de hectáreas, representando el 17,37% del total de bosques del país (CONAF, 2023). En este contexto, la producción de madera estructural ha cobrado creciente relevancia, en línea con las tendencias globales hacia la construcción sostenible y el uso de materiales renovables (Harte, 2017; INFOR, 2024).

En Chile, esta tendencia se ha visto reforzada por el creciente déficit habitacional y la necesidad de soluciones constructivas más rápidas, sostenibles y eficientes. Según CORMA (2023), la construcción en madera representa una oportunidad estratégica para el país, tanto por su capacidad de generar empleos como por su potencial para reducir emisiones de CO₂. Además, estudios recientes indican que la madera estructural puede reducir los costos operacionales de vivienda entre un 23% y 53%, y que su uso en edificios de mediana altura es hasta un 15% más económico que otros materiales convencionales (CIM UC-CORMA, 2023).

En este contexto, Chile cuenta con una capacidad instalada y una base forestal suficiente para abastecer una industria de construcción en madera estructural a gran escala, especialmente mediante el uso de *Pinus radiata* manejado con criterios técnicos adecuados (CORMA & PUC, 2023).

Entre las especies forestales utilizadas en Chile, el *P.radiata* D.Don destaca como la más ampliamente plantada, ocupando cerca de 1,8 millones de hectáreas, lo que equivale al 56% de las plantaciones forestales del país (Campo Galego, 2022). Su rápido crecimiento, adaptabilidad a diversas condiciones edafoclimáticas y buena respuesta a prácticas silvícolas intensivas lo han posicionado como un recurso estratégico para la producción de madera de calidad (Rubilar et al., 2008; Maderea, 2023). Además, su madera presenta propiedades tecnológicas que permiten su uso en múltiples aplicaciones industriales, siendo especialmente valorada en la producción de madera estructural por su rigidez, estabilidad dimensional y resistencia mecánica (Lima, 2018; Madera21, 2023).

La calidad estructural de la madera de *P.radiata* está fuertemente influenciada por las decisiones de manejo silvícola adoptadas durante el ciclo de rotación. Prácticas como la poda, el raleo y el control de la densidad inicial han demostrado ser efectivas para mejorar la forma del árbol, reducir defectos y maximizar la proporción de trozas aptas para uso estructural (Ferrere et al., 2015; Meneses y

Guzmán, 2000). Asimismo, tecnologías de evaluación no destructiva, como la medición acústica y la espectroscopía infrarroja cercana (NIR), permiten anticipar propiedades físicas y mecánicas de la madera, facilitando la clasificación temprana de árboles con destino estructural (Gavilán et al., 2023; Schimleck et al., 2019).

En este escenario, los modelos de simulación forestal se han consolidado como herramientas clave para evaluar el impacto de distintas alternativas silvícolas sobre el crecimiento, rendimiento y calidad de la madera. Modelos como SIMANFOR, FORECAST y el Modelo Nacional de Simulación (MNS) permiten proyectar escenarios de manejo, optimizar decisiones técnicas y reducir la incertidumbre en la planificación forestal (Rachid Casnati, 2024; MNS Simulación, 2023). Sin embargo, aún persisten brechas en la comparación sistemática de esquemas silvícolas bajo condiciones locales específicas, especialmente en lo que respecta a la optimización conjunta de calidad estructural y rendimiento volumétrico (Wilson & Watt, 1976; Yallop, 2021).

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo general realizar un análisis comparativo de propuestas silviculturales en plantaciones de *P. radiata* orientadas a la producción de madera estructural, mediante escenarios simulados. Para ello, se plantean dos objetivos específicos: (a) analizar comparativamente el rendimiento volumétrico derivado de distintas alternativas

silvícolas, y (b) realizar un análisis económico asociado a dicho rendimiento, ambos mediante simulaciones.

Este enfoque busca aportar evidencia técnica que permita orientar decisiones de manejo silvícola hacia esquemas más eficientes y sostenibles, que maximicen tanto la calidad estructural como el rendimiento económico de las plantaciones de *P.radiata* en Chile.

II. METODOLOGÍA

2.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio corresponde a sectores ubicados en la zona centro-sur de Chile, específicamente en sitios clasificados como de baja productividad, con índices de sitio (IS) 25 y 27. En el contexto forestal chileno, estos sitios con comúnmente considerados como “sitios malos” debido a sus limitaciones edafoclimáticas, como suelos de baja fertilidad, escasa profundidad efectiva y condiciones de humedad subóptimas (Rubilar et al., 2008; INFOR 2024).

Tradicionalmente, estos sitios han sido considerados poco aptos para la producción de madera de apariencia o trozas “Clear”, debido a su menor capacidad de generar fustes de alta calidad visual y dimensional. Sin embargo, esta investigación propone un nuevo enfoque de manejo silvicultural, orientado a maximizar la producción de madera estructural, aprovechando las propiedades mecánicas del *P.radiata* que pueden mantenerse incluso en condiciones de crecimiento más restringidas (Gavilán et al., 2023; Hermoso et al., 2005).

El objetivo es revalorizar estos sitios mediante esquemas de manejo que prioricen la obtención de trozas con características adecuadas para uso

estructural, como rigidez, resistencia y estabilidad dimensional, más la apariencia externa, para ellos, se evaluaron distintos tratamientos silvícolas (Densidad inicial, poda, raleo y fertilización) mediante simulaciones considerando su impacto en el rendimiento volumétrico y económico bajo condiciones realistas.

Este enfoque busca aportar evidencia técnica que permita optimizar el uso de terrenos forestales marginales, promoviendo una gestión más eficiente y sostenible del recurso forestal, y ampliando las oportunidades de producción en zonas tradicionalmente subutilizadas.

