



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales

Efecto de la edad del rodal y el cambio climático en la probabilidad de afectación por incendios forestales en plantaciones de *Eucalyptus* spp. Primera etapa: desarrollo de una muestra

Patrocinante: Sr. Óscar Thiers E.

Trabajo de Tesina presentado como parte de los requisitos para optar al Título de **Ingeniero Forestal**

FURKAN HASHIM RIAZ CUEVAS

VALDIVIA

2026

Índice de materias

Página

i	Calificación del Comité de Titulación	i
ii	Agradecimientos	ii
iii	Dedicatoria	iii
iv	Resumen	iv
1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Efectos del cambio climático en la dinámica de los incendios forestales	1
1.2	Efecto del riesgo de incendio y la edad de rotación óptima	3
1.3	Probabilidad de afectación por incendio y variables estructurales del rodal	3
2	MÉTODOS	6
2.1	Área de estudio	6
2.2	Diseño y selección de la muestra	7
2.3	Estimación del valor de madera en pie	9
2.4	Muestreo estratificado aleatorio	12
2.5	Estructura de datos de panel	13
2.6	Construcción de variables para el modelo econométrico	14
2.7	Definición de la probabilidad de afectación por incendio	15
2.8	Modelo econométrico	15
3	RESULTADOS PRELIMINARES	15
4	CONCLUSIONES PRELIMINARES	18
5	REFERENCIAS	18
Anexos	1. Ejemplo de cruce entre límites y estratos para el proceso de estimación de la muestra	24
	2. Distancia promedio de los polígonos cada subregión a la industria más cercana	25
	3. Tipo de variables para la estimación del modelo econométrico	26
	4. Formulación de probabilidad de afectación por incendio	27
	5. Formulación de modelo econométrico	27

Calificación del Comité de Titulación

Seminario de Investigación (GFOR305-15)

Nota
6,0

El profesor patrocinante certifica que este trabajo cumple con los requisitos de contenido y forma exigidos por el Reglamento de Titulación de la Escuela de Pregrado Ingeniería en Conservación de Recursos Naturales-Ingeniería Forestal. En virtud del Acuerdo de Vinculación Pregrado-Magíster, aprobado por Resolución N°AV-038 de 04 de octubre de 2022, la nota obtenida en la asignatura GFOR305-15 Seminario de Investigación se homologa como nota de la asignatura EPFO298-17 Tesina o ECRN298-18 Tesina, según corresponda.



Sr. Óscar Thiers E.

Agradecimientos

En esta importante etapa de mi vida, deseo agradecer en primer lugar a quien logró que todo esto fuera posible: mi madre, Tamara Cuevas Meriño. Gracias a ella, quien sin un título universitario y en su rol de dueña de casa y máxima emprendedora, logró mantener a flote a su familia: mi hermano y yo. Ella, quien me enseñó, a través de sus acciones, a no rendirme, a buscármela, a trabajar con dignidad y responsabilidad, a cuidar a los míos y ayudar a los demás sin esperar nada a cambio. Gracias madre.

A mi hermano, Abdul, quien sin duda fue una de mi máximas motivaciones cuando poca ganas tenía. Saber que formas parte del ejemplo a seguir de tu hermano es, sin comparaciones, una responsabilidad y un privilegio tremendo. Gracias nicha.

A la familia Molina Soto, por su confianza hacia mi persona, por recibirme siempre, brindarme gratas conversaciones y estupendos asados de cordero patagón. Gracias Tía Vivi, Tío Boris, Agustín, Rodrigo, abuelita Kan y, en especial, a ti Luciana (miso), quién me acompaña en este camino, brindándome apoyo incondicional y escuchándome cuando nadie más lo podía hacer. Gracias.

Agradezco a toda mi familia sureña, los Cuevas Meriño. Mención especial a quienes en el último tiempo fueron una fuente de apoyo importante: mi tío Seba, mi Wita, mi tía Mariana, y a mis primos: Camilo, Ariel y Lucas.

A mis amigos de Random + Sofí. Más de 20 años de amistad. Gracias a quienes pudieron visitarme y conocer la magia del sur; a quienes fueron mis oídos, fuente de risas, motivación, y recuerdo de grandes anécdotas. Mención especial a Nachito por alentarme en nuestras largas llamadas.

A mis amigos/as que formé en la carrera: Omar, Dafne, Fran, Felipe, Mati, Cam, Seba, Javi, Nati, Leandro, France, Eve, y al team Vodudahue. Gracias por las conversaciones, las risas, la motivación, los trabajos grupales, los terrenos, el estrés compartido, los almuerzos, y las mañanas y tardes de estudio.

A los amigos/as que formé en los distintos trabajos de fin de semana: a los del cine, a los del retail y a los del acuario. Conversar y trabajar junto a ustedes, que compartían metas similares, fue importante para seguir adelante.

A los funcionarios y docentes de la facultad. En especial a la comisión evaluadora: al Prof. Rodrigo por su confianza y enseñanzas, por creer en mí desde que cursé su asignatura y ofrecerme este importante e interesante tema de estudio; al Prof. Óscar por su motivación, conocimientos entregados, su confianza y amistad; al Prof. Mario por su disposición y correcciones.

Por último, a mi Padre, quien a pesar de su distancia, su cultura, su idioma, su religión y su origen, me entregó valores y costumbres que hasta el día de hoy cargo con orgullo.

