



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
INGENIERIA EN CONSERVACIÓN DE RECURSOS NATURALES

**Modelamiento del crecimiento de bosques nativos de *Nothofagus obliqua*
en un gradiente de sitios de la región del Biobío usando el modelo de
crecimiento 3-PG**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de
Concepción para otorgar al título profesional Ingeniero en Conservación de
Recursos Naturales

Por: Diego Alfonso Sánchez Campos

Profesor Guía: Rafael Alejandro Rubilar Pons

Marzo 2025
Concepción, Chile

© 2025, Diego Alfonso Sánchez Campos

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

**Modelamiento del crecimiento de bosques nativos de *Nothofagus obliqua*
en un gradiente de sitios de la región del Biobío usando el modelo de
crecimiento 3-PG**

Profesor Guía



Rafael Alejandro Rubilar Pons

Profesor Titular

Ingeniero Forestal, Dr.

Profesor Guía



Daniel Ignacio Bozo Ramírez

Colaborador Externo

Ingeniero Forestal, MSc.

DEDICATORIA

A mis padres, pilares inquebrantables de mi vida, quienes con su amor, sacrificio y sabiduría me enseñaron que no hay sueño demasiado grande si se trabaja con perseverancia y humildad. Esta tesis es, en gran medida, el reflejo de los valores que me inculcaron y del apoyo incondicional que siempre me brindaron.

A Agustina, mi compañera, mi inspiración y mi refugio. Contigo he aprendido que el amor no solo se siente, sino que también se construye día a día. Gracias por estar a mi lado en los momentos de alegría y en los de incertidumbre, por creer en mí incluso cuando yo dudaba, y por ser mi luz en los días más oscuros. Esta tesis es también tuya, porque sin tu amor y tu paciencia, este logro no habría sido posible.

A mis mejores amigos, esos seres que eligió la vida para acompañarme en este viaje. Gracias por las risas, los consejos y por estar ahí en cada paso, celebrando mis triunfos y levantándome en las caídas. Ustedes son mi familia fuera de casa. A mis compañeros de carrera, con quienes compartí noches de estudio, momentos de estrés y también de celebración. Juntos hemos crecido, aprendido y superado desafíos que parecían imposibles.

A mis profesores de la educación media y universitaria, quienes sembraron en mí la semilla del conocimiento y me guiaron con paciencia y dedicación. Su ejemplo ha sido fundamental en mi formación, no solo académica, sino también humana. Y, finalmente, a todas aquellas personas que, de una forma u otra, han contribuido a que hoy esté aquí.

AGRADECIMIENTOS

Este logro no habría sido posible sin el apoyo de muchas personas que han estado a mi lado durante esta etapa universitaria. Agradezco profundamente a todos aquellos que han sido parte de este proceso.

Primero, a mi familia, especialmente a mis padres. Gracias por su amor, apoyo incondicional y por enseñarme que el verdadero éxito se mide por la integridad y el esfuerzo. A Agustina, mi compañera y motivación, por ser mi refugio en los momentos de incertidumbre y por compartir cada paso de este camino. A mis amigos, quienes han sido mi segunda familia, brindándome risas, apoyo y fortaleza. Este logro también es suyo.

A mis compañeros de carrera, por hacer de esta etapa un proceso más llevadero con su apoyo y compañerismo. A mis profesores, por su dedicación, paciencia y por creer en mi potencial. Cada uno de ustedes ha sido esencial en mi crecimiento académico y personal.

Finalmente, quiero agradecer a todas las personas que, con su aliento, consejos o compañía, contribuyeron a que hoy esté aquí. Este logro refleja el esfuerzo colectivo de todos ustedes.

También quiero resaltar el trabajo realizado en el proyecto *Firing “Multiscale effects of extreme forest fires on erosion, water, and biogeochemical cycles in natural and managed forest soils”* ACT ACT210060. A través de este proyecto se lograron calibraciones de productividad que fueron cruciales para mi formación y el desarrollo de mi tesis.

Gracias, de todo corazón, a todos los que hicieron posible este camino. Este logro es también suyo.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	IX
ABSTRACT.....	X
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. METODOLOGÍA.....	3
III. RESULTADOS	24
IV. DISCUSIÓN	38
V. CONCLUSIONES	42
VI. GLOSARIO.....	44
VII. BIBLIOGRAFÍA	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Clases texturales predominantes y secundarias en los tres sitios (Florida, Mulchén y Nacimiento), junto con su superficie en hectáreas, el rango de rango de fertilidad asociado y sus implicancias en la configuración del modelo.	9
Tabla 2.2: Clases texturales de suelo identificadas en los sitios (según el sistema CLSoils) con las correspondientes clases de suelo aceptadas por el modelo 3-PG	10
Tabla 2.3: Promedios ponderados de fertilidad por sitio, considerando las clases texturales predominantes y sus respectivas superficies. Combina los rangos de fertilidad de las clases 1 y 2 para representar un valor único promedio de fertilidad por sitio.	11
Tabla 2.4: Parámetros del modelo 3PG aplicados a <i>Nothofagus obliqua</i> , organizados por categorías como partición de biomasa, modificadores de NPP, estructura del dosel y propiedades del rodal. Los valores con "D" son por defecto del modelo original, mientras que los acompañados de citas provienen de estudios específicos.	19-23
Tabla 3.1: Comparación de Variables Climáticas Promedio por Sitio.	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Ubicación geográfica de las áreas de estudio.	5
Figura 2.2: Evolución del volumen del rodal en tres localidades: Florida, Mulchén y Nacimiento.	6
Figura 3.1: Evolución del volumen del rodal en tres localidades.....	25
Figura 3.2: Crecimiento del DAP por Sitio y Edad del Rodal.....	27
Figura 3.3: Relación entre el número de árboles ($N\ ha^{-1}$) y la edad del rodal (años) en los sitios de Florida, Mulchén y Nacimiento.	29
Figura 3.4: MAI por Sitio y Edad del Rodal.	30
Figura 3.5: Evolución del LAI por Sitio y Edad del Rodal.....	31

RESUMEN

El presente estudio analizó el crecimiento de bosques nativos de *Nothofagus obliqua* (Mirbel) Oersted var. OBLIQUA en la región centro-sur de Chile, utilizando el modelo de crecimiento 3PG para evaluar su aplicabilidad en la predicción de dinámicas de desarrollo forestal en distintos ambientes. El propósito fue comprender cómo factores climáticos, edáficos y ecológicos influyen en el crecimiento de *Nothofagus obliqua* en diferentes contextos ambientales. Los métodos incluyeron la recopilación de datos sobre fertilidad del suelo, temperaturas, precipitaciones y características estructurales del dosel forestal, los cuales fueron integrados en el modelo 3PG para simular patrones de crecimiento en tres sitios con condiciones contrastantes. Los resultados mostraron que los sitios con mayor precipitación y suelos de mejor calidad presentaron un crecimiento más acelerado en términos de altura y diámetro, mientras que los sitios con condiciones más adversas exhibieron un desarrollo más lento, evidenciando limitaciones por estrés hídrico y bajas temperaturas. Además, se identificaron diferencias significativas en la productividad neta primaria y la acumulación de biomasa entre los sitios estudiados, determinadas por la interacción entre factores climáticos y edáficos. En conclusión, se subraya la importancia de considerar la variabilidad local al desarrollar estrategias de manejo forestal y se resalta el valor del modelo 3PG como herramienta para planificar la gestión sostenible de bosques nativos. Este enfoque proporciona una base científica sólida para orientar políticas de conservación y optimizar la toma de decisiones en escenarios de perturbaciones ambientales extremas.

ABSTRACT

This study analyzed the growth of native *Nothofagus obliqua* forests in south-central Chile using the 3PG growth model to evaluate its applicability in predicting forest development dynamics across different environments. The objective was to understand how climatic, edaphic, and ecological factors influence the growth of *Nothofagus obliqua* under varying environmental conditions. The methodology included data collection on soil fertility, temperature, precipitation, and structural characteristics of the forest canopy, which were integrated into the 3PG model to simulate growth patterns in three sites with contrasting conditions. The results showed that sites with higher precipitation and better-quality soils exhibited faster growth in terms of height and diameter, while sites with more adverse conditions experienced slower development, revealing limitations due to water stress and low temperatures. Additionally, significant differences in net primary productivity and biomass accumulation were identified among the studied sites, determined by the interaction between climatic and edaphic factors. In conclusion, this study highlights the importance of considering local variability when developing forest management strategies and underscores the value of the 3PG model as a tool for planning the sustainable management of native forests. This approach provides a solid scientific basis for guiding conservation policies and optimizing decision-making in scenarios of extreme environmental disturbances.

I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de los bosques nativos es un proceso complejo influenciado por múltiples factores ambientales y ecológicos. En Chile, los ecosistemas forestales templados han experimentado importantes cambios debido al impacto de perturbaciones como los incendios forestales y las variaciones climáticas (De la Barrera et al., 2018). En particular, la región centro-sur ha sido afectada por eventos extremos que han alterado la dinámica de crecimiento de especies clave, como *Nothofagus obliqua* (Corporación Nacional Forestal [CONAF], 2024).

Nothofagus obliqua es una especie fundamental en los bosques templados de Chile debido a su rol en la estructura y funcionalidad del ecosistema (Hoffmann, 1997). Sin embargo, su crecimiento está condicionado por factores como la disponibilidad de agua, las características edáficas y las variaciones climáticas, lo que hace necesario analizar su desarrollo en distintos contextos ambientales (Castro et al., 2024).