2.2 Fuente de datos

El presente estudio se basa en simulaciones, los datos utilizados corresponden a escenarios simulados a partir de parámetros silvícolas representativos de plantaciones de *P.radiata* en sitios de baja productividad (IS 25 e IS 27). Estos datos fueron generados utilizando el modelo nacional de simulación (MNS; versión estudiantil 2023), una herramienta ampliamente validada para la proyección del crecimiento y rendimiento de plantaciones forestales en Chile (MNS Simulación, 2023; Rachid Casnati, 2024).

Los esquemas de manejo simulados consideran combinaciones de densidad inicial, poda, raleo y fertilización, con el objetivo de evaluar su impacto en la

producción de madera estructural. En total se simularon seis esquemas de manejo como se observa en la tabla 1.

Cabe destacar que la poda aplicada en los esquemas de manejo no tuvo como objetivo la obtención de trozas libre de nudos para productos de apariencia, sino que fue diseñada estratégicamente para evitar la formación de nudos muertos. Este tipo de defecto descalifica la madera para uso estructural según normas chilenas (NCh 1198), por lo que su prevención mediante poda oportuna es esencial para asegurar la calidad mecánica requerida en aplicaciones constructivas.

Tabla 2.1. Esquemas de manejo

Esquema	Densidad inicial (arb/ha)	Poda (edad-arb/ha)	Raleo (edad-arb/ha)
1	1200	7 años - 700 arb/ha	7 años - 700 arb/ha
2	1200	6 años - 800 arb/ha	6 años - 800 arb/ha
3	1000	7 años - 700 arb/ha	7 años - 700 arb/ha
4	1000	6 años - 800 arb/ha	6 años - 800 arb/ha
5	800	5 años - 800 arb/ha	-
6	800	6 años - 800 arb/ha	-

En el proceso de simulación, se aplicó un criterio de trozado técnico basado en especificaciones industriales, considerando productos diferenciados por diámetro mínimo y largo comercial. Los productos fueron clasificados en aserrables y pulpable como se observa en la tabla 2. Esta clasificación permite proyectar el

rendimiento comercial de las trozas en función de su potencial estructural, ya que los productos aserrables 1, 2 y 3 representan la fracción con mayor probabilidad de cumplir requisitos mecánicos para uso en construcción.

Tabla 2.2. Esquema de productos

Productos	D. mínimo (cm)	Largo (m)	US\$/m3
Aserrable 1	32	4.15	65.53
Aserrable 2	28	3.60	60.1
Aserrable 3	28	3.30	59.0
Aserrable 4	16	3.00	57.60
Pulpable	8	2.44	25.7

2.3 Evaluación económica y rendimiento volumétrico

Cada combinación fue evaluada en dos niveles de calidad de sitio (IS25 e IS 27), con y sin fertilización, lo que permitió generar un total de 24 escenarios simulados. Para cada uno de ellos se proyectó el crecimiento hasta la edad de rotación óptima, determinada por la rentabilidad mediante el cálculo del Valor Potencial del Suelo (VPS) al 8% de tasa de descuento, considerando los costos de establecimiento y manejo de las plantaciones, tales como: roce, subsolado, control de maleza, fertilización, plantación, poda, raleo y cosecha, obtenidos de empresas forestales certificadas. Asimismo, se consideraron los ingresos por venta de productos para trozas aserrables y pulpables.

$$VPS = \frac{V(t) - Cr}{(1 + t)^1 - 1} - Co - \frac{A}{r}$$

Donde,

Co- Costo de Establecimiento de la primera plantación

Cr-Costo de Establecimiento de las siguientes plantaciones

V(t)- Ingresos por corta final

r-Tasa de interés (%)

A-Costo de administración anual

t-Turno de rotación

Los productos obtenidos fueron clasificados en dos categorías:

- Madera aserrable: principal objetivo del estudio, con potencial estructural.
- Madera pulpable: subproducto de menor valor.

Los resultados de volumen por producto y el análisis económico fueron comparados entre esquemas, permitiendo identificar las combinaciones más eficientes para la producción de madera estructural en sitios de baja productividad.

El volumen estructural se definió a partir de los 3 primeros productos aserrables generados en las simulaciones, dado que estas trozas concentran las características más favorables para fines estructurales. Esta aproximación es coherente con lo señalado por estudios como los de Gavilán et al. (2023) y

Schimleck et al. (2019), que destacan la importancia de dichas propiedades en la clasificación mecánica de la madera. Bajo este criterio, se proyecta el volumen potencialmente utilizable para usos estructurales, considerando que estas secciones del fuste son las más aptas para cumplir con estándares de resistencia y rigidez.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis económico del rendimiento volumétrico derivado de alternativas silvícolas de plantaciones de *P.radiata* orientadas a la producción de madera estructural.

El análisis económico se realizó considerando una tasa de descuento del 8%, evaluando el valor potencial del suelo (VPS) como indicador de rentabilidad para cada esquema, determinando el año de rotación óptimo.

3.1.1 Mejor VPS para cada esquema en sitios IS25

Para IS 25, los resultados muestran que la fertilización incrementa el VPS en todos los esquemas, siendo el esquema 4 con fertilización, el que alcanza el valor más alto (1393.9 USD/ha), como se observa en la figura 3.1, evidenciando la mayor rentabilidad en esquemas con densidades iniciales más altas, combinadas con poda y un raleo. Este resultado sugiere que, en sitios de productividad más baja, la intensificación del manejo silvícola, mediante fertilización y tratamientos como la poda y el raleo puede compensar las limitaciones del sitio, optimizando el crecimiento individual de los árboles y mejorando la calidad de la madera. Además, el valor del VPS obtenido respalda la inversión en prácticas de manejo, al demostrar el retorno económico.

Tabla 3.1. Diferencia de VPS de cada uno de los esquemas de manejo aplicados con y sin fertilización en un IS 25.