Dedicatoria

*A dos grandes mujeres que además de compartir el mismo día de nacimiento: 30 de diciembre.
Comparten el amor infinito e incondicional hacia sus hijos.
A Viviana Soto Ruiz (Q.E.P.D) y
Tamara Cuevas Meriño.*

“El precio que pagamos por la previsión del futuro es la desazón que ello engendra. Sin duda, el augurio de una calamidad no resulta muy divertido... Pero necesitamos de los componentes fatalistas de nuestra naturaleza para sobrevivir”

Carl Sagan, Los dragones del Edén

Resumen

La zona centro-sur de Chile ha experimentado, durante la última década, un aumento sin precedentes de la superficie afectada por incendios forestales. Aunque los incendios mayores a 200 ha representan solo una fracción menor del total de eventos, concentran la mayor parte de la superficie quemada, afectando especialmente a las plantaciones forestales. Este problema es relevante tanto por sus efectos en la superficie de plantaciones como por su relación con el cambio climático, la acumulación de combustible y la necesidad de adaptar las decisiones de manejo forestal frente a un riesgo creciente. El objetivo general consiste en estimar el efecto de la edad del rodal en la probabilidad de afectación por incendios forestales en plantaciones de *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens* en Chile. Para ello, esta primera etapa desarrolla la propuesta metodológica y el diseño muestral que servirán de base para una segunda etapa orientada a construir una base de datos de panel, estimar un modelo econométrico y proyectar escenarios bajo cambio climático. Metodológicamente, el estudio se delimita entre el Maule y Los Lagos, define subregiones productivas, construye unidades muestrales y aplica un muestreo estratificado con selección aleatoria de polígonos. Debido a que el estudio está motivado por decisiones de manejo y adaptación bajo el riesgo de incendio, la variable utilizada para el cálculo del error de muestreo y tamaño de la muestra es el valor de madera en pie, variable que integra productividad y valor económico, permitiendo representar mejor la heterogeneidad de la población. Los resultados preliminares indican que la muestra reproduce la heterogeneidad espacial y de rentabilidad de las plantaciones. Se obtuvo un error muestral entre 1,70 y 2,26% (promedio 2,02%), y se cuenta con suficientes casos positivos (1.046 polígonos quemados) para sustentar el desarrollo del modelo econométrico en la etapa posterior.

Palabras claves: Muestreo estratificado aleatorio, medidas preventivas, valor de madera en pie, productividad de sitio forestal, error muestral.

1. INTRODUCCIÓN

En la última década, la superficie afectada por incendios forestales en la zona centro-sur de Chile (34°- 41°S) ha aumentado sin precedentes. En términos de ocurrencia, incendios forestales mayores a 200 hectáreas corresponden al 1%, sin embargo, representan más de la mitad de la superficie quemada por año (González *et al.* 2020), y solo la superficie afectada en la última década supera en más de un 100% a la década anterior (CONAF 2024). La misma tendencia se observa en plantaciones forestales, donde las plantaciones de *P. radiata* y *Eucalyptus* spp. se han visto afectadas en más de un 200% en la presente década en comparación a la década anterior (CONAF 2024). De lo anterior, se desprenden dos observaciones relevantes: la primera, se está quemando una mayor superficie en un periodo más corto; la segunda, las plantaciones forestales constituyen el tipo de cobertura más afectado en la última década.

El presente trabajo corresponde a la primera etapa de un estudio de mayor alcance que continuará a través de la tesis de magíster. En esta primera etapa se desarrolló una estrategia de muestreo para obtener una muestra de polígonos, la construcción de datos de panel para el periodo 2000-2017 con una afectación anual por incendios forestales (quemado o no quemado), y con covariables climáticas, fisiográficas y antrópicas. Además, incorpora como covariables de interés la edad del rodal y la productividad del sitio forestal. Esta base de datos de panel será utilizada en una segunda etapa para ajustar un modelo econométrico que permita estimar el efecto de la edad del rodal en la probabilidad de afectación por incendios y proyectar la superficie quemada, bajo distintos escenarios de cambio climático, en plantaciones de *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens*.

1.1 Efectos del cambio climático en la dinámica de los incendios forestales

Durante los mega-incendios de las temporadas 2016-2017 y 2022-2023, se consumieron del orden de 281 mil (49%) y 222 mil hectáreas (52%) de plantaciones en cada temporada, respectivamente (CONAF 2024). Estos incendios de gran escala e intensidad (> 10.000 hectáreas), se concentran principalmente entre las regiones administrativas de O'Higgins y La Araucanía, una zona que abarca desde climas mediterráneos por el norte hasta templados hacia el sur (Holz *et al.* 2012), donde el desbalance de los patrones climáticos históricos (producto del efecto del cambio climático) sumado a un déficit hídrico asociado a la megasequía prevaleciente en la última década (Garreaud *et al.* 2017, 2020), expresados en mayores temperaturas, menores precipitaciones y fuertes vientos durante una temporada de incendios forestales más larga (González *et al.* 2018), incrementan la inflamabilidad de la vegetación

(McWethy *et al.* 2021) y, en consecuencia, se favorece la ignición y propagación de incendios originados principalmente por actividad antrópica (Urrutia-Jalabert *et al.* 2018, González *et al.* 2018, 2020).

Los efectos esperados del cambio climático para las próximas décadas indicarían un aumento sostenido en las temperaturas y una disminución de precipitaciones (Feron *et al.* 2019, Araya-Osses *et al.* 2020, Carrasco *et al.* 2022, Carrasco-Escaff *et al.* 2024), propiciando mayor frecuencia de incendios forestales de alta magnitud (Urrutia-Jalabert *et al.* 2018, Ciocca *et al.* 2023). Bajo proyecciones de escenarios pesimistas de cambio climáticos (RCP¹ 8,5), Carrasco *et al.* (2022) reportan reducciones en las precipitaciones hacia el 2070, con valores comparables a los de la última década seca (2010-2020). Lo anterior indica que, bajo un escenario de continuidad en las emisiones actuales, la segunda mitad del presente siglo tendería a reproducir, en términos climáticos, condiciones comparables a las registradas en temporadas recientes de incendios forestales.

Asimismo, se esperaría una marcada diferencia e intensificación de los efectos del cambio climático a lo largo de la zona centro-sur, así como ha ocurrido en los cambios de gradientes de actividad de fuego entre 1981-2010 y 2014-2023 (Cordero *et al.* 2024), donde en las regiones más secas del norte, eventos prolongados como sequías estarían limitando la propagación de combustible y, de esta forma, suprimiendo los incendios forestales. Por el contrario, en las regiones más húmedas hacia el sur se ha observado un aumento e intensidad de estos eventos, producto de una mayor disponibilidad y continuidad de combustible seco (Jones *et al.* 2022, Kampf *et al.* 2025). En esta línea, Gajardo *et al.* (2025) predicen, para distintos escenarios de emisiones, un aumento de las probabilidades de ocurrencia de incendios forestales hacia el norte, desde la región de O'Higgins hasta el Ñuble, por la zona precordillerana; y hacia el sur, desde el Biobío hasta Los Lagos, desde la cordillera de la Costa hasta la Depresión Intermedia, con algunas excepciones en el sector norte de la costa en las regiones del Biobío y Maule.