El modelo 3PG (*Physiological Principles in Predicting Growth*) es una herramienta que permite simular el crecimiento de los bosques nativos bajo diferentes escenarios ambientales. Basado en procesos fisiológicos simplificados, este

modelo integra variables climáticas, edáficas y características específicas de las especies para predecir patrones de crecimiento y productividad forestal (Landsberg & Waring, 1997). Su aplicación en bosques nativos ofrece una oportunidad para comprender mejor la dinámica de crecimiento de *Nothofagus obliqua* en distintos tipos de sitios y optimizar estrategias de manejo forestal sostenible (Lin et al., 2024).

Objetivo General

Evaluar el crecimiento de bosques nativos de *Nothofagus obliqua* en un gradiente de condiciones de suelo-sitio utilizando el modelo 3PG.

Objetivos Específicos

- Analizar el crecimiento de *Nothofagus obliqua* en diferentes condiciones de suelo y clima mediante la aplicación del modelo 3PG.
- Comparar las proyecciones del modelo 3PG en sitios con distintos niveles de fertilidad y disponibilidad hídrica.
- Evaluar la influencia de factores climáticos y edáficos en la variabilidad del crecimiento de *Nothofagus obliqua* a partir de datos bibliográficos.

II. METODOLOGÍA

2.1. Descripción del área de estudio

El área de estudio comprende un gradiente de fertilidad que consideró tres sitios con bosques de *Nothofagus obliqua* (Roble) localizados en la región centro-sur de Chile. Los sitios fueron seleccionados además por haber sufrido el impacto de los megaincendios de los años 2017 y 2023, así como por sus características edáficas y climáticas contrastantes. Esta selección permite simular distintos escenarios posibles en el contexto del cambio climático y de posibles incendios forestales futuros. Los sitios analizados fueron seleccionados no solo por la magnitud de la superficie afectada por incendios forestales, sino también por su relevancia geográfica, impacto en ecosistemas nativos y diversidad en condiciones climáticas y edáficas, lo que los convierte en representativos de los desafíos de regeneración post-incendio en esta región (Ministerio de Agricultura [MINAGRI], 2019).

2.1.1. Sitio Florida

El sitio Florida está ubicado en la Región del Biobío, en las coordenadas 36°49' S, 72°40' O (Figura 2.3). Este sitio, caracterizado por su clima templado húmedo y suelos arcillosos con alta capacidad de retención de agua, fue severamente afectado por el incendio “San Antonio” durante la temporada 2016-2017. La temperatura media anual es de 13,8°C, con máximas medias de 27,4°C en

verano y mínimas medias de 2,8°C en invierno. La precipitación promedio anual es de 1200 mm, concentrada entre mayo y agosto (*National Aeronautics and Space Administration [NASA], 2024*). El rango altitudinal varía entre 150 y 400 m sobre el nivel del mar, favoreciendo la regeneración de vegetación nativa.

2.1.2. Sitio Mulchén

El sitio Mulchén se localiza en la Región del Biobío, con coordenadas 37°43' S, 72°14' O (Figura 2.3). Su clima es templado, con una temperatura media anual de 14,6°C, alcanzando máximas medias de 29,1°C en verano y mínimas medias de 3,1°C en invierno (NASA, 2024) Este sitio se caracteriza por suelos arenosos, con baja capacidad de retención de agua, lo que representa desafíos adicionales para la regeneración forestal post-incendio.

2.1.3. Sitio Nacimiento

Nacimiento está localizado en la Región del Biobío, dentro de las coordenadas 37°30' S, 72°40' O (Figura 2.3). Este sitio presenta un clima seco, con una temperatura media anual de 15°C. Las temperaturas máximas medias alcanzan 30°C en verano, mientras que las mínimas medias bajan hasta 4°C en invierno. La precipitación anual es de aproximadamente 850 mm, concentrada en otoño e invierno (NASA, 2024). Los suelos predominantes son orgánicos, con moderada capacidad de retención de agua, lo que influye en la regeneración de la vegetación tras incendios severos.

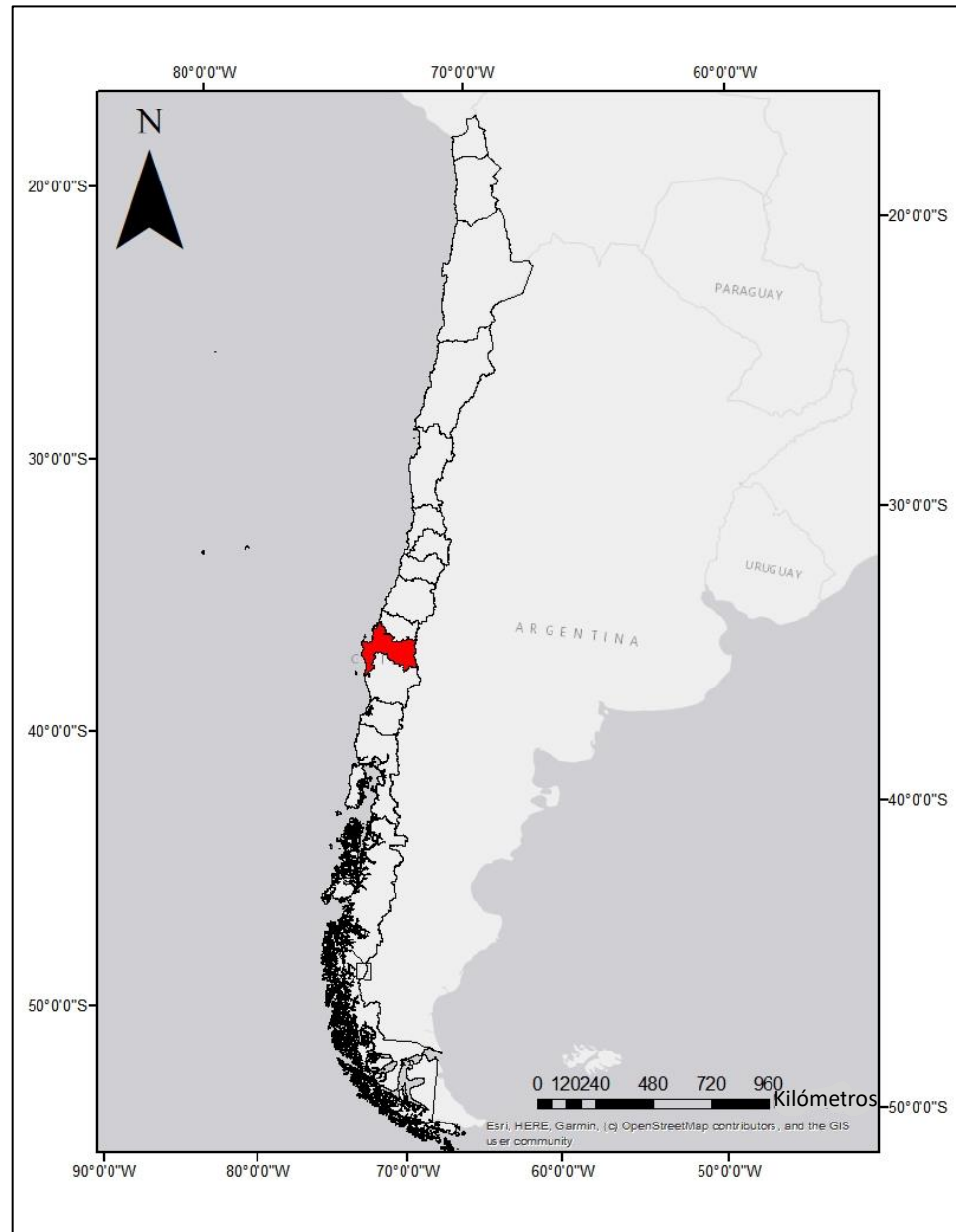


Figura 2.1. Ubicación geográfica de la región de Chile de la región de estudio.