Esquema	Con fertilización		Sin fertilización	
	VPS	Rotación	VPS	Rotación
1	1087.9	23	992.7	23
2	992.4	21	883.9	23
3	1177.1	23	1045.8	23
4	1393.9	22	937.5	23
5	913.7	21	800.4	21
6	1278.4	23	1127.2	23

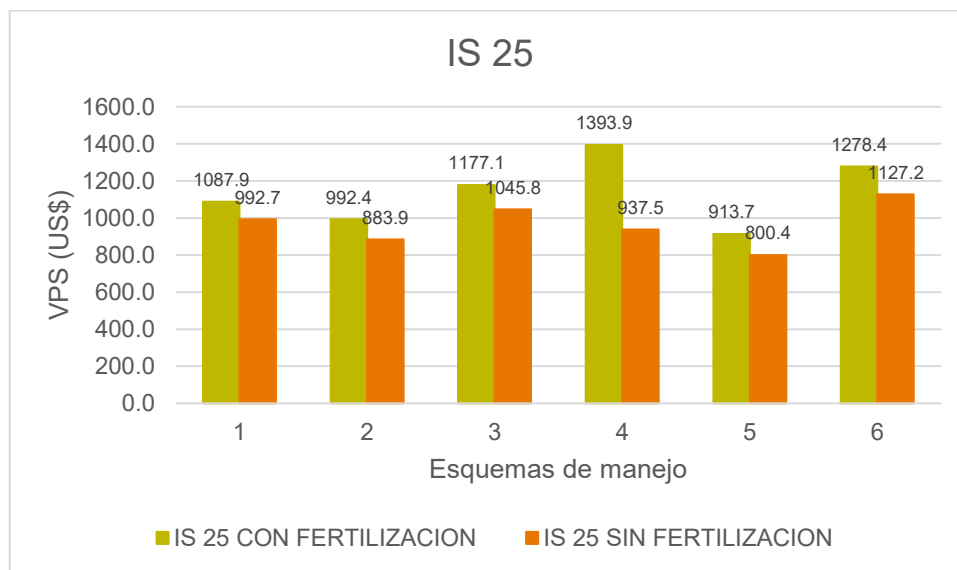


Figura 3.1. Gráfico de comparación del VPS entre los manejos con y sin fertilización en índices de sitio 25.

3.1.2 Mejor VPS para cada esquema en sitios IS27

En IS 27, el efecto de la fertilización es igualmente positivo, con incrementos de hasta 12% en el VPS respecto de los esquemas sin fertilización. El esquema 3 con fertilización se posiciona como la alternativa más rentable, alcanzando un

VPS máximo de 1936.0 USD/ha, mientras que el esquema 2 sin fertilización muestra el menor valor económico con 1430.1 USD/ha como se muestra en la figura 3.2 Estos resultados confirman que, en sitios de más productividad, la fertilización potencia aún más el rendimiento económico, especialmente cuando se combina con esquemas silvícolas que incluyan poda y raleo.

Tabla 3.2. Diferencia de VPS de cada uno de los esquemas de manejos aplicados con y sin fertilización en un IS 27.

Esquema	Con fertilización		Sin fertilización	
	VPS	Rotación	VPS	Rotación
1	1846.1	21	1675.6	22
2	1592.5	21	1430.1	22
3	1936.0	21	1786.0	21
4	1679.0	21	1493.7	22
5	1766.7	21	1628.5	22
6	1902.6	21	1718.8	22

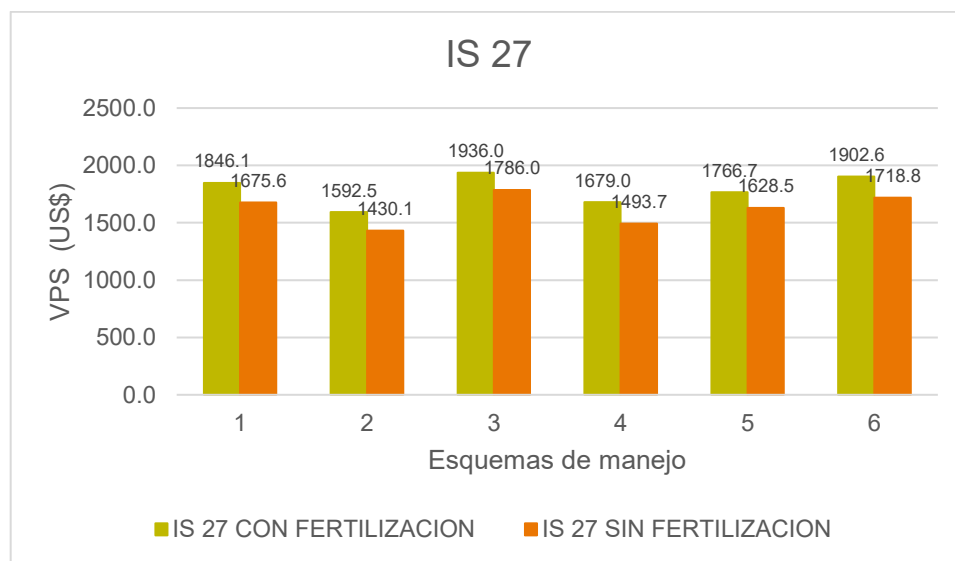


Figura 3.2. Gráfico de comparación del VPS entre los manejos con y sin fertilización en índices de sitio 27.

Estos resultados son coherentes con lo reportado con Wilson y Watt (1976), quienes destacan que el mayor retorno económico en plantaciones de *P.radiata* se logra mediante esquemas que maximizan tanto el volumen como la calidad de la madera producida. Además, el incremento en el VPS asociado a la fertilización concuerda con Rubilar et al. (2008) y Toro Vergara (2004), quienes demostraron que prácticas de manejo intensivo compensan las limitaciones de sitio, aumentando la proporción de trozas comerciales y de alto valor.