Complementariamente, para el caso de las plantaciones forestales de *P. radiata*, Niklitschek y Labbé (2024) observaron un aumento en la probabilidad de quema del rodal y de la superficie afectada, proyectada bajo escenarios pesimistas e intermedio (RCP 8,5 y RCP 4,5), en las regiones más productivas, específicamente en las zonas costeras entre Maule y Biobío, y en la región de La Araucanía. De forma inversa, en las zonas menos productivas como el secano interior y la Depresión Intermedia, se proyecta una menor probabilidad de quema debido a una menor disponibilidad de combustible.

¹ Trayectorias de Concentración Representativas (RCP): RCP 2,6 representa una ruta optimista con reducciones muy ambiciosas; RCP 4,5/6,0 son escenarios moderados de estabilización; y RCP 8,5 corresponde a un escenario pesimista de altas emisiones (Taylor *et al.* 2012, Van Vuuren *et al.* 2011).

1.2 Efecto del riesgo de incendio en la edad de rotación óptima

La incorporación del efecto del riesgo de incendio (u otras perturbaciones catastróficas) en el rodal, reduce la edad óptima de rotación (Reed 1984). Además, si el riesgo de incendio aumenta con la edad del rodal, la edad de rotación óptima se reduce con una magnitud mayor (Reed 1987, Amacher *et al.* 2005). Acorde a Reed (1984), el efecto del riesgo de incendio es similar al efecto de la tasa de descuento en el modelo Faustmann (1849), es decir, el incremento en el costo de oportunidad del capital asociado al vuelo y al suelo conlleva una reducción en la edad óptima de rotación respecto del caso en que el riesgo de incendio no se considera. No obstante, dicho efecto puede ser modificado con regímenes de manejo como intervenciones intermedias durante la rotación y variaciones en la densidad inicial de la plantación. Las medidas preventivas como la anticipación del raleo pueden compensar el efecto del riesgo de incendio y resultar, incluso, en una edad óptima de rotación más larga (Amacher *et al.* 2005). Estos resultados se obtuvieron mediante simulaciones basadas en la condiciones de un rodal de *Pinus taeda* ubicado en la llanura costera del sureste de Estados Unidos. Estos estudios asumen que el riesgo es exógeno al rodal.

A diferencia de estos estudios, Ferreira *et al.* (2012, 2014) consideran que el riesgo de afectación por incendio es endógeno y puede verse influido por variables estructurales del rodal y de manejo. En el caso de Ferreira *et al.* (2012), mediante simulaciones estocásticas en rodales de plantaciones de *E. globulus* en Portugal, se evaluó un sistema de cuatro ciclos de cosecha dentro una rotación completa de 64 años. Sus resultados indican que la incorporación del riesgo de incendios reduce del valor esperado del suelo y la duración esperada de los ciclos dentro de la rotación, pero no modifica el número de ciclos planificados dentro de la rotación completa.

1.3 Probabilidad de afectación por incendio y variables estructurales del rodal

Según Costafreda-Aumedes *et al.* (2017), la inclusión del riesgo de incendio en decisiones de manejo en la literatura se centra más en la modelación y predicción de la ocurrencia del incendio que vincular las decisiones de manejo, a través de medidas preventivas, y cómo sus efectos modifican el riesgo o la afectación de dicha perturbación.

No obstante, existen esfuerzos, mediante estudios empíricos, que relacionan variables a nivel de rodal con la afectación por incendios. Estos estudios estiman la probabilidad de que un rodal sea afectado por un incendio (probabilidad de ser quemado) en función de atributos del rodal, los cuales son medibles

y modificables (p. ej. edad, área basal y biomasa) (González *et al.* 2006). En bosques naturales y plantados de España y Portugal, se ha logrado estimar las relaciones asociativas entre las características del rodal y la probabilidad de afectación por incendios (González *et al.* 2006, Marques *et al.* 2012, Botequim *et al.* 2013). La afectación por incendio se midió como un resultado binario utilizando un análisis de regresión logística. En Portugal, para bosques de *P. pinaster*, Marques *et al.* (2012) reportan que la probabilidad de afectación disminuye tanto con el área basal como con el cociente entre el área basal y el diámetro medio cuadrático. Botequim *et al.* (2013) para plantaciones de *E. globulus* reportan una relación positiva entre la probabilidad de afectación y el cociente entre el área basal y el diámetro medio cuadrático. En estos estudios, la edad del rodal fue omitida debido al procedimiento de selección de variables utilizado.

Estos estudios utilizaron información proveniente de inventarios forestales nacionales de amplia cobertura espacial. La construcción de la muestra en los casos de Portugal se restringió a parcelas ubicadas cerca de puntos de ignición, con el fin de comparar rodales quemados y no quemados con condiciones similares de exposición al fuego. En contraste, la aplicación de un muestreo aleatorio permitiría reducir la concentración espacial de observaciones y, de esta forma, atenuar problemas de correlación espacial asociado a la propagación del incendio entre polígonos contiguos. También evitaría sesgos de selección (Angrist y Pischke 2009), y fortalecería la validez de inferencia, a partir de una muestra representativa, hacia la población.