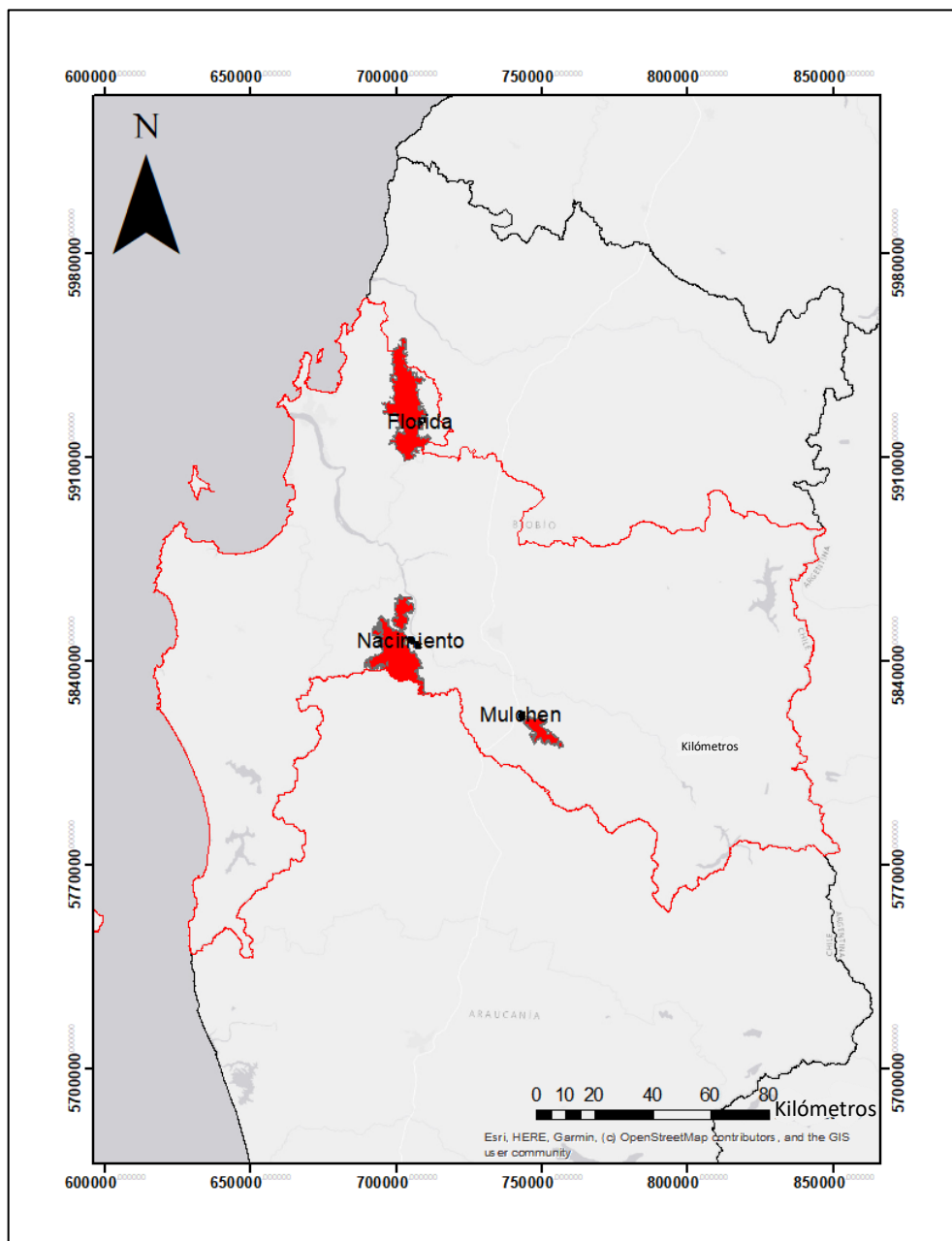


Figura 2.2. Ubicación geográfica de los sitios de estudio en la región del Biobío.

2.2. Origen de los datos

Para este estudio, se utilizó información recopilada de forma sistemática, integrando datos climáticos, edáficos y fisiomorfológicos de *Nothofagus obliqua*, esenciales para la configuración del modelo 3PG. La conexión entre los datos recolectados y los objetivos del estudio radica en cómo las condiciones climáticas y edáficas de cada sitio influyen directamente en los resultados esperados del modelo, permitiendo evaluar la regeneración bajo diferentes escenarios.

Los datos climáticos se obtuvieron específicamente para los centros de los incendios delimitados en los sitios de estudio, utilizando mapas vectoriales proporcionados por el portal IDE Minagri (MINAGRI, 2024). Las variables consideradas incluyeron la temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), radiación solar (MJ m^{-2}) y precipitación diaria (mm). Estos datos fueron extraídos de la plataforma “*POWER Data Access Viewer*” de la NASA, que proporciona información climática global de alta resolución espacial y temporal. Para garantizar la representatividad, se realizaron interpolaciones lineales para completar datos faltantes. Además, se verificó la consistencia mediante comparaciones con datos de estaciones meteorológicas cercanas.

Los datos edáficos se obtuvieron del proyecto CLSoilMaps (Dinamarca et al., 2023), una base de datos nacional que proporciona información detallada de las propiedades físicas e hidráulicas de los suelos en Chile. Las variables

seleccionadas incluyeron la clase textural del suelo (arena, limo y arcilla) y la capacidad de retención de agua (mm). Estas características se extrajeron específicamente para las coordenadas delimitadas en cada sitio y se organizaron en categorías adaptadas al modelo 3-PG. Este enfoque permitió modelar la interacción entre las propiedades del suelo y las condiciones climáticas para predecir patrones de crecimiento y regeneración.

Los datos utilizados en este estudio se presentan en las Tablas 2.1, 2.2 y 2.3, las cuales detallan las clases texturales de los suelos, sus implicancias en el modelo y los valores promedios ponderados de fertilidad.

Tabla 2.1. Clases texturales predominantes y secundarias en los tres sitios (Florida, Mulchén y Nacimiento), junto con su superficie en hectáreas, el rango de rango de fertilidad asociado y sus implicancias en la configuración del modelo.

Sitio	Clase Textural 1	Superficie (ha)	Clase Textural 2	Superficie (ha) Clase 2	Rango de Fertilidad (Clase 1)	Rango de Fertilidad (Clase 2)	Implicancias en el Modelo
Florida	ClLo (Clase 2)	26.478	SaClLo (Clase 7)	1.035	0,5-0,6	0,6-0,7	ASWi (150-200 mm), ASWmx (200-250 mm), ASWmn (50-75 mm)
Mulchén	ClLo (Clase 2)	3.962	Cl (Clase 1)	1.189	0,7-0,8	0,6-0,7	ASWi (200-250 mm), ASWmx (250-300 mm), ASWmn (50 mm)
Nacimiento	ClLo (Clase 2)	20.374	Lo (Clase 3)	4.977	0,7-0,8	0,6-0,7	ASWi (200-250 mm), ASWmx (250-300 mm), ASWmn (50 mm)

*ClLo: Franco arcilloso (*Clay Loam*), SaClLo: Franco arenoso arcilloso (*Sandy Clay Loam*), Cl: Arcilla (*Clay*), Lo: Franco (*Loam*), ASWi: agua inicial disponible en el suelo, ASWmx: máxima cantidad de agua en el suelo y ASWmn: mínima cantidad de agua en el suelo.

Tabla 2.2. Clases texturales de suelo identificadas en los sitios (según el sistema CLSoils) con las correspondientes clases de suelo aceptadas por el modelo 3-PG.

Sitio	Código de CLSoils	Código de clase de suelo en 3-PG
Florida	CIlo (Clase 2)	CL
Florida	SaCIlo (Clase 7)	SL
Mulchén	CIlo (Clase 2)	CL
Mulchén	CI (Clase 1)	L
Nacimiento	CIlo (Clase 2)	CL
Nacimiento	Lo (Clase 3)	L

*CL: *Clay loam*, SL: *Sandy loam* y L: *Clay*.

Tabla 2.3. Promedios ponderados de fertilidad por sitio, considerando las clases texturales predominantes y sus respectivas superficies. Combina los rangos de fertilidad de las clases 1 y 2 para representar un valor único promedio de fertilidad por sitio.

Sitio	Clase Textural 1	Superficie 1	Clase	Superficie 2	Promedio	Promedio	Promedio
		(ha)	Textural 2	(ha)	Fertilidad Min	Fertilidad Total	Fertilidad Max
Florida	CI Lo (Clase 2)	26.478	SaCI Lo (Clase 7)	1.035	0,5	0,6	0,6
Mulchén	CI Lo (Clase 2)	3.962	CI (Clase 1)	1.189	0,7	0,8	0,7
Nacimiento	CI Lo (Clase 2)	20.374	Lo (Clase 3)	4.977	0,7	0,8	0,7

2.3. Descripción del modelo 3-PG

El modelo 3-PG es un modelo de simulación del crecimiento forestal basado en principios fisiológicos. Fue desarrollado por Landsberg y Waring (1997) y se ha utilizado ampliamente para modelar el crecimiento de bosques naturales y plantaciones en diversas condiciones climáticas y edáficas. Su propósito es proporcionar estimaciones del crecimiento forestal a nivel de rodal, utilizando información sobre la fisiología de las especies, las condiciones del sitio y las influencias ambientales (Landsberg & Waring, 1997)

2.3.1. Principios y fundamentos del modelo

El 3-PG es un modelo de crecimiento semi-mecanístico, lo que significa que combina principios fisiológicos con simplificaciones empíricas para estimar la producción primaria neta (PPN) de un bosque y su asignación a distintos compartimentos biomásicos (raíces, fuste, ramas y hojas)(Sands, 2010). Su funcionamiento se basa en los siguientes principios:

2.3.2. Radiación fotosintéticamente activa y conversión en biomasa

- Se calcula la cantidad de radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés) interceptada por el dosel del bosque.
- Se estima la eficiencia del uso de la radiación (RUE, por sus siglas en inglés) para determinar la producción bruta de biomasa.

2.3.3. Limitaciones ambientales al crecimiento

- Se incorporan factores como la disponibilidad de agua en el suelo, la temperatura, la concentración de CO_2 y las deficiencias de nutrientes, los cuales afectan la eficiencia de uso de la radiación.

2.3.4. Distribución de la biomasa

- La biomasa producida se asigna a distintos compartimentos: hojas, fuste, ramas y raíces, en función de relaciones alométricas y factores ambientales.

2.3.5. Dinamismo del dosel

- Se simula la dinámica del índice de área foliar (LAI, por sus siglas en inglés), clave en la intercepción de radiación y la regulación del crecimiento.

2.3.6. Mortalidad y autorraleo

- Se incluyen procesos de competencia intraespecífica y mortalidad, que afectan la densidad y estructura del rodal a lo largo del tiempo.

2.3.7. Variables de entrada

Para simular el crecimiento de un bosque con 3-PG, se requiere una serie de datos de entrada que incluyen:

- Condiciones climáticas: temperatura, precipitación, humedad del suelo, radiación solar, déficit de presión de vapor.
- Propiedades del sitio: capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, fertilidad del suelo.
- Parámetros fisiológicos de la especie: eficiencia en el uso de la radiación, relaciones alométricas, tasas de transpiración y respiración.
- Condiciones iniciales del rodal: densidad de árboles, altura promedio, diámetro promedio, biomasa inicial.