3.2 Análisis de la aplicación del supuesto de aumentar el valor de la primera troza en un 20%.

Al no contar con disposiciones de mercado diferenciadas por grados estructurales, se optó por incorporar un aumento del 20 % en el valor de la primera troza para aquellos esquemas con mayor potencial estructural. Esta decisión se fundamenta en el estudio de Alzamora (2010), quien observó que, en una muestra de 71 trozas de *P.radiata* no podadas, un aumento en la velocidad acústica desde 3.2 a 3.4 km/s (correspondiente a un incremento del módulo de elasticidad desde 4 a 5 GPa) generaba un alza promedio del 20 % en el retorno de conversión. Si bien este retorno no equivale directamente al precio de mercado, es razonable suponer que una mejora en la calidad estructural de las trozas conlleva un incremento proporcional en el valor de mercado.

Al aplicar este supuesto, se observó (Figura 3.3) que el tipo de manejo seleccionado como óptimo en los sitios IS 25 y 27 no se ve alterado, lo que sugiere que, incluso considerando un escenario de valorización diferenciada para trozas de mejor calidad, los esquemas con mayor VPS continúan siendo los más rentables. Esto respalda la elección de estrategias silvícolas que prioricen no solo el volumen, sino también las propiedades mecánicas de la madera.

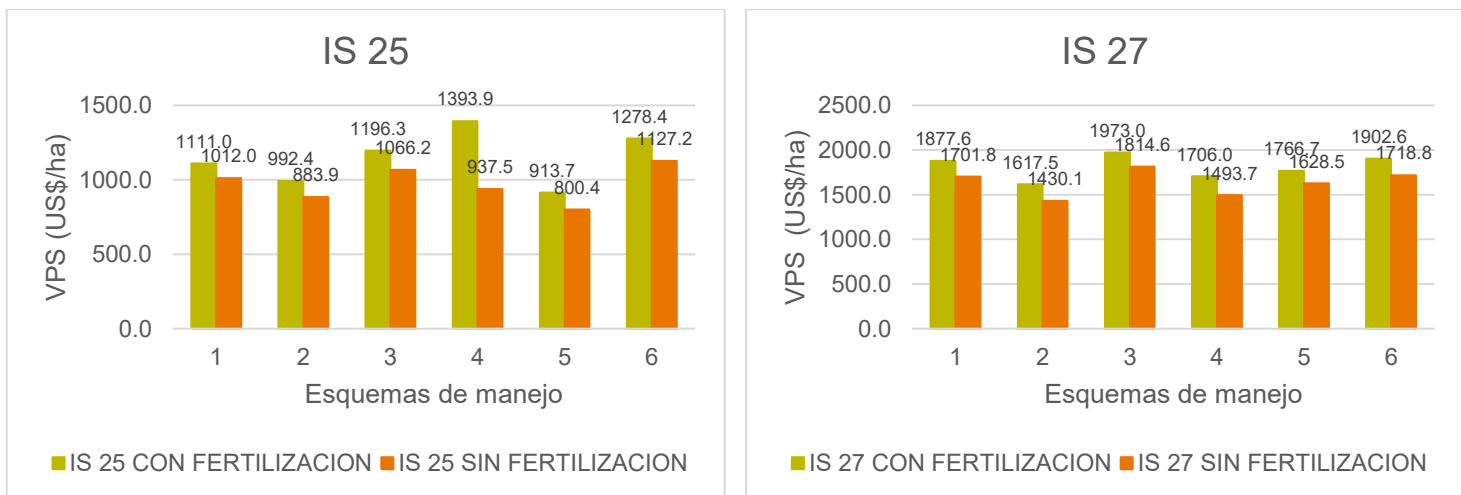


Figura 3.3. Gráfico de comparación del VPS entre los manejos con y sin fertilización en ambos índices de sitio con el aumento del 20% de valor de la primera troza.

3.3 Análisis comparativo del rendimiento volumétrico derivado de alternativas silvícolas de plantaciones de *P.radiata* orientadas a la producción de madera estructural.

A continuación, se presentan y discuten los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas con el modelo nacional de simulación (MNS) para los seis esquemas de manejo silvícola de *P.radiata*, con y sin fertilización, en los índices de sitio IS 25 e IS 27.

El análisis se centra en los volúmenes de trozas aserrables generados en cada escenario, con especial énfasis en los tres primeros productos (Aserrable 1, 2 y 3), los cuales fueron considerados como madera estructural debido a que concentran las características dimensionales y mecánicas más favorables para la clasificación en usos estructurales., según lo reportado por Gavilan et al. (2023) y Schimleck et al (2019).

Es importante destacar que los volúmenes fueron evaluados en la edad de rotación óptima definida para cada esquema, determinada por el máximo VPS. De esta forma, los resultados permiten compara no solo la cantidad de madera estructural producida bajo distintos tratamientos, sino también su coherencia con la rentabilidad.

Este enfoque garantiza que el volumen considerado corresponde al escenario económicamente más eficiente en cada caso, permitiendo discutir las implicancias de la producción de madera estructural en función tanto del rendimiento técnico como del retorno económico.

3.2.1 Esquemas de manejo en índices de sitio 25m

Según los resultados presentados en la Tabla 3.3, el esquema 6, caracterizado por una densidad inicial más baja (800 arb/ha) junto con una poda y fertilización, alcanzó el mayor volumen de trozas aserrables estructurales en sitios IS 25, con 66,8 m³/ha. Este volumen representa un incremento significativo respecto al resto de los esquemas evaluados. Sin embargo, este resultado contrasta con el esquema que obtuvo el mayor VPS, cuyo volumen estructural fue un 61 % inferior, lo que evidencia una disociación entre el rendimiento económico y el volumen de madera estructural producido.