A pesar de que se ha logrado estimar relaciones de variables del rodal con la probabilidad de afectación por incendio, la interpretación causal de dichas relaciones es limitada al no abordar los efectos de variables no observadas, provenientes, por ejemplo, de la variabilidad en suelos, características del paisaje o la respuesta al riesgo percibida por los propietarios, que pueden afectar la carga de combustible o las intervenciones de manejo, teniendo como consecuencia estimaciones sesgadas de los efectos parciales de las covariables de interés (Angrist y Pischke 2009)

En este contexto Niklitschek y Labbé (2024) modelan la probabilidad de quema de plantaciones de *P. radiata* en Chile, utilizando datos de panel para incorporar la heterogeneidad no observada a nivel de rodal y estimar efectos parciales de la edad, del clima y su interacción. En sus resultados, se encontró una relación no monotónica, en donde la probabilidad de afectación por incendio es constante o disminuye en la etapa juvenil y aumenta durante la etapa adulta (desde el raleo comercial hasta la cosecha), también observaron que la probabilidad depende de la productividad del sitio: curvas más planas para sitios de baja y alta productividad. Los autores atribuyen estos resultados a una menor carga de combustible en sitios de baja productividad, y en el caso de sitios de alta productividad, se asocia este

resultado a la intensidad del manejo, con intervenciones de raleo y podas más tempranas y frecuentes, que disminuirían la carga de combustible a lo largo de la rotación.

En el caso de plantaciones de rápido crecimiento como *Eucalyptus* spp., en Chile solo se aplican esquemas de manejo pulpables, por lo tanto, no existen intervenciones intermedias como podas y raleos. Las únicas medidas de manejo aplicables ante el riesgo de incendios son la modificación de la densidad de plantación y la edad de cosecha, junto con la aplicación de quemas prescritas. Otras medidas, que forman parte de la silvicultura preventiva como las fajas corta fuego, corta combustible o libre de vegetación (CONAF 2022), son ampliamente utilizadas por las principales empresas forestales del país. Sin embargo, estas medidas pueden ser poco efectivas por sí solas, como en los casos reportados por Syphard *et al.* (2011a, 2011b) y Gannon *et al.* (2023) en bosques de coníferas en California. Además, al ser medidas focalizadas en la zona de interfaz urbano-forestal (CONAF 2022), conllevan un alto costo de oportunidad producto de la reducción de superficie productiva que es destinada para este tipo de estructuras preventivas y tienen un costo importante por unidad tratada (Oliveira *et al.* 2016).

Para el propietario forestal, integrar medidas preventivas en el manejo forestal ante el riesgo de incendios puede generar beneficios económicos al resguardar e incluso incrementar el valor del rodal. Aun cuando no ocurra un incendio, las medidas pueden mejorar la calidad de la plantación y, en consecuencia, aumentar el valor del producto final, como es el caso de esquemas de manejo intensivo en plantaciones de *P. radiata* (Niklitschek y Labbé 2024). Esta integración también tiene beneficios públicos, ya que no tan solo reduciría las pérdidas de los propietarios, sino que también puede disminuir los gastos estatales a la hora de combatir y suprimir el incendio al contribuir en la reducción de su intensidad y tasa de propagación (Amacher *et al.* 2005, Brodie *et al.* 2024, Niklitschek *et al.* 2024).

El presente estudio está motivado por el fin de generar conocimiento empírico que respalde decisiones de manejo forestal adaptativas ante el creciente riesgo de incendios forestales en plantaciones de *E. globulus* y *E. nitens*. Para esto, se plantean las siguientes hipótesis: 1) la probabilidad de afectación por incendios forestales aumenta con la edad de las plantaciones de *Eucalyptus* spp. en Chile, debido a la acumulación de biomasa; 2) el efecto de la edad en la probabilidad de afectación por incendios forestales depende de la productividad del sitio forestal.

El objetivo general de este estudio es estimar el efecto de la edad del rodal en la probabilidad de afectación por incendios forestales en plantaciones de *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens* en Chile. Para concretar este objetivo, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- i. Obtener una muestra por subregión productiva de las plantaciones de *E. globulus* y *E. nitens* que permita realizar inferencia estadística y establecer relaciones de causalidad.

- ii. Estimar el efecto de la edad de la plantación en la probabilidad de afectación por incendios bajo diferentes índices de sitio.
- iii. Estimar la probabilidad de afectación por incendios y la superficie quemada, bajo condiciones de climas actual y escenarios proyectados de cambio climático.

En esta primera etapa se reportan los resultados relativos al objetivo específico 1.

2. MÉTODOS

2.1 Área de estudio

El área de estudio comprende la superficie de plantaciones de *E. globulus* y *E. nitens* distribuida entre las regiones administrativas del Maule, en el norte, hasta la provincia de Osorno de la región de Los Lagos, en el sur, (34°- 40°S) (figura 1). Entre estas regiones se concentra un 89% de la superficie² de plantaciones a nivel nacional, de la cual un 38% corresponde a *Eucalyptus* spp. y un 58% a *P. radiata* (Poblete *et al.* 2025).

Esta zona se caracteriza por tener una variación climática de norte a sur, en donde entre las latitudes 34° y 37°S predomina un clima mediterráneo de veranos secos y cálidos e inviernos húmedos, alcanzando temperaturas máximas superiores a 30°C en periodos estivales y un rango de precipitaciones anual entre 100 y 500 mm. Hacia el sur, entre las latitudes 37° y 40°S, predomina un clima templado de inviernos fríos y húmedos, y periodos secos de menor duración, con precipitaciones anuales entre 1.000 y 1.500 mm (Viale y Garreaud 2015). Además, el área presenta diferencias climáticas de forma transversal (de oeste a este) producto del efecto de las cordilleras de la Costa y de Los Andes (Schlatter y Gerding 1995), en donde desde el litoral hacia la cordillera de Los Andes: disminuye la humedad relativa (en especial en verano), la precipitación fluctúa de acuerdo con la geomorfología y su efecto orográfico, disminuye el periodo libre de heladas, y aumenta el número de días con heladas y su intensidad.

Los tipos de suelos también presentan diferencias a lo largo del área de estudio, en función del material de origen y grado de evolución (Schlatter *et al.* 1994, 1995). Hacia el norte, dominan los suelos de origen granítico y de rocas metamórficas en la cordillera de la Costa, y sedimentarios en la Depresión

² Se reporta para el año para el año 2023 una superficie total plantada de 2.224.163 hectáreas (Poblete *et al.*, 2025).