2.3.8. Salida del modelo

El modelo genera estimaciones a nivel de rodal de variables clave como:

- Producción primaria neta (PPN, por sus siglas en inglés) y asignación de biomasa.
- Crecimiento en diámetro y altura de los árboles.
- Índice de área foliar (LAI, por sus siglas en inglés) y cobertura del dosel.
- Volumen de madera disponible para aprovechamiento.
- Densidad del rodal y mortalidad esperada.
- Uso del agua y eficiencia hídrica del bosque.

2.4. Aplicaciones del modelo 3-PG

Este modelo es ampliamente utilizado en:

2.4.1. Manejo y planificación forestal

- Predicción del crecimiento y rendimiento de plantaciones y bosques naturales.
- Evaluación del impacto de diferentes manejos silvícolas (raleos, fertilización, densidad inicial).

2.4.2. Estudios de cambio climático

- Evaluación del impacto del cambio climático en la productividad forestal.
- Simulación de la respuesta del crecimiento a cambios en CO_2 , temperatura y disponibilidad hídrica.

2.4.3. Restauración y ecología forestal

- Evaluación del crecimiento post-incendio en bosques nativos.
- Modelación del rol de distintas especies en la regeneración y sucesión ecológica.

2.4.4. Conservación de recursos hídricos y carbono

- Estimación de captura de carbono y balance hídrico de los bosques.

2.5. Relevancia del 3-PG en la regeneración de bosques

En el contexto de la regeneración y crecimiento de bosques nativos el modelo 3-PG permite evaluar la capacidad de especies como *Nothofagus obliqua* para restablecer la cobertura forestal y capturar carbono en el tiempo. Su capacidad para integrar variables climáticas, edáficas y fisiológicas lo convierte en una herramienta fundamental para predecir la recuperación de la biomasa y definir estrategias de restauración ecológica basadas en datos cuantitativos (Lin et al., 2024).

2.6. Descripción de la especie seleccionada

Nothofagus obliqua conocido comúnmente como roble pellín, hualle (en su etapa juvenil), coyán o roble, es un árbol caducifolio perteneciente a la familia de las Fagáceas. Puede alcanzar hasta 40 m de altura y 2 m de diámetro en el tronco. Su fuste es cilíndrico, recto, con corteza de color café oscuro, caracterizada por grietas profundas y placas redondeadas. Las hojas son caducas, alternas, de forma lanceolada a ovada, con borde aserrado y base oblicua. La cara superior de las hojas es de un verde más oscuro en comparación con el envés, el cual presenta un tono más pálido y nervadura marcada. Además, las hojas jóvenes están cubiertas de suaves pelitos (Hoffmann, 1997).

La distribución de *Nothofagus obliqua* se extiende desde el río Aconcagua hasta Llanquihue y Chiloé, en Chile. Hacia el norte de su área de distribución, su presencia se limita a algunos puntos de la cordillera de la Costa, principalmente en su variedad macrocarpa. Prefiere suelos fértiles, profundos y húmedos, creciendo generalmente en zonas bajas hasta los 600 m.s.n.m. En la parte norte de su rango, alcanza mayores altitudes, como en el Cerro Roble de Valparaíso, donde llega a los 1800 m.s.n.m. Forma bosques puros o mixtos, a menudo junto a otras especies nativas, contribuyendo significativamente a la estructura y funcionalidad de los ecosistemas forestales (Hoffmann, 1997).

El roble pellín es una especie clave en la regeneración de bosques nativos, especialmente en áreas afectadas por incendios forestales. Su capacidad de adaptación a diferentes condiciones edafoclimáticas lo convierte en un componente fundamental en los procesos de sucesión ecológica. En el contexto del modelamiento de crecimiento forestal post mega incendios, el uso del modelo 3PG para esta especie permite evaluar su contribución a la recuperación de ecosistemas afectados, proporcionando datos valiosos sobre su dinámica de crecimiento y su rol en la restauración de la biodiversidad nativa. Esto resulta esencial para desarrollar estrategias de manejo y conservación en zonas impactadas por perturbaciones de gran magnitud.

Los datos fisiomorfológicos de *Nothofagus obliqua* incluyeron tasas de crecimiento en altura y diámetro, eficiencia en el uso del agua, asignación de

biomasa y parámetros de eficiencia de radiación. Estos datos se organizaron en una tabla específica (Tabla 2.4) y se integraron directamente en el modelo 3PG. La importancia de estas variables radica en su capacidad para capturar las características específicas de la especie, lo que fue clave para una calibración precisa.

Con estos datos, el modelo 3PG fue calibrado ajustando parámetros a las condiciones específicas de cada sitio. La validación se realizó mediante la comparación de los resultados simulados con valores reportados en literatura previa.

Tabla 2.4. Parámetros del modelo 3PG aplicados a *Nothofagus obliqua*, organizados por categorías como partición de biomasa, modificadores de PPN, estructura del dosel y propiedades del rodal.

Significado/Comentarios	Nombre	Unidades	N. Obliqua	Origen
<i>Biomass Partitioning And Turnover</i>				
<i>Allometric Relationships & Partitioning</i>				
<i>Foliage:Stem Partitioning Ratio @ D=2 Cm</i>	pFS2	-	0.768	(Dezzotti, 2008)
<i>Foliage:Stem Partitioning Ratio @ D=20 Cm</i>	pFS20	-	0.3	(Dezzotti, 2008)
<i>Constant In The Stem Mass V. Diam. Relationship</i>	aS	-	0.18	(Valenzuela et al., 2019)
<i>Power In The Stem Mass V. Diam. Relationship</i>	nS	-	2.23	
<i>Maximum Fraction Of Npp To Roots</i>	pRx	-	0.46	(Dezzotti, 2008)
<i>Minimum Fraction Of Npp To Roots</i>	pRn	-	0.41	
<i>Litterfall & Root Turnover</i>				
<i>Maximum Litterfall Rate</i>	gammaFx	1 month ⁻¹	0.03	(Leal et al., 2023)
<i>Litterfall Rate At T = 0</i>	gammaF0	1 month ⁻¹	0.001	D
<i>Age At Which Litterfall Rate Has Median Value</i>	tgammaF	months	36	D
<i>Average Monthly Root Turnover Rate</i>	gammaR	1 month ⁻¹	0.015	D

Tabla 2.4 (continúa en la siguiente página)

Tabla 2.4 (continuación)

Npp & Conductance Modifiers				
Temperature Modifier (Ft)				
Minimum Temperature For Growth	Tmin	°C	-5	(Weinberger & Ramirez, 2001)
Optimum Temperature For Growth	Topt	°C	21	
Maximum Temperature For Growth	Tmax	°C	30	
Frost Modifier (Ffrost)				
Days Production Lost Per Frost Day	kF	days	1	D
Soil Water Modifier (Fsw)				
Moisture Ratio Deficit For $F_{\square} = 0.5$	SWconst	-	0.7	D
Power Of Moisture Ratio Deficit	SWpower	-	0.9	D
Atmospheric Co2 Modifier (Fco2)				
Assimialtion Enhancement Factor At 700 Ppm	fCalpha700	-	1.4	D
Canopy Conductance Enhancement Factor At 700 Ppm	fCg700	-	0.7	D
Fertiltity Effects				
Value Of 'M' When Fr = 0	m0	-	0	D
Value Of 'Fnutr' When Fr = 0	fN0	-	1	D
Power Of (1-Fr) In 'Fnutr'	fNn	-	0	D
Age Modifier (Fage)				
Maximum Stand Age Used In Age Modifier	MaxAge	years	70	(Juacida et al., 2000)
Power Of Relative Age In Function For Fage	nAge	-	4	D
Relative Age To Give Fage = 0.5	rAge	-	0.95	D

Tabla 2.4 (continúa en la siguiente página)

Tabla 2.4 (continuación)

Stem Mortality & Self-Thinning				
<i>Mortality Rate For Large T</i>	gammaNx	% year ⁻¹	5	D
<i>Seedling Mortality Rate (T = 0)</i>	gammaN0	% year ⁻¹	10	D
<i>Age At Which Mortality Rate Has Median Value</i>	tgammaN	years	5	D
<i>Shape Of Mortality Response</i>	ngammaN	-	1	D
<i>Max. Stem Mass Per Tree @ 1000 Trees/Hectare</i>	wSx1000	Kg tree ⁻¹	486.7	(Valenzuela et al., 2019)
<i>Power In Self-Thinning Rule</i>	thinPower	-	1.5	D
<i>Fraction Mean Single-Tree Foliage Biomass Lost Per Dead Tree</i>	mF	-	0	D
<i>Fraction Mean Single-Tree Root Biomass Lost Per Dead Tree</i>	mR	-	0.2	D
<i>Fraction Mean Single-Tree Stem Biomass Lost Per Dead Tree</i>	mS	-	0.2	D
Canopy Structure And Processes				
Specific Leaf Area				
<i>Specific Leaf Area At Age 0</i>	SLA0	m ² kg ⁻¹	5	D
<i>Specific Leaf Area For Mature Leaves</i>	SLA1	m ² kg ⁻¹	5	D
<i>Age At Which Specific Leaf Area = (SLA0+SLA1)/2</i>	tSLA	years	2	D
Light Interception				
<i>Extinction Coefficient For Absorption Of Par By Canopy</i>	k	-	0.5	D
<i>Age At Canopy Cover</i>	fullCanAge	years	3	D
<i>Maximum Proportion Of Rainfall Evaporated From Canopy</i>	MaxIntcptn	-	0.15	D
<i>Lai For Maximum Rainfall Interception</i>	LAImaxIntcptn	-	0	D

Tabla 2.4 (continúa en la siguiente página)

Tabla 2.4 (continuación)