Esta diferencia pone de manifiesto la tensión entre los objetivos económicos y técnicos del manejo forestal, mientras algunos esquemas maximizan la rentabilidad financiera, otros priorizan la producción de madera con características óptimas para usos estructurales.

El mayor rendimiento volumétrico del esquema 6 puede atribuirse a la combinación de una densidad inicial moderada y la fertilización, que permite que los árboles seleccionados para permanecer en el rodal concentren su crecimiento diametral. Esto favorece la formación de fustes más rectos y con diámetros adecuados para el aserrío estructural. Estudios como los de Rubilar et al. (2008) y Gavilán et al. (2023) respaldan esta interpretación, al señalar que el manejo

nutricional y la reducción de competencia intraespecífica promueven el desarrollo de madera de mayor valor comercial, aunque no siempre se traduzca en un mejor indicador económico.

Este análisis permite concluir que, en sitios de productividad moderada como IS 25, existen esquemas de manejo que, si bien no maximizan el VPS, sí optimizan la producción de madera estructural, lo cual puede ser relevante en contextos donde la demanda por productos de alta calidad técnica sea prioritaria.

Tabla 3.3. Diferencia de volumen aserrable estructural con volumen aserrable total de cada esquema de manejo con y sin fertilización en un IS 25.

Aserrable IS 25				
Esquema	Con fertilización	Total	Sin fertilización	Total
1	49.3	233.2	34.0	212.8
2	14.6	185.7	19.1	200.3
3	51.7	243.1	35.7	218.6
4	35.2	238.1	20.2	205.9
5	28.3	176.5	13.2	155.6
6	66.8	243.4	36.4	220.3

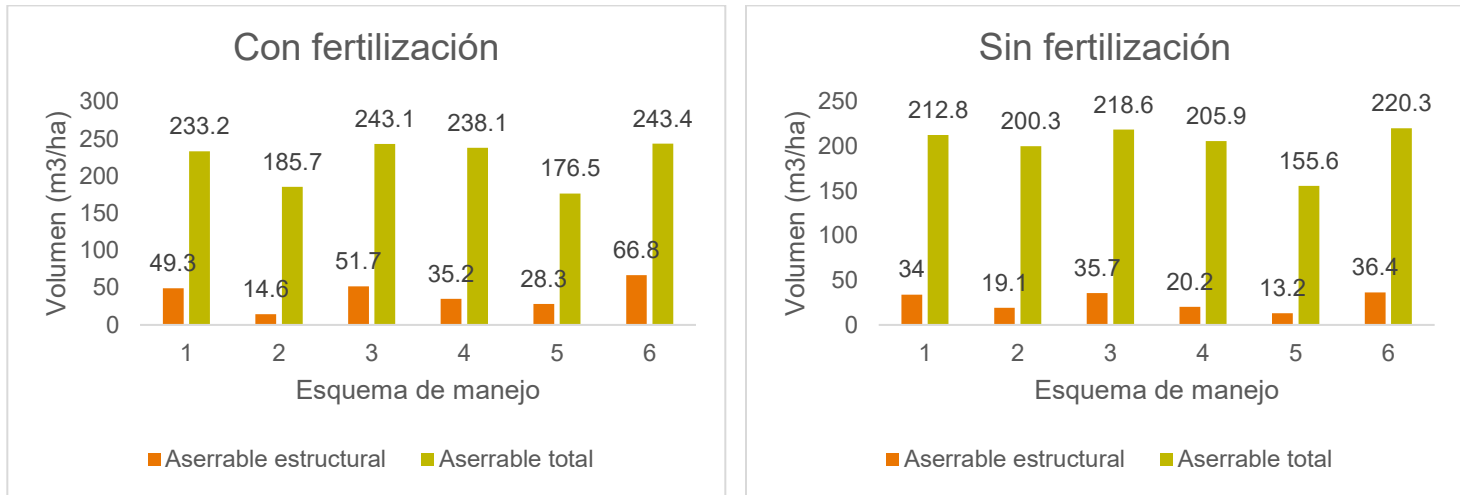


Figura 3.4. Volumen total de producto aserrable estructural en comparación al volumen total aserrable para cada manejo en sitios IS 25.

3.2.2 Esquemas de manejo en índices de sitio 27m

En los sitios IS 27, el esquema 6 con fertilización fue el que alcanzó el mayor volumen de trozas aserrables estructurales, con 72,1 m³/ha, lo que representa un incremento del 14,9 % respecto a su equivalente sin fertilización. Este esquema, con una densidad inicial de 800 árboles/ha y poda a los 6 años, se destacó por maximizar la producción de trozas aptas para usos estructurales, consolidándose como la alternativa más eficiente desde una perspectiva netamente volumétrica.

No obstante, al considerar el Valor Presente Neto (VPS), el esquema más eficiente fue el esquema 3, con una densidad inicial de 1000 árboles/ha y fertilización, que alcanzó un volumen estructural de 68,0 m³/ha, apenas inferior al del esquema 6, pero con un retorno económico significativamente superior.

Esta diferencia evidencia que, en sitios de alta productividad, los esquemas con densidades intermedias logran un equilibrio más favorable entre volumen estructural y rentabilidad, mientras que densidades más bajas pueden maximizar la producción estructural sin necesariamente traducirse en el mayor valor económico.

Estos resultados respaldan lo señalado por Rubilar et al. (2008), quienes destacan que prácticas combinadas como la fertilización y el control de competencia mejoran significativamente el crecimiento en diámetro y la calidad de las trozas. Asimismo, coinciden con lo planteado por Meneses y Guzmán (2000), en cuanto a que los esquemas que generan más trozas estructurales no siempre corresponden a los más rentables, lo que refuerza la necesidad de diseñar esquemas silvícolas que balanceen adecuadamente la cantidad, calidad y rentabilidad de la madera producida.