Intermedia; en el centro comienza la presencia de suelos volcánicos evolucionados y las arenas volcánicas, en conjunto con los de cenizas volcánicas recientes y sedimentos marinos; en el sur priman las cenizas volcánicas desde la Depresión Intermedia hacia la cordillera de Los Andes, y hacia la cordillera de la Costa los de origen de roca metamórfica. En sentido transversal (oeste a este), entre el litoral hasta la Depresión Intermedia, predominan los suelos de sedimentos marinos y de tipo graníticos y/o metamórficos, luego los sedimentarios (aluviales) y volcánicos evolucionados (rojos arcillosos), hacia el centro, en la Depresión Intermedia se presentan arenas volcánicas y en el sur cenizas volcánicas, predominando estas últimas en la precordillera y cordillera de los Andes.

2.2 Diseño y selección de la muestra

La superficie de plantaciones de *E. globulus* y *E. nitens* para el área de estudio alcanza un total de 922.879 hectáreas, distribuidas en 119.886 polígonos³ irregulares. Con el fin de incorporar la variación climática producto de los efectos de la cordillera de la Costa y de Los Andes, se definieron “subregiones productivas” a partir de la intersección entre las regiones administrativas y la clasificación longitudinal de zonas de crecimiento propuesta por Schlatter y Gerding (1995). Dentro de cada subregión, la unidad muestral corresponde a un polígono generado mediante la superposición de una grilla⁴ que contiene información de precipitación y temperatura promedio anual (periodo 2001-2017) y tipo de suelo, con una resolución de 500 x 500 metros, y la cobertura de plantaciones de CONAF⁵. Esto significa que el tamaño máximo de cada polígono es de 25 hectáreas. Este proceso fue realizado con el *software* QGIS v3.40.11 (figura 1).

³ Para fines del presente estudio, polígonos y rodales, serán considerados sinónimos.

⁴ Facilitadas por el proyecto CORFO “Adaptación al cambio climático en la actividad forestal, productividad y reducción de impactos (código 19BP-117312)”.

⁵ <https://ide.minagri.gob.cl/descarga-de-capas-shp/planificacion-catastral/>

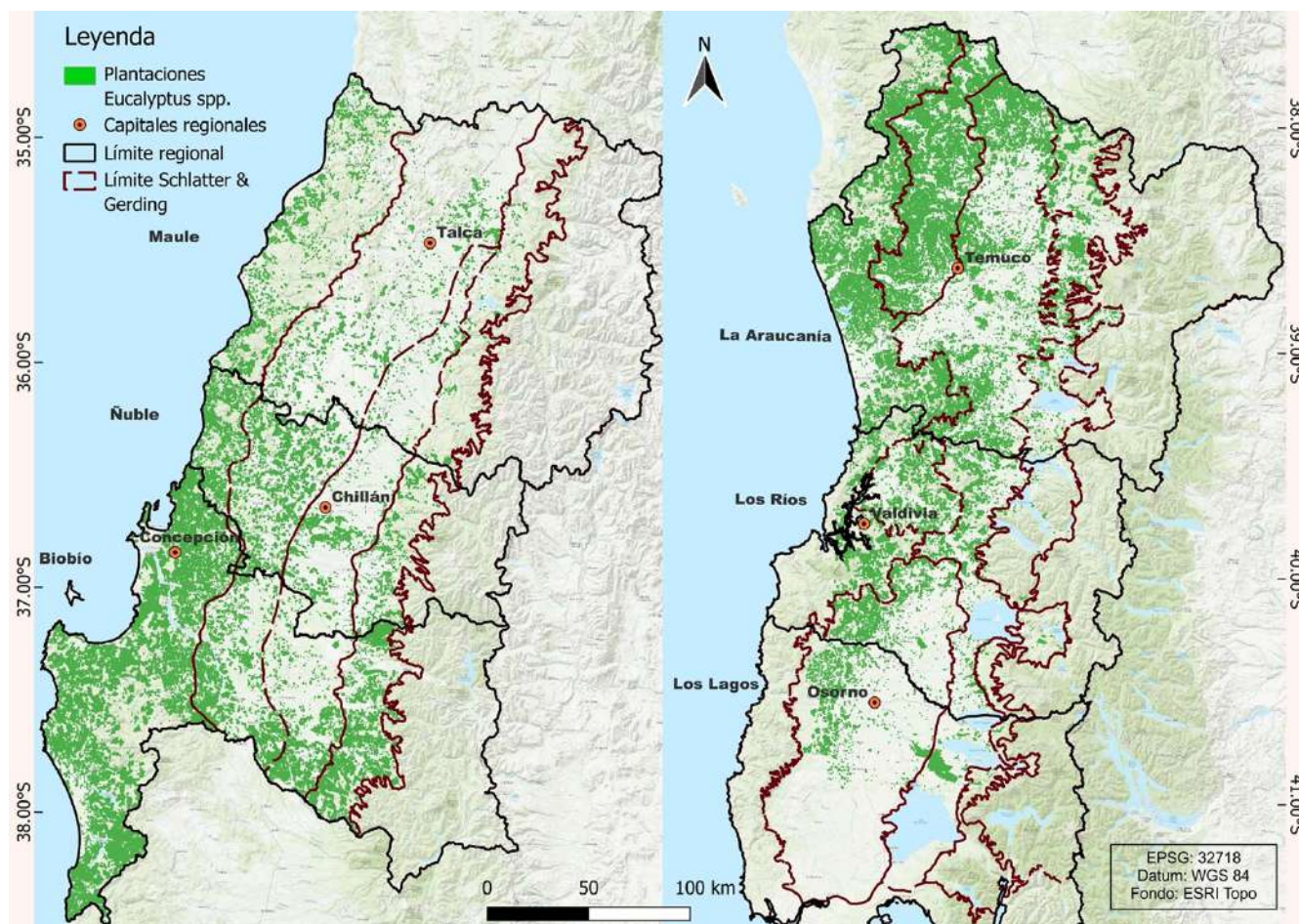


Figura 1. Distribución de las plantaciones de *E. globulus* y *E. nitens* dentro de cada “subregión productiva” (intersección entre límite regional y zonas de crecimiento de Schlatter y Gerding (1995)) en Chile.