Production And Respiration					
Canopy Quantum Efficiency	alpha	molC molPAR ⁻¹	0.055		D
Ratio Npp/Gpp	Y	-	0.47		D
Conductance					
Minimum Canopy Conductance	MinCond	m s ⁻¹	0		D
Maximum Canopy Conductance	MaxCon d	m s ⁻¹	0.02		D
Lai For Maximum Canopy Conductance	LAlgcx	-	3.33		D
Defines Stomatal Response To Vpd	CoeffCo nd	1 mBar ⁻¹	0.05		D
Canopy Boundary Layer Conductance	BLcond	m s ⁻¹	0.2		D
Wood And Stand Properties					
Branch And Bark Fraction (Fracbb)					
Branch And Bark Fraction At Age 0	fracBB0	-	0.5		D
Branch And Bark Fraction For Mature Stands	fracBB1	-	0.1		D
Age At Which Fracbb = (Fracbb0+Fracbb1)/2	tBB	years	2		D
Basic Density					
Minimum Basic Density - For Young Trees	rhoMin	t m ⁻³	0.364	(Valenzuela et al., 2019)	
Maximum Basic Density - For Older Trees	rhoMax	t m ⁻³	0.437		
Age At Which Rho = (Rhomin+Rhomax)/2	tRho	years	4.000		
Stem Height					
Constant In The Stem Height Relationship	aH	-	0		D
Power Of Dbh In The Stem Height Relationship	nHB	-	0		D
Power Of Stocking In The Stem Height Relationship	nHN	-	0		D
Stem Volume					
Constant In The Stem Volume Relationship	aV	-	0		D
Power Of Dbh In The Stem Volume Relationship	nVB	-	0		D
Power Of Stocking In The Stem Volume Relationship	nVN	-	0		D

Tabla 2.4 (continúa en la siguiente página)

Tabla 2.4 (continuación)

Conversion Factors				
<i>Intercept Of Net V. Solar Radiation Relationship</i>	Qa	W m ⁻²	-90	D
<i>Slope Of Net V. Solar Radiation Relationship</i>	Qb	-	0.8	D
<i>Molecular Weight Of Dry Matter</i>	gDM_mol	gDM mol ⁻¹	24	D
<i>Conversion Of Solar Radiation To Par</i>	molPAR_MJ	mol MJ ⁻¹	2.3	D

*D: valor por defecto

III. RESULTADOS

3.1. Análisis de variables forestales

En esta sección se presenta el análisis de las principales variables forestales consideradas en el modelamiento del crecimiento de *Nothofagus obliqua*. Se han evaluado factores clave como la densidad del bosque, el tipo de suelo, la disponibilidad de agua y las condiciones climáticas, que influyen directamente en el crecimiento y regeneración de la especie. Los resultados obtenidos a partir de la recolección de datos bibliográficos y la aplicación del modelo 3PG permiten comprender mejor los patrones de crecimiento en diferentes condiciones ambientales. A continuación, se presentan los resultados y su interpretación, que sirven como base para evaluar el comportamiento y la productividad de la especie en los sitios estudiados.

3.1.1. Volumen y edad del rodal

El volumen acumulado de los rodales mostró un patrón de crecimiento distintivo entre los tres sitios estudiados (Figura 3.1). Florida presentó un crecimiento más rápido y un volumen máximo cercano a los $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, alcanzado alrededor de los 50 años del rodal. En contraste, Mulchén y Nacimiento presentaron valores máximos de volumen significativamente menores, con alrededor de $200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$

y $180 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, respectivamente a la misma edad. Esto refleja diferencias marcadas en las condiciones edáficas y climáticas entre los sitios.

El comportamiento del volumen de los rodales sugiere que Florida tiene el mayor crecimiento en volumen de madera acumulada. Por otro lado, Mulchén y Nacimiento presentan un crecimiento similar, aunque inferior al de Florida. A medida que los rodales envejecen, la tasa de incremento en volumen tiende a estabilizarse. En cuanto a la relación con la densidad de tallos, se observa que a pesar de que Florida tiene más árboles por hectárea, su mayor volumen indica que estos árboles también están creciendo mejor en diámetro y altura. En Mulchén, la menor densidad se traduce en menor volumen total, aunque los árboles restantes pueden estar creciendo más rápido individualmente.

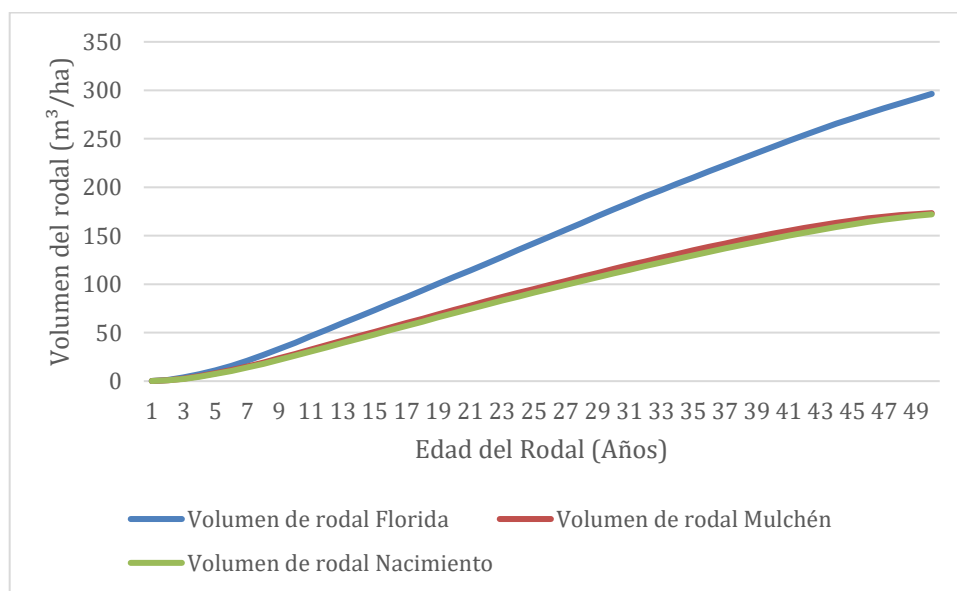


Figura 3.1. Evolución del volumen del rodal en tres localidades.

3.1.2. Diámetro a la altura del pecho (DAP)

El diámetro a la altura del pecho (DAP) mostró un crecimiento continuo en todos los sitios, con Mulchén destacándose con los mayores valores a lo largo del tiempo (Figura 3.2). A los 50 años, Mulchén alcanzó un DAP promedio de 28 cm, mientras que Florida y Nacimiento llegaron a 17 cm y 20 cm, respectivamente.

Mulchén presenta los mayores diámetros promedio, superando los 30 cm. En contraste, Florida y Nacimiento muestran crecimientos más lentos en diámetro. A pesar de tener menos árboles, en Mulchén los individuos restantes crecen más en diámetro, lo que puede estar relacionado con menor competencia. En cuanto a la relación con la densidad de tallos y el volumen, en Florida la mayor cantidad de árboles genera más competencia por recursos, lo que limita el crecimiento individual en diámetro. En Mulchén, la alta mortalidad inicial deja más recursos disponibles para los árboles sobrevivientes, permitiendo un mayor crecimiento en DAP.

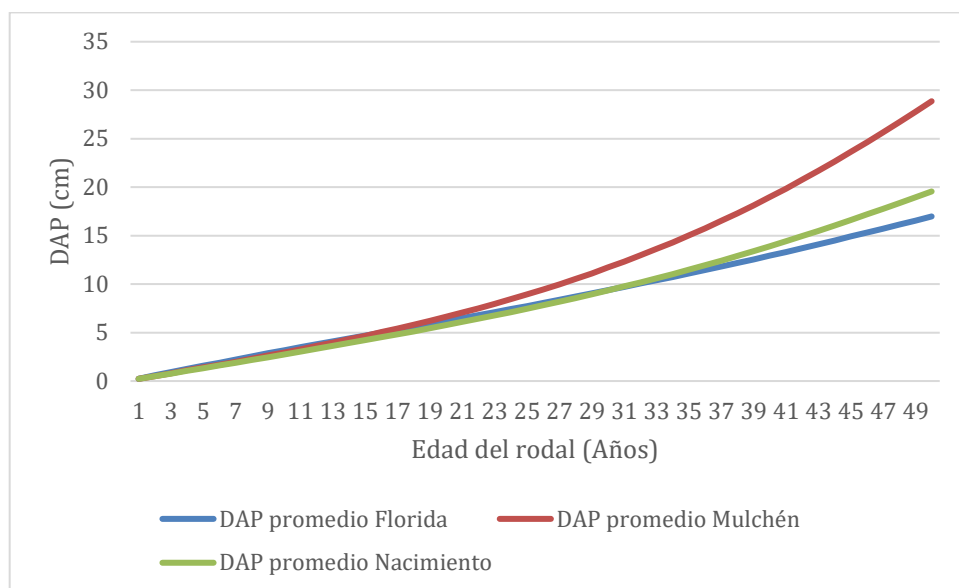


Figura 3.2. crecimiento del DAP por sitio y edad del rodal.

3.2. Análisis climático y relación con variables forestales

3.2.1. Comparación de variables climáticas

El análisis de las variables climáticas promedio destaca diferencias significativas entre los sitios (Tabla 3.1). Florida presenta temperaturas medias más moderadas y mayores niveles de precipitación anual (1200 mm), lo que contrasta con los valores menores observados en Mulchén y Nacimiento (850 mm y 900 mm, respectivamente).

Las altas temperaturas promedio en Mulchén y Nacimiento generan estrés hídrico adicional, limitando el crecimiento forestal. En cambio, las temperaturas inferiores en Florida se adaptan de mejor manera a los requerimientos de temperatura de crecimiento de *Nothofagus obliqua*.