Este análisis permite concluir que, en sitios de alta productividad como IS 27, el diseño silvícola debe considerar no solo el volumen estructural generado, sino también su coherencia con los objetivos económicos del proyecto forestal, especialmente cuando se busca optimizar el uso de recursos y maximizar el retorno financiero sin comprometer la calidad del producto final.

Tabla 3.4. Diferencia de volumen aserrable estructural con volumen aserrable total de cada esquema de manejo con y sin fertilización en un IS 27.

Aserrable IS 27				
Esquema	Con fertilización	Total	Sin fertilización	Total
1	54.8	263.6	51.1	261.4
2	36.7	240.0	33.5	232.0
3	68.0	267.1	50.6	248.4
4	40.3	248.9	35.2	238.1
5	69.1	250.5	50.6	251.5
6	72.1	262.9	62.2	253.3

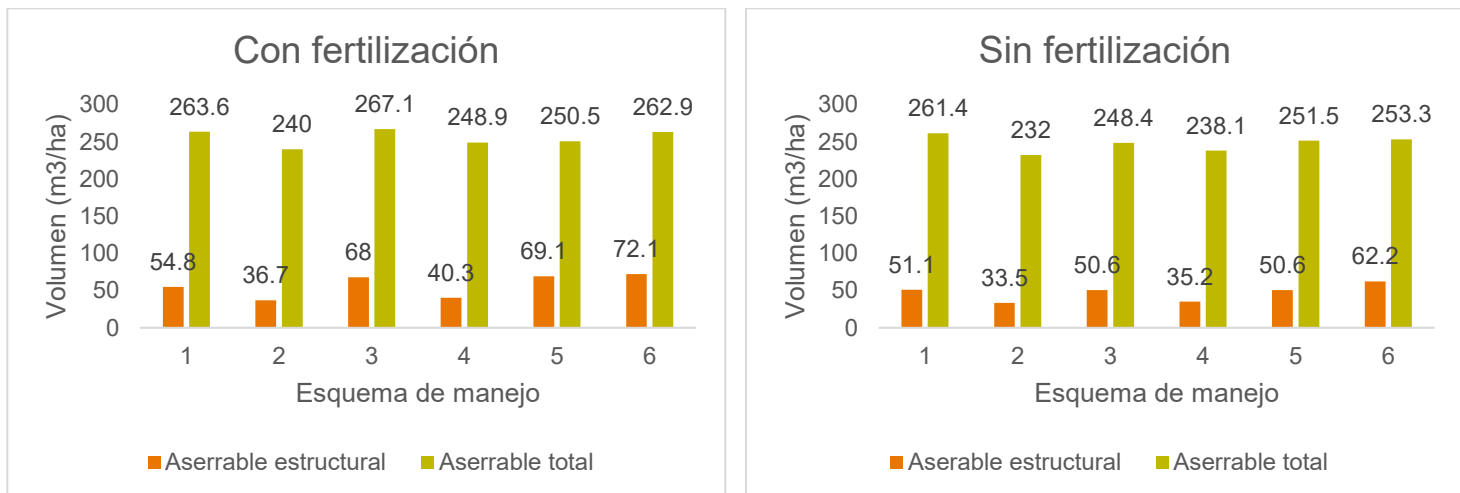


Figura 3.5. Volumen total de productos aserrable estructural en comparación al volumen total aserrable para cada manejo, en sitios IS 27.

La fertilización tuvo un efecto positivo sobre el volumen aserrable en ambos índices de sitio, con incrementos significativos en la cantidad de trozas potencialmente aptas para uso estructural. En estos contextos, la fertilización actúa como un impulso que potencia el crecimiento ya determinado por las condiciones edafoclimáticas, mejorando tanto el volumen total como la proporción de madera estructural.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Rubilar et al. (2008), quien señala que la respuesta a la fertilización depende en gran medida de la calidad del sitio, siendo más eficiente y económicamente viable en sitios de alta productividad. En sitios de menor calidad, factores como la baja profundidad efectiva del suelo, el déficit hídrico o restricciones nutricionales múltiples pueden limitar la efectividad del manejo nutricional.

La calidad de la madera estructural no depende únicamente del volumen producido, sino también de propiedades internas clave como la densidad, el tamaño y distribución de los nudos, y el módulo de elasticidad (MOE). Dado que este estudio se basó en simulaciones, fue necesario estimar la cantidad de madera estructural de forma indirecta. Para ello, se consideraron como estructurales los productos Aserrable 1, 2 y 3 del volumen total, criterio respaldado por Gavilán et al. (2023), quienes reportan proporciones similares en plantaciones manejadas intensivamente.

Este enfoque permite vincular la estimación virtual con la evidencia empírica, ya que los productos aserrables tienen mayor probabilidad de cumplir con los requisitos mecánicos exigidos por normas estructurales (como la clasificación C24 o superior). Meneses y Guzmán (2000) destacan que, aunque las podas favorecen la obtención de madera libre de nudos para productos de apariencia,

la madera estructural se caracteriza por su resistencia mecánica, por lo que las prácticas silvícolas deben buscar un equilibrio entre cantidad y propiedades físico-mecánicas.

Aunque la simulación no permite medir directamente parámetros como el MOE o la densidad, estudios como los de Schimleck et al. (2019) y Gavilán et al. (2023) demuestran que es posible predecir el potencial estructural de la madera en pie mediante métodos no destructivos, como la velocidad acústica y la densidad del fuste. Estos hallazgos respaldan que el volumen estimado en este estudio representa razonablemente la porción del fuste con mayor probabilidad de cumplir estándares estructurales.

Finalmente, la creciente demanda por productos renovables y de alto desempeño para la construcción, mencionada por Harte (2017), refuerza la necesidad de orientar las plantaciones y sus manejos silvícolas no solo hacia la maximización del volumen total, sino hacia la producción específica de madera estructural, especialmente en sitios con menor potencial para productos de apariencia.

CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación evidencian que la elección del esquema silvícola óptimo en plantaciones de *P.radiata* orientadas a la producción de madera estructural no puede basarse exclusivamente en criterios económicos o volumétricos. Es necesario considerar un equilibrio entre rentabilidad, volumen estructural y calidad potencial de la madera.

En sitios de baja productividad (IS 25), el esquema 6 (densidad inicial de 800 arb/ha sin raleo y con fertilización) logró el mayor volumen de trozas estructurales (66,8 m³/ha), superando en un 61 % al esquema más rentable (esquema 4). En sitios de mayor productividad (IS 27), se observó un comportamiento similar: el esquema 6 alcanzó el volumen estructural más alto (72,1 m³/ha), mientras que el esquema 3, con 68,0 m³/ha, resultó ser el más rentable. Esto sugiere que manejos con densidades intermedias pueden lograr una mejor relación entre volumen y rentabilidad.

Estos hallazgos permiten cuestionar la afirmación tradicional de que una mayor densidad de plantación conlleva automáticamente una mejora en la calidad estructural de la madera. La relación entre densidad y calidad es compleja y depende de múltiples factores, como la especie, el tipo de crecimiento, las

condiciones de sitio y el manejo aplicado. Algunos estudios (Pryor, 1967; Erickson & Harrison, 1974; De Lima et al., 2009, citados en Barth, 2020) sostienen que mayores espaciamientos pueden generar madera de menor densidad, lo cual afectaría negativamente su calidad estructural. Sin embargo, otros trabajos (Balcorta & Vargas, 2004, citados en Euftrade-Junior et al., 2017) resaltan que la densidad básica de la madera no está necesariamente relacionada con la densidad de árboles por hectárea, sino con factores como la proporción de madera tardía y el manejo aplicado.

En ese sentido, el manejo silvícola puede tener un rol determinante. Prácticas como el raleo o la fertilización temprana, al reducir la competencia y estimular el crecimiento diametral de los árboles seleccionados, pueden aumentar la proporción de anillos estrechos y homogéneos, mejorando así la estabilidad dimensional y la resistencia mecánica de la madera. Esta afirmación se encuentra respaldada por investigaciones como las de Xue (2024), quien demostró que el manejo específico del sitio y la fertilización pueden mejorar significativamente el módulo de elasticidad (MOE) de la madera. Asimismo, Jozsa y Middleton (1997) señalan que las variaciones intra-anillo afectan directamente la estabilidad dimensional, siendo la homogeneidad una característica deseable en maderas destinadas a usos estructurales.

Por lo tanto, se concluye que la planificación silvícola en sitios de baja y media productividad debe apuntar a un balance estratégico entre volumen, calidad estructural y retorno económico, reconociendo que estos objetivos no siempre convergen. La aplicación de herramientas de simulación, como el Modelo Nacional de Simulación (MNS), permite anticipar estos resultados y optimizar las decisiones técnicas en función del producto final deseado.

Finalmente, este estudio permite revalorizar sitios considerados tradicionalmente como “marginales” para la producción forestal, demostrando que, mediante esquemas de manejo adecuados, pueden ser competitivos para la generación de madera estructural. Esto representa una oportunidad tanto técnica como económica para el sector forestal chileno, especialmente en el contexto actual de transición hacia sistemas constructivos más sostenibles.

La creciente tendencia global hacia la sustitución de materiales intensivos en carbono, como el hormigón y el acero, por madera estructural en edificaciones, refuerza la necesidad de orientar las plantaciones forestales hacia la producción de madera de alto desempeño. En este escenario, *P.radiata* manejado adecuadamente puede convertirse en un recurso estratégico para la construcción sustentable, contribuyendo a la descarbonización del sector y al desarrollo de una economía forestal más resiliente y diversificada.

BIBLIOGRAFÍA

- Acoforag. (2023). Pino radiata, el príncipe de los pinos, un árbol que podría llevar a Chile a ser carbono neutral. Recuperado de <https://www.acoforag.cl/es/noticias/2023/10/12/pino-radiata-el-principe-de-los-pinos-un-arbol-que-podria-llevar-a-chile-a-ser-carbono-neutral/>
- Altamirano, J. (2017). Rango distribución del castor en Tierra del Fuego. *Ecology*, 20 (2), 23–31.
- Apiolaza, L. A. (2009). Very early selection for solid wood quality: Screening for early winners. *Annals of Forest Science*, 66 (601). <https://doi.org/10.1051/forest/2009047>
- Barth, S. R. (2020). Densidad de plantación y calidad de madera de *Grevillea robusta*. INTA Montecarlo. <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/7594>
- Burdon, R. D., & Moore, J. R. (2018). Adverse genetic correlations and impacts of silviculture involving wood properties: Analysis of issues for Radiata pine. Scion (New Zealand Forest Research Institute Ltd.). Recuperado de <https://www.academia.edu/50552638>
- Campo Galego. (2022). ¿Cómo el pino radiata de Chile se ha convertido en una referencia mundial?. Recuperado de <https://www.campogalego.es/como-el-pino-radiata-de-chile-se-ha-convertido-en-una-referencia-mundial/>
- Carson, S. D., Cown, D. J., McKinley, R. B., & Moore, J. R. (2014). Effects of site, silviculture and seedlot on wood density and estimated wood stiffness in radiata pine at mid-rotation. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 44 (26), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s40490-014-0026-3>
- CIM UC, & CORMA. (2023). Análisis de costos de construcción en madera. Madera21. <https://www.madera21.cl/analizan-la-realidad-de-los-costos-de-la-construccion-en-madera-en-chile/>
- CORMA. (2023). Memoria anual 2022–2023. Recuperado de <https://www.corma.cl/Memoria-2023-web.pdf>