Con el objetivo de mejorar la eficiencia estadística, y en vista de que dentro de cada subregión puedan persistir diferencias en términos productivos y de condiciones de sitio, se realizó una estratificación interna utilizando las zonas de crecimiento para *Eucalyptus* spp. del Modelo Nacional de Simulación (MNS)⁶ (ejemplo en anexo 1); la definición de estas zonas son basadas en la productividad a nivel de rodal, medida en función del área basal y, además, permiten incluir de forma indirecta la variabilidad del suelo.

Dado que el objetivo del estudio no es solo describir los rodales más afectados por los incendios, sino que estimar relaciones y efectos entre la edad del rodal, condiciones de sitio, clima y probabilidad de afectación por incendio en toda la distribución de la zona de estudio, la selección aleatoria de polígonos dentro de cada estrato permite reducir el riesgo de sesgos de selección (Angrist y Pischke

⁶ <https://mnssimulacion.cl>

2009) evitando que la muestra quede condicionada por el propio resultado que se busca explicar con el modelo a desarrollar: la probabilidad de afectación por incendio; en el caso contrario, el escenario sería uno de alto riesgo ante incendios forestales, y las estimaciones de los efectos de la edad, del sitio o del clima, representarían tan solo a ese subconjunto de rodales quemados. Además, este procedimiento disminuye la correlación espacial al evitar concentrar observaciones contiguas con casos positivos de afectación por incendio. También, se preserva la heterogeneidad asociada a las condiciones de sitio y posibilita la comparación entre rodales quemados y no quemados. Permite validar la inferencia estadística y facilita el manejo de observaciones para la estimación del modelo en la etapa posterior.

Debido a que el estudio busca incorporar las decisiones de manejo bajo el riesgo de incendio, se utiliza como variable de interés el valor de madera en pie (VMP) para el cálculo del error de muestreo. El VMP refleja diferencias en la productividad del sitio forestal y en los factores económicos asociados al costo de transporte que depende de la distancia de cada polígono a la industria, y el precio de la madera pulpería diferenciada según la región administrativa.

2.3 Estimación del valor de madera en pie

A partir de la información climática y de tipo de suelo asignada a cada polígono, se estimó la altura dominante a la edad clave de 10 años para cada especie, utilizando los modelos desarrollados en el marco del proyecto CORFO “Adaptación al cambio climático en la actividad forestal, productividad y reducción de impactos (código 19BP-117312)”. La fórmula 1 corresponde al modelo para *Eucalyptus globulus* y la fórmula 2 para *Eucalyptus nitens*.

$$H_{ij} = \beta_{0i} \left(\frac{1 - e^{-\beta_1 \cdot E_i}}{1 - e^{-\beta_1 \cdot 10}} \right)^{\beta_{2i}} \quad [1]$$

- $\beta_{0i} = (-138,48) + 0,005177 \cdot PP_Year_i + 3,3169 \cdot W_1 + 2,9392 \cdot W_2 + 24,3619 \cdot Tave_Year_i + (-0,94724) \cdot Tave_Year_i^2 + u_0$
- $\beta_1 = 0,08983$
- $\beta_{2i} = 2,5758 + (-0,1156) \cdot Tave_Year_i + u_2$

Donde PP_Year_i corresponde a la precipitación promedio anual para el periodo 2001-2017; $Tave_Year$ es la temperatura promedio anual para el periodo 2001-2017 y $Tave_Year_i^2$ es la temperatura promedio anual elevada a la segunda potencia para el periodo 2001-2017; $W_1=0$ y $W_2=0$, para suelos graníticos y aluviales; $W_1=0$ y $W_2=1$, para suelos cenizas volcánicas y rojo arcilloso; $W_1=1$ y $W_2=0$, para suelos metamórficos y sedimentos marinos.

$$H_{ij} = \beta_{0i} \left(\frac{1 - e^{-\beta_1 \cdot E_i}}{1 - e^{-\beta_1 \cdot 10}} \right)^{\beta_{2i}} \quad [2]$$

- $\beta_{0i} = (-295,45) + 0,006707 \cdot PP_Year_i + 1,9039 \cdot W_1 + 1,9715 \cdot W_2 + 48,0361 \cdot Tave_Year_i + (-1,8316) \cdot Tave_Year_i^2 + u_0$
- $\beta_1 = 0,1232$
- $\beta_{2i} = 3,3787 + (-0,1602) \cdot Tave_Year_i + u_2$

Donde PP_Year_i corresponde a la precipitación promedio anual para el periodo 2001-2017; $Tave_Year$ es la temperatura promedio anual para el periodo 2001-2017 y $Tave_Year_i^2$ es la temperatura promedio anual elevado a la segunda potencia para el periodo 2001-2017; $W_1=0$ y $W_2=0$, para suelos arenas, ñadi, graníticos y metamórficos (incluido aluvial mixto y aluvial lacustre); $W_1=0$ y $W_2=1$, para rojo arcilloso (incluidos sedimentos marinos); $W_1=1$ y $W_2=0$, para cenizas volcánicas.

En función de la altura dominante, se estimó el volumen en pie ($m^3 ssc ha^{-1}$) para cada especie, con los modelos propuestos por Pinilla *et al.* (2000) (fórmula 5). Las edades de cosecha de referencia utilizadas son basadas en los rangos aplicados por grandes empresas forestales, reportados por Büchner *et al.* (2018). Dado que los modelos de estimación de volumen (Pinilla *et al.* 2000) fueron calibrados para una edad máxima de 13 años (para ambas especies), se determinó una edad de cosecha prescrita de 11 años para *E. globulus* y 13 años para *E. nitens*, considerando en ambos casos una densidad inicial de plantación de 1.250 árboles ha^{-1} . Acorde al procedimiento de Pinilla *et al.* (2000), el volumen se obtuvo a partir de valores estimados de la mortalidad natural (fórmula 3) y el área basal por hectárea (fórmula 4) a la edad de cosecha:

$$N_2 = N_1 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^{0,048} EXP[(-0,015)(t_2 - t_1)] \quad [3]$$