Tabla 3.1. Comparación de variables climáticas promedio por sitio.

Sitio	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Precipitación (mm)	Radiación Solar (MJ m ⁻²)
Florida	21,66	3,68	48,67	7,77
Mulchén	26,94	-0,27	54,66	8,03
Nacimiento	28,93	2,74	49,85	8,03

3.3. Análisis de otras variables forestales

3.3.1. Relación entre número de árboles y edad del rodal en tres sitios

Se observa una disminución progresiva en la densidad de troncos con el tiempo en los tres sitios (Figura 3.3). Florida comienza con la mayor densidad inicial y mantiene una mayor cantidad de árboles en comparación con Mulchén y Nacimiento.

Mulchén tiene la mayor reducción en densidad, lo que indica una mayor mortalidad de árboles a lo largo del tiempo, mientras que Nacimiento muestra una tendencia intermedia entre los otros dos sitios.

En relación con la mortalidad, la mayor disminución en Mulchén sugiere condiciones más adversas, posiblemente por estrés hídrico o competencia. Florida mantiene más árboles vivos, lo que sugiere mejores condiciones para el establecimiento y menor competencia intraespecífica.

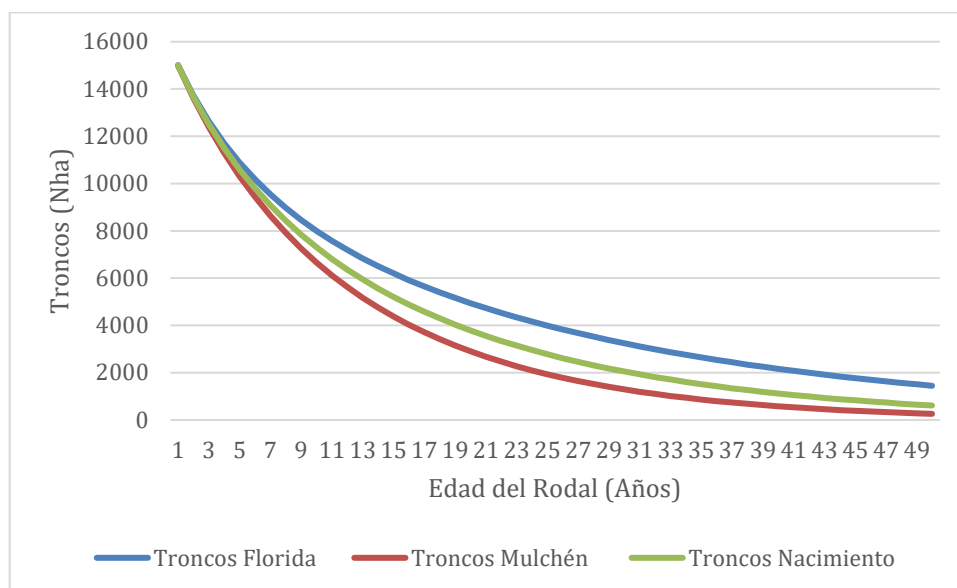


Figura 3.3. Relación entre el número de árboles ($N\ ha^{-1}$) y la edad del rodal (años) en los sitios de Florida, Mulchén y Nacimiento.

3.3.2. Incremento medio anual (MAI)

El MAI mostró un patrón decreciente en todos los sitios a medida que aumentaba la edad del rodal (Figura 3.4). Florida muestra el mayor MAI, alcanzando más de $6\ m^3/ha/año$ en su punto máximo. Mulchén y Nacimiento tienen valores similares, con un máximo alrededor de $4\ m^3\ ha^{-1}\ año^{-1}$. El MAI se estabiliza después de los 30 años, indicando que el rodal alcanza su madurez productiva.

En relación con el crecimiento en volumen y el índice de área foliar (LAI), un mayor MAI en Florida indica mejor productividad del sitio. El menor MAI en Mulchén y Nacimiento refuerza la idea de que las condiciones de suelo y agua

limitan el crecimiento. La estabilización del MAI sugiere que después de cierta edad, la producción de biomasa nueva se reduce.

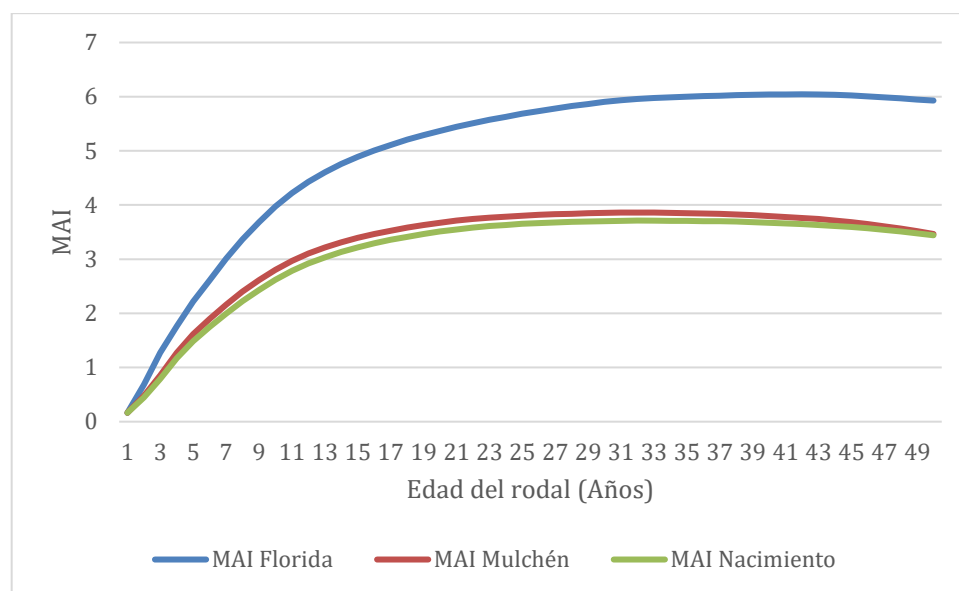


Figura 3.4. MAI por sitio y edad del rodal.

3.3.1. Índice de área foliar (LAI)

Florida alcanza el mayor LAI (alrededor de 3), mientras que Mulchén y Nacimiento se estabilizan cerca de 2 (Figura 3.5). A medida que el rodal envejece, el LAI disminuye, indicando una reducción en la cantidad de follaje debido a la senescencia.

En relación con la producción de biomasa, un mayor LAI en Florida indica mayor capacidad fotosintética y producción primaria neta. La menor LAI en Mulchén puede deberse a estrés hídrico, lo que limita el desarrollo del dosel. La

disminución del LAI en edades avanzadas sugiere autodesrame o competencia por luz.

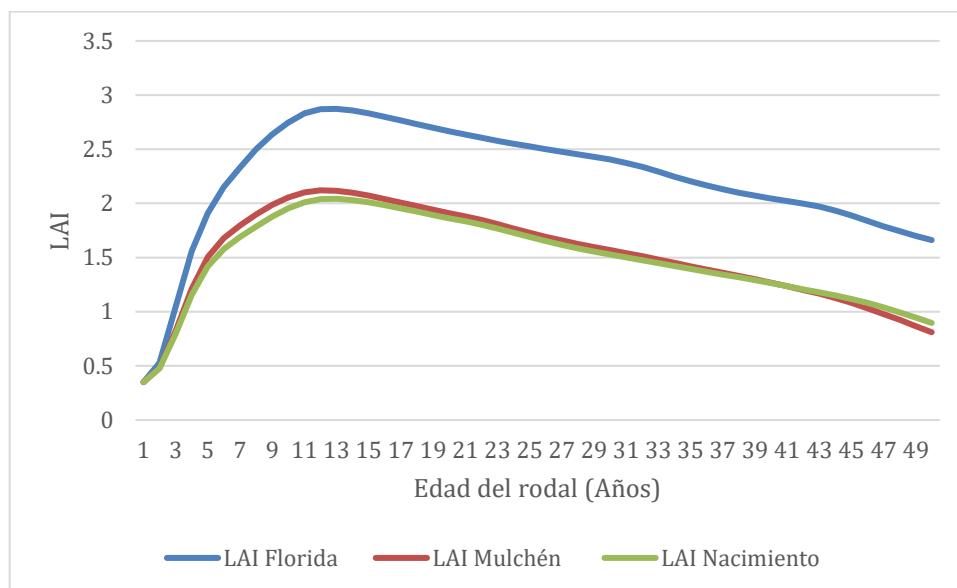


Figura 3.5. Evolución del LAI por sitio y edad del rodal.

3.4.1. Dinámica de la densidad de tallos y su relación con la mortalidad natural.

La densidad de tallos es un indicador fundamental de la estructura del rodal. En todos los sitios, se observa una tendencia decreciente, lo que indica que con el tiempo ocurre una mortalidad natural debido a competencia o factores ambientales.

- Florida mantiene una mayor densidad de árboles a lo largo del tiempo, lo que sugiere que el sitio posee mejores condiciones para el establecimiento y supervivencia de los individuos. Esta mayor densidad puede estar

relacionada con suelos más fértiles, mayor disponibilidad hídrica o menor presencia de eventos extremos.

- Mulchén presenta la mayor tasa de disminución en densidad, lo que sugiere que el sitio experimenta una mortalidad más acelerada. Esto podría deberse a condiciones más adversas, como baja disponibilidad de agua o suelos con menor capacidad de retención hídrica.
- Nacimiento tiene un comportamiento intermedio, con una disminución en densidad moderada. Esto podría indicar que el sitio tiene condiciones menos restrictivas que Mulchén, pero no tan favorables como Florida.