- CORMA, & Pontificia Universidad Católica de Chile. (2023). La construcción de viviendas en madera. Centro de Transferencia Tecnológica de la Madera. <https://madera.uc.cl/images/recursos/manual-la-construccion-de-viviendas-en-madera-corma.pdf>
- Donoso, P., & Oyarzún, C. (2018). The forest sector in Chile: An overview and current challenges. *Journal of Forestry*, 114 (5), 562–575.
- Eufrade-Junior, H. J., Ballarin, A. W., Villamagua-Vergara, G. C., & Guerra, S. P. S. (2017). Efecto del manejo silvícola sobre la densidad básica de la madera en sistemas forestales de rotación corta. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 19 (3), 285–292. <https://www.redalyc.org/pdf/485/48552028004.pdf>
- Ferrere, P., Lupi, A. M., & Boca, T. (2015). Crecimiento del *Pinus radiata* sometido a diferentes tratamientos de raleo y poda en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Bosque (Valdivia)*, 36 (3), 245–256. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002015000300009>
- Gavilán, E., Alzamora, R. M., Apiolaza, L. A., Sáez, K., Elissetche, J. P., & Pinto, A. (2023). Modelling the influence of radiata pine log variables on structural lumber production. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 25 (2), 1–10. <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2023000100402>
- González, J. E., Salazar-Álvarez, É. G., Yáñez Orozco, D., Casco Guerrero, E. C., Zambrano Vera, D., Morillo Robles, C. E., & Enríquez Ujukam, T. J. (2024). Modelación y simulación computacional de una trituradora de biomasa forestal en Ecuador. *Tecnológicas*, 27 (61), e3244. <https://doi.org/10.22430/22565337.3244>
- Harte, A. M. (2017). Mass timber – The emergence of a modern construction material. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 2 (3), 121–132. <https://doi.org/10.1080/24705314.2017.1354156>
- Hermoso, E., Fernández-Golfín, J., Conde, M., Troya, M. T., Mateo, R., & Cabrero, J. (2015). Caracterización de la madera aserrada de *Pinus radiata* modificada térmicamente. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 17 (3), 245–256. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2015000300004>
- Instituto Forestal (Chile). (2023). El sector forestal chileno 2023. Recuperado de <https://wef.infor.cl>

- Instituto Forestal (Chile). (2024). El sector forestal chileno 2024. Recuperado de <https://wef.infor.cl>
- Instituto Nacional de Normalización (INN). (2006). Norma Chilena NCh 1198 Of.2006: Madera - Clasificación visual para uso estructural. Recuperado de <https://www.inn.cl/normas/>
- Instituto Nacional de Normalización (INN). (2006). Norma Chilena NCh 1207 Of.2006: Madera - Métodos de ensayo para determinar las propiedades mecánicas. Recuperado de <https://www.inn.cl/normas/>
- Jozsa, L. A., & Middleton, G. R. (1997). Mechanical properties of structural wood. Forintek Canada Corp. https://infomadera.net/uploads/productos/informacion_general_40_mecanicaEstructural.pdf
- Lima, L. J. (2018). La madera como material estructural. Universidad Nacional del Noroeste de Buenos Aires. https://lemej.unnoba.edu.ar/wp-content/uploads/publicaciones/Luis_Lima-La_madera_como_material_estructural.pdf
- Madera21. (2023). Madera estructural. Recuperado de <https://www.madera21.cl/madera-estructural/>
- Maderea. (2023). Usos industriales y en construcción de la madera de pino radiata. Recuperado de <https://www.maderea.es/usos-industriales-madera-de-pino-radiata/>
- Mason, E. G. (2023). Impacts of tending on attributes of Radiata pine trees and stands in New Zealand – A review. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 53 (9), 1–23. <https://doi.org/10.33494/nzjfs532023x178x>
- Meneses, M., & Guzmán, S. (2000). Análisis de la eficiencia de la silvicultura destinada a la obtención de madera libre de nudos en plantaciones de pino radiata en Chile. *Bosque (Valdivia)*, 21 (2), 85–93. <https://doi.org/10.4067/S0717-9200200000200007>
- MNS Simulación. (2023). Modelos – MNS Simulación. <https://mnssimulacion.cl/modelos/>
- Rachid Casnati, C. (2024). Nuevas metodologías de simulación de crecimiento forestal. *Revista INIA*, 45, 36–39.

<https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/5782/1/Revista-INIA-45-36-39.pdf>

- Rubilar, R., Blevins, L., Toro, J., Vita, A., & Muñoz, F. (2008). Respuesta temprana de *Pinus radiata* al control de malezas y la fertilización en suelos metamórficos de la Cordillera de la Costa de la Región del Maule. *Bosque* (Valdivia), 29 (1), 74–84. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002008000100009>
- Schimleck, L. R., Dahlen, J., Apiolaza, L. A., Downes, G., & Emms, G. (2019). Non-destructive evaluation techniques and what they tell us about wood property variation. *Forests*, 10 (9), 728. <https://doi.org/10.3390/f10090728>
- Wilson, R. V., & Watt, A. J. (1976). An economic comparison of alternative silvicultural treatments in *Pinus radiata*. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 6 (2), 318–331. https://www.scionresearch.com/__data/assets/pdf_file/0008/58904/NZJFS621976WILSON318-331.pdf
- Xue, J. (2024). Matching genotypes to site resources and silvicultural inputs for optimising radiata pine health, growth and wood quality. Scion. <https://fgr.nz/wp-content/uploads/2024/06/RSPTN-033.pdf>
- Yallop, K. (2021). Effect of silvicultural regimes on carbon sequestration in *Pinus radiata* forest in Canterbury. University of Canterbury. <https://ir.canterbury.ac.nz/bitstreams/e4eb9860-a913-466a-a6d6-b595ca1c625c/download>