Donde N_1 es el número de árboles por hectárea en t_1 , N_2 es el número de árboles por hectárea en t_2 , t_1 es la edad del rodal en período 1, t_2 es la edad del rodal en período 2. Se utilizó para ambas especies los mismos coeficientes.

$$G = EXP \left[(b_0) + (b_1)H_m + b_2 H_m \left(\frac{1}{E} \right) + (b_3)N_m \left(\frac{1}{E} \right) \right] \quad [4]$$

Donde G es el área basal (m^2/ha), H es la altura dominante para los 100 árboles más gruesos (m), H_m corresponde a $1/(H-1,3)$, N_m corresponde a $100/(N_2^{1/2})$, E es la edad de cosecha (años) y EXP es exponencial con base e . Para *E. globulus*: b_0 es 4,821, b_1 es -21,845, b_2 es 45,569, b_3 es -2,387; para *E. nitens*: b_0 es 4,687, b_1 es -21,513, b_2 es 38,395, b_3 es -1,313.

$$V = G \left[b_0 + b_1 H + \frac{(b_2)(N_2 H)}{G} + (b_3) \left(\frac{1}{H} \right) + b_4 \left(\frac{H}{N_2} \right) \right] \quad [5]$$

V es el volumen para un índice de utilización de 5 cm(m³ssc/ha). Para *E. globulus*: b_0 es 0,318, b_1 es 0,312, b_2 es -0,00022, b_3 es -0,683, b_4 es 2,391; para *E. nitens*: b_0 es 0,225, b_1 es 0,289, b_2 es 0,00014, b_3 es 2,154, b_4 es 9,8996.

El VMP se obtuvo al descontar el costo de cosecha y transporte al valor puesto en planta de ambas especies, para luego multiplicar este resultado por el volumen estimado, esta unidad está expresada en USD⁷ ha⁻¹. Lo precios puesto en planta utilizados corresponden a los declarados por Instituto Forestal (INFOR) en el boletín de precios forestales 2025 (Pardo 2025) para *E. globulus* y *E. nitens* (Cuadro 1).

Cuadro 1. Precio puesto en planta promedio por región por especie (Pardo 2025).

Especie	Región	Precio (CLP)	
		Metro ruma	m ³ ssc
<i>E. globulus</i>	Maule	73.750	46.094
	Ñuble	73.750	46.094
	Biobío	68.017	42.510
	Araucanía	64.900	40.563
	Los Ríos	64.900	40.563
	Los Lagos	64.900	40.563
<i>E. nitens</i>	Maule	62.700	39.188
	Ñuble	62.700	39.188
	Biobío	59.175	36.984
	Araucanía	59.467	37.167
	Los Ríos	59.467	37.167
	Los Lagos	59.467	37.167

1 metro ruma = 1,6 m³ sólidos

Los costos de cosecha y transporte se estimaron a partir de los valores utilizados por Labbé *et al.* (2023): para un volumen medio por árbol (VMA) igual o mayor a 0,5 m³ árbol⁻¹ se estima un costo promedio, para todo el área de estudio, de 10,75 USD m⁻³; para el costo de transporte (cuadro 2) se asumió un 20% de carpeta de ripio desde el predio hasta la industria. Se determinó un costo de transporte promedio de cada rodal dentro de cada subregión hasta la industria más cercana; para esto, se consideraron industrias de celulosa y astilladoras con capacidad de consumo mayor a 100.000 m³

⁷ El valor del dólar utilizado fue de 966,30 CLP y es valor promedio de agosto del 2025: https://www.sii.cl/valores_y_fechas/dolar/dolar2025.htm

(Bañados y Pardo 2025). La distancia fue calculada con el *software* Google Maps⁸ (anexo 2) seleccionando el camino más cercano desde el centroide obtenido a partir de la disolución todos los polígonos de plantaciones dentro de cada subregión.

Cuadro 2. Costos de transporte (Labbé *et al.* 2023).

Costo	Unidades	Valor
Costo fijo	(USD m ⁻³)	0,98
Transporte en pavimento	(USD m ⁻³ km ⁻¹)	0,06
Transporte en ripio	(USD m ⁻³ km ⁻¹)	0,14
Peajes	(USD m ⁻³)	0,26

2.4 Muestreo estratificado aleatorio

Dado que la población se conforma de polígonos de superficie irregular, y con el fin de evitar sub-representar estratos con mayor superficie plantada (o también el caso contrario) mediante una ponderación basada en solo número de polígonos, la asignación muestral en cada estrato se realizó en proporción a la superficie total de plantaciones representada por cada uno de ellos respecto de la superficie total de la subregión (fórmulas 6 y 7). Para esto, se consideró un nivel de significancia del 0,01 y un error máximo admisible del 2,0%. El error de muestreo utilizado tiene como objetivo tener un número suficiente de casos positivos de afectación por incendios para la construcción de un modelo econométrico robusto. Una vez determinado el tamaño de la muestra en cada estrato, las unidades fueron seleccionadas aleatoriamente dentro de este. En función del resultado obtenido, se estimó el error muestral porcentual (fórmula 8) considerando también la diferencia de superficie plantada entre estratos dentro de cada subregión. Las fórmulas utilizadas son adaptadas de Cochran (1977) y operacionalizadas en el *software* estadístico Rstudio 4.5.1.

$$n_i = \frac{\sum_{h=1}^{L_i} \frac{W_{hi}^2 \cdot s_{hi}^2}{w_{hi}}}{V_i + \frac{1}{N_i} \sum_{h=1}^{L_i} W_{hi} \cdot s_{hi}^2}, L_i = \text{número de estratos de la subregión } i \quad [6]$$

⁸ Maps.google.com

Donde N_i corresponde al número total de polígonos de la subregión i ; W_{hi} es el peso poblacional del estrato h en la subregión i , definido como $\left(\frac{A_{hi}}{A_i}\right)$; w_{hi} corresponde a la fracción de muestra asignada al estrato h en la subregión i , que en este caso al aplicar posteriormente una asignación proporcional se tiene que $w_{hi} = W_{hi}$; s_{hi}^2 es la varianza del estrato h en la subregión i ; V_i corresponde a la varianza máxima admisible del estimador estratificado, \bar{y}_{st} , de la media poblacional \bar{Y}_i en la subregión i , con $V_i = \frac{E_i^2}{t^2}$, con $E_i = 0,02 \cdot \bar{Y}_i$, y $t = 2,576$.