El proceso de autorraleo es un fenómeno natural que ocurre en todos los rodales debido a la competencia por recursos como luz, agua y nutrientes. En este contexto, la disminución en densidad con la edad es un mecanismo de ajuste del ecosistema para alcanzar un equilibrio entre la disponibilidad de recursos y la biomasa forestal.

3.4.2. Acumulación de volumen y su relación con la productividad del sitio

El volumen del rodal es un indicador clave de la capacidad productiva del ecosistema y su potencial para el almacenamiento de carbono.

- Florida presenta el mayor volumen acumulado a lo largo del tiempo, lo que sugiere un crecimiento más eficiente de los árboles en este sitio. Esto

indica que las condiciones edáficas y climáticas favorecen un mayor almacenamiento de biomasa y carbono.

- Mulchén y Nacimiento tienen un crecimiento más limitado en volumen, posiblemente debido a limitaciones en los factores ambientales. En estos sitios, los árboles podrían estar enfrentando restricciones en la captación de agua y nutrientes, lo que reduce su capacidad de acumulación de biomasa.

El aumento en el volumen del rodal está directamente relacionado con el balance de carbono del ecosistema. Sitios más productivos pueden actuar como sumideros de carbono más efectivos, ayudando a mitigar los efectos del cambio climático a través del secuestro de CO₂ atmosférico.

3.4.3. Índice de área foliar (LAI) y su impacto en la captura de energía solar

El índice de área foliar es una medida de la superficie de hojas por unidad de terreno y está directamente relacionado con la capacidad fotosintética del rodal.

- Florida mantiene el mayor LAI, alcanzando valores cercanos a 3 en su punto máximo. Esto indica una mayor densidad de follaje, lo que favorece una mayor absorción de radiación solar y un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles.

- Mulchén y Nacimiento tienen valores de LAI más bajos, lo que sugiere que la menor disponibilidad de agua o nutrientes está limitando la capacidad del rodal para mantener un dosel denso.

El LAI es un factor determinante en la eficiencia del uso del agua y la luz en los ecosistemas forestales. Un mayor LAI indica que el ecosistema es más eficiente en la captura de carbono y en la generación de microclimas que favorecen la biodiversidad del sotobosque. La reducción del LAI en rodales envejecidos sugiere que, con el tiempo, la estructura del dosel se modifica y puede afectar la fauna y flora asociada al ecosistema.

3.4.4. Incremento medio anual (MAI) y la sustentabilidad del crecimiento

El MAI es una medida del rendimiento del rodal en términos de crecimiento volumétrico por año.

- Florida presenta el MAI más alto, alcanzando valores superiores a 6 m³/ha/año. Esto indica que el sitio tiene un mayor potencial de crecimiento sostenible.
- Mulchén y Nacimiento tienen valores menores de MAI, lo que sugiere que las condiciones del sitio están limitando la capacidad del rodal para mantener altas tasas de crecimiento a lo largo del tiempo.

El MAI es un indicador clave para determinar la sustentabilidad del crecimiento forestal. Un alto MAI significa que el rodal tiene una alta capacidad de captura de carbono y producción de biomasa, lo que lo convierte en un ecosistema más resiliente. Sin embargo, si el MAI comienza a disminuir de forma abrupta en edades avanzadas, puede ser una señal de que el sitio está alcanzando su límite de sustentabilidad, lo que podría generar impactos en la biodiversidad y en la disponibilidad de recursos ecosistémicos.

3.4.5. Crecimiento en diámetro (DAP) y su relación con la estructura del rodal.

El crecimiento en diámetro es un indicador de la competencia dentro del rodal y de la disponibilidad de recursos por individuo.

- Mulchén muestra el mayor crecimiento en diámetro medio, lo que indica que los árboles que han sobrevivido a la alta mortalidad inicial han tenido acceso a más recursos, lo que les ha permitido un mayor desarrollo individual.
- Florida y Nacimiento presentan crecimientos en diámetro más lentos, probablemente debido a la mayor densidad de árboles y, por lo tanto, mayor competencia.

El crecimiento en diámetro está estrechamente relacionado con la estabilidad estructural del rodal. En sitios donde el crecimiento en diámetro es mayor, los

árboles pueden ser más resistentes a eventos climáticos extremos, como vientos fuertes o sequías. Por otro lado, rodales con menor crecimiento en diámetro pueden ser más susceptibles a disturbios naturales, como incendios o plagas.

3.4. Conclusiones de los resultados

Los resultados del análisis de las variables forestales en los tres sitios estudiados (Florida, Mulchén y Nacimiento) revelan importantes diferencias en cuanto a la productividad y crecimiento de *Nothofagus obliqua*. Florida presenta las condiciones más favorables para el crecimiento de la especie, con un volumen acumulado superior, un mayor incremento medio anual (MAI) y un índice de área foliar (LAI) más alto. Estos factores indican una mayor eficiencia en la captura de carbono y en la productividad del sitio, lo que podría traducirse en una mayor capacidad de este ecosistema para actuar como sumidero de carbono.

En contraste, Mulchén y Nacimiento presentan limitaciones en términos de recursos hídricos y condiciones edáficas, lo que afecta negativamente su crecimiento en volumen y diámetro. Aunque Mulchén muestra el mayor crecimiento en diámetro a medida que los árboles sobrevivientes acceden a más recursos, la mortalidad inicial y el estrés hídrico contribuyen a un menor crecimiento general en comparación con Florida. Nacimiento, por su parte, muestra una tendencia intermedia, con un comportamiento similar a Mulchén, pero con condiciones algo menos restrictivas.

Estos resultados subrayan la importancia de las condiciones ambientales en el desarrollo de los rodales de *Nothofagus obliqua* y proporcionan una base para futuras investigaciones y estrategias de manejo forestal que busquen optimizar la productividad de los rodales, adaptándolos a los diferentes contextos edáficos y climáticos de cada sitio. Además, la información obtenida sobre la dinámica de crecimiento, mortalidad y productividad permitirá una mejor comprensión de la sustentabilidad a largo plazo de estos ecosistemas forestales.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en esta investigación sobre la regeneración de *Nothofagus obliqua* en distintas zonas distribuidas por un gradiente de diferentes condiciones utilizando el modelo 3PG han aportado nuevas evidencias respecto a la dinámica de recuperación en ecosistemas templados de Chile. Este análisis permite comprender cómo las condiciones climáticas y edáficas a través de distintos gradientes latitudinales influyen en la regeneración forestal, contribuyendo al manejo sostenible de estas áreas (Echeverría & Lara, 2004).

4.1. Interpretación de Resultados en Relación con Estudios Previos

Factores Climáticos y Edáficos: Los resultados confirman que los factores climáticos, como la precipitación y las temperaturas extremas, tienen un impacto significativo en el crecimiento de *Nothofagus obliqua*. Esto concuerda con estudios previos, como los de Urrutia et al. (2023), que reportaron una mayor sensibilidad del crecimiento arbóreo a la disponibilidad de agua en zonas con climas mediterráneos. En el caso de las áreas evaluadas, se observó que las precipitaciones anuales y la calidad del suelo fueron determinantes clave para la regeneración, respaldando también hallazgos de Echeverría & Lara (2004) sobre la influencia de las condiciones edáficas en la productividad forestal.

4.2. Uso del Modelo 3PG

La utilización del modelo 3PG con parámetros obtenidos de forma sistemática de la literatura mostró una adecuada representación de la dinámica de crecimiento en las tres zonas seleccionadas. Esto coincide con investigaciones realizadas por Landsberg & Waring (1997), quienes destacaron la capacidad del modelo 3PG para simular patrones de crecimiento bajo distintas condiciones ambientales. En este estudio, la adaptación del modelo a distintos escenarios de la región del Biobío demuestra su aplicabilidad en escenarios de crecimiento en distintos sitios y condiciones.

4.3. Comparación entre Sitios de Estudio

Las diferencias observadas entre Florida, Mulchén y Nacimiento pueden atribuirse a la variabilidad de las condiciones ambientales y las características del sitio. Este hallazgo es consistente con el trabajo de Salas & García (2006) que señalaron que los patrones de regeneración son altamente dependientes de las condiciones locales y ambientales de cada sitio.

4.4. Implicancias Teóricas y Prácticas

- Teóricas: Este estudio refuerza la importancia de integrar modelos basados en procesos fisiológicos como el 3PG para comprender las respuestas de los bosques nativos a distintas condiciones climáticas. Los resultados también subrayan la relevancia de considerar tanto factores biofísicos como climáticos al estudiar el crecimiento de especies pioneras como *Nothofagus obliqua* (Juacida et al., 2000)
- Prácticas: Las implicancias prácticas incluyen la posibilidad de diseñar estrategias de restauración más eficaces, ajustadas a las características particulares de cada sitio. Los resultados pueden guiar la selección de áreas prioritarias para la intervención y orientar el manejo adaptativo de ecosistemas forestales frente al cambio climático y eventos extremos (Medlyn et al., 2011)

4.5. Excepciones y Limitaciones

- Dependencia de Parámetros y Datos de Entrada: El modelo 3PG requiere una cantidad significativa de datos de entrada para su calibración y ejecución, como el clima, precipitación, temperatura y radiación, características del suelo, como el contenido de agua y la capacidad de campo, y datos específicos de la especie forestal en estudio (Landsberg & Waring, 1997).

- Suposiciones Simplificadas sobre la Fisiología del Crecimiento: El modelo 3PG modela el crecimiento forestal basándose en principios fisiológicos simplificados, lo que puede llevar a desviaciones en ecosistemas complejos. Por ejemplo, el modelo asume que la eficiencia con la que las plantas convierten la luz en biomasa es relativamente constante, cuando en realidad esta eficiencia puede variar con la edad del bosque, la disponibilidad de nutrientes y otros factores (Chauchard & Sbrancia, 2003)
- Aplicabilidad Limitada en Bosques Naturales y Mixtos: El modelo 3PG fue diseñado originalmente para plantaciones forestales homogéneas, en las que la estructura de los rodales es uniforme y la densidad de los árboles sigue patrones predecibles (Xie et al., 2017).

V. CONCLUSIONES

El presente estudio presenta la capacidad del modelo de crecimiento 3PG para evaluar y predecir el crecimiento de *Nothofagus obliqua* en distintos sitios. Este modelo se ha consolidado como una herramienta robusta para simular patrones de crecimiento en distintas condiciones climáticas y edáficas, aportando un enfoque basado en procesos fisiológicos que enriquece el análisis de ecosistemas perturbados y posiblemente afectados por el cambio climático. Su aplicación en los sitios estudiados subraya su potencial para apoyar estrategias de manejo adaptativo, en particular en condiciones de suelos afectados por incendios.

Los resultados obtenidos han puesto de manifiesto la importancia crítica de la disponibilidad de agua, de radiación solar y la calidad del suelo en la regeneración y crecimiento de *Nothofagus obliqua*. Estas variables han demostrado ser determinantes clave en el éxito de la regeneración, alineándose con estudios previos que destacan la sensibilidad de esta especie a las condiciones ambientales.

Este trabajo refuerza tanto en el ámbito teórico como práctico la importancia de integrar factores biofísicos y climáticos en la gestión de bosques afectados. Desde una perspectiva teórica, se amplía el conocimiento sobre las dinámicas de

regeneración en escenarios de alta perturbación, mientras que, en el ámbito práctico, los resultados ofrecen una base sólida para diseñar estrategias de restauración dirigidas y priorizar intervenciones en áreas críticas. Además, el enfoque adoptado proporciona una metodología replicable que puede aplicarse en otras regiones con características similares, lo que representa un aporte significativo al campo de la ecología forestal.

Entre las recomendaciones destacadas, se sugiere ampliar el uso del modelo 3PG incorporando variables adicionales, como las interacciones entre especies y los efectos de la herbivoría, para lograr simulaciones más precisas y representativas. Asimismo, sería valioso explorar el impacto del cambio climático a largo plazo mediante proyecciones basadas en este modelo, lo que permitiría anticipar y planificar con mayor eficacia las estrategias de restauración.

VI.GLOSARIO

1. Adaptación al cambio climático: Estrategias y procesos mediante los cuales los ecosistemas y las especies ajustan sus estructuras y funciones para enfrentar condiciones climáticas cambiantes.
2. Biodiversidad: Variedad de especies, genes y ecosistemas en un área determinada, crucial para la estabilidad y funcionalidad de los ecosistemas.
3. Cambio climático: Alteraciones a largo plazo en los patrones climáticos globales o regionales, principalmente debido a actividades humanas como la emisión de gases de efecto invernadero.
4. Dinámica forestal: Cambios en la estructura, composición y función de los bosques a lo largo del tiempo debido a procesos naturales o influencias externas.
5. Disturbios antrópicos: Cambios en el medio ambiente causados por actividades humanas, como la deforestación, la urbanización y la agricultura intensiva.

6. Ecosistemas templados: Regiones biogeográficas caracterizadas por un clima moderado con estaciones definidas y una alta diversidad de flora y fauna.
7. Edáfico: Relativo a las características del suelo, como su composición, estructura y fertilidad.
8. Fertilidad del suelo: Capacidad del suelo para proporcionar nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas.
9. Herbivoría: Consumo de plantas por parte de animales, que puede influir en la regeneración y dinámica de los ecosistemas forestales.
10. Interacciones ecológicas: Relaciones entre organismos en un ecosistema, como competencia, depredación y mutualismo.
11. Manejo sostenible: Prácticas de gestión de recursos naturales que aseguran su uso a largo plazo sin comprometer la salud del ecosistema.
12. Modelos predictivos: Herramientas matemáticas o computacionales utilizadas para predecir comportamientos o resultados futuros basados en datos actuales o históricos.
13. *Nothofagus obliqua*: Especie de árbol nativo de los bosques templados de Chile y Argentina, conocida también como roble pellín, clave en la regeneración post-incendio.

14. Perturbación: Evento que altera significativamente la estructura o función de un ecosistema, como incendios, tormentas o actividades humanas.
15. *Physiological Principles in Predicting Growth* (3PG): Modelo de crecimiento forestal basado en principios fisiológicos que simula el crecimiento de los bosques considerando factores climáticos, edáficos y de manejo.
16. Plantaciones mixtas: Sistemas de reforestación que combinan diferentes especies de árboles para mejorar la biodiversidad y la productividad del ecosistema.
17. Procesos fisiológicos: Mecanismos biológicos internos de los organismos, como la fotosíntesis y la transpiración, que determinan su crecimiento y función.
18. Proyecciones a largo plazo: Predicciones basadas en datos actuales que estiman resultados o cambios futuros en un periodo extendido de tiempo.
19. Regeneración forestal: Proceso natural o asistido de crecimiento de nuevos árboles y vegetación en un área previamente afectada.
20. Resiliencia: Capacidad de un ecosistema o especie para recuperarse de disturbios como incendios, sequías o intervenciones humanas.

21. Servicios ecosistémicos: Beneficios que los ecosistemas proporcionan a los seres humanos, como la purificación del aire, la regulación del clima y la provisión de alimentos.
22. Simulación computacional: Uso de programas y algoritmos para recrear y estudiar fenómenos complejos en entornos virtuales.

VII. BIBLIOGRAFÍA

Chauchard, L., & Sbrancia, R. (2003). Modelos de crecimiento diamétrico para *Nothofagus obliqua* *Diameter growth models for Nothofagus obliqua*. BOSQUE 24, pp. 2-3.

Dezzotti, A. (2008). Acumulación y asignación de biomasa en renovales de tres especies de *Nothofagus* en los extremos de un gradiente de luz en claros de un bosque subantártico. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales, 17(1), pp. 18-30.

Dinamarca, D. I., Galleguillos, M., Seguel, O., & Faúndez Urbina, C. (2023). CLSoilMaps: A national soil gridded database of physical and hydraulic soil properties for Chile. Scientific Data, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02536-x>

Echeverría, C., & Lara, A. (2004). Growth patterns of secondary *Nothofagus obliqua*-*N. alpina* forests in southern Chile. *Forest Ecology and Management*, 195(1–2), pp. 29–43. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.02.034>

Hoffmann, J. A. (1997). Flora silvestre de Chile. Zona araucana; una guía ilustrada para la identificación de las especies de plantas leñosas del sur de Chile (entre el río Maule y el seno de Relocaví) (4a ed.).

Juacida, R., Siebert, H., & Torres, M. (2000). Edad y durabilidad natural de renovales de *Nothofagus obliqua* *Age and natural durability of second growth forest of Nothofagus obliqua*. BOSQUE 21, pp. 11-25.

Landsberg, J. J., & Waring, R. H. (1997). A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *En Forest Ecology and Management* 95.

Leal, F., Aburto, F., Aguilera, N., Echeverría, C., & Gatica-Saavedra, P. (2023). *Forest degradation modifies litter production, quality, and decomposition dynamics in Southern temperate forests*. *Frontiers in Soil Science*, 3. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2023.1111694>

Lin, S., Li, L., Liu, S., Yang, S., Lin, D., Zhao, X., Chen, L., & Huang, H. (2024). *Predicting post-fire forest recovery using the 3-PG model with bi-temporal Landsat imagery in high-severity burned areas of Great Xing'an Mountain*. *Forest Ecology and Management*, pp. 563. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121991>

Medlyn, B. E., Duursma, R. A., & Zeppel, M. J. B. (2011). *Forest productivity under climate change: A checklist for evaluating model studies*. *En Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(3), 332–355. Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/wcc.108>

Ministerio de Agricultura de Chile. (2024). Geoportal de Desastres. <https://ide.minagri.gob.cl/geoweb/2019/11/21/desastres/>

Ministerio de Agricultura (Minagri). (2019). Plataforma de Información Geoespacial del Ministerio de Agricultura. Incendio de Magnitud (Polígonos – CONAF).

NASA Langley Research Center. (2024). POWER Data Access Viewer. <https://power.larc.nasa.gov/>

Salas, C., & García, O. (2006). *Modelling height development of mature Nothofagus obliqua*. *Forest Ecology and Management*, 229(1–3), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.04.015>

Urrutia, R., Barichivich, J., Szejner, P., Rozas, V., Lara, A., & Lara, A. (2023). *Responses of Nothofagus obliqua forests to recent climate drying across the Mediterranean-temperate biome transition in South-Central Chile*. *Journal of Geophysical Research*, 128(4), 10. <https://doi.org/10.1029/2022jg007293>

Valenzuela, C., Acuña, E., Ortega, A., Quiñonez-Barraza, G., Corral-Rivas, J., & Cancino, J. (2019). *Variable-top stem biomass equations at tree-level generated by a simultaneous density-integral system for second growth forests of roble, raulí, and coigüe in Chile*. *Journal of Forestry Research*, 30(3), 993–1010. <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0630-9>

Weinberger, P., & Ramírez, C. (2001). Microclima y regeneración natural de Raulí, Roble y Coigüe (*Nothofagus alpina*, *N. obliqua* y *N. dombeyi*).

Xie, Y., Wang, H., & Lei, X. (2017). *Application of the 3-PG model to predict growth of Larix olgensis plantations in northeastern China*. *Forest Ecology and Management*, 406, 208–218. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.018>