$$n_{hi} = W_{hi} \cdot n_i \quad [7]$$

Donde n_i corresponde al tamaño muestral total en la subregión i , y n_{hi} es número de unidades muestrales asignadas al estrato h en la subregión i .

$$E_i(\%) = \frac{t \sqrt{\hat{S}_{\bar{y}_{st},i}^2}}{\bar{y}_{st,i}} \cdot 100 \quad [8]$$

Donde $E_i(\%)$ corresponde al error muestral porcentual de la subregión i ; $\sqrt{\hat{S}_{\bar{y}_{st},i}^2}$ es el error estándar del estimador estratificado (formula 9), $\bar{y}_{st,i}$, de la media poblacional en la subregión i .

$$\hat{S}_{\bar{y}_{st},i}^2 = \sum_{h=1}^{L_i} W_{hi}^2 \cdot \frac{s_{hi}^2}{n_{hi}} \left(1 - \frac{n_{hi}}{N_i}\right) \quad [9]$$

2.5 Estructura de los datos de panel

A partir de la muestra obtenida, se construirá una base de datos con estructura de panel, es decir, con observaciones repetidas para cada polígono a lo largo del tiempo. Esta estructura permite modelar la afectación por incendios forestales como una variable binaria en función de covariables que varían temporalmente, como la edad del rodal y las condiciones climáticas, así como de covariables que se mantienen constantes en el tiempo, tales como atributos del sitio o del paisaje.

Una ventaja importante del uso datos de panel es que permite aprovechar la variación entre polígonos para controlar la heterogeneidad no observada constante en el tiempo a través de una función de control (Wooldridge 2010a). Factores como la condición del suelo, del paisaje o las decisiones de manejo, no son observables o simplemente no son conocidos, sin embargo, son considerados relativamente constantes en el tiempo y suelen estar correlacionados de forma simultánea con las covariables de interés y la variable respuesta (Suri 2011). En estudios basados en datos observacionales,

este tipo de heterogeneidad no observada constituye una fuente potencial de sesgo en la estimación de efectos parciales de la variable de interés y las demás covariables (Angrist y Pischke, 2009).

Sobre esta estructura de datos, la estimación del efecto parcial de la edad del rodal se abordará mediante un modelo probit para datos de panel con efectos aleatorios correlacionados, cuya formulación e identificación se basan en el trabajo realizado por Niklitschek y Labbé (2024).

2.6 Construcción de variables para el modelo econométrico

La variable dependiente corresponde a la afectación por incendio en el rodal durante un periodo determinado, definida como una variable binaria (quemado o no quemado). Las covariables de interés son la edad del rodal, construida a partir del año de establecimiento de la plantación y actualizada temporalmente para cada observación, y el índice de sitio como indicador de productividad del sitio forestal. Las demás covariables de control corresponden a variables climáticas históricas y proyectadas, y espaciales asociados a topografía y accesibilidad. Para incluir la ignición intencional, se determinará como proxy el número de evento violentos por comuna en cada región administrativa. La definición operacional, unidad de medida, nivel de agregación y fuente de cada variable se presentan en el anexo 3.

La variable de afectación por incendio se construirá a partir de la intersección espacial entre la cobertura de plantaciones de la muestra y los registros históricos de áreas quemadas para el período 2000–2017, obtenidos de la base de datos generados por Miranda *et al.* (2022)⁹. Esta base de datos cubre datos de incendios con una superficie mayor a 10 hectáreas durante 1985 a 2018, y la resolución obtenida es de 30 metros. La base de datos presenta una concordancia con los datos de CONAF, en más de un 80% a partir del año 2005.

Con datos de inventario¹², facilitado por las principales empresas forestales, se determinará la edad del rodal a partir del año de plantación; para plantaciones que se encuentren fuera de la propiedad de las empresas, se estimará su edad comparando la textura del dosel a través de imágenes satelitales. El procedimiento específico de asignación de la edad en función de la textura del dosel será desarrollado en la segunda etapa.

Las covariables climáticas serán construidas para cada periodo mediante observación a partir de bases climáticas con una resolución de 500 metros para una grilla¹⁰ con datos mensuales históricos (2001-

⁹ <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.941127>

¹⁰ Facilitadas por el proyecto CORFO “Adaptación al cambio climático en la actividad forestal, productividad y reducción de impactos (código 19BP-117312)”.

2017) (Carrasco *et al.* 2022) y escenarios proyectados de cambio climático provenientes de modelos utilizados en la fase 5 del proyecto de Intercomparación de modelos Acoplados (CMIP5) (Carrasco *et al.* 2022). Estos datos climáticos proyectados también permitirán estimar el índice de sitio bajo escenarios de cambio climático.

2.7 Definición de la probabilidad de afectación por incendio

Acorde a la formulación de Reed (2006) la probabilidad de quema de un punto, en este caso un polígono, depende de que exista o se inicie un incendio en el entorno circundante y de que este se propague hacia tal punto. Esta formulación señala que la probabilidad de quema de un polígono no depende solo de sus características propias, sino también de un proceso espacial más amplio de ignición y propagación, no obstante, dicho proceso no está completamente observado, por lo que parte de este es absorbido por la heterogeneidad no observada. El desarrollo de esta formulación se expresa en el anexo 4.

2.8 Modelo econométrico

Siguiendo la formulación de Labbé y Niklitschek (2024), y utilizando la aproximación de función de control como estrategia identificación¹¹ (Blundell y Powell 2004), la variable respuesta binaria de afectación por incendio, con heterogeneidad no observada, será modelada a través de datos de panel con un índice lineal paramétrico. Una formulación resumida del modelo se presenta en el anexo 5, la cual será desarrollada en detalle y aplicada en la segunda etapa del presente estudio.

3. RESULTADOS PRELIMINARES

El tamaño de la muestra está compuesto por 4.288 polígonos equivalente a 30.299 hectáreas de plantaciones de *Eucalyptus* spp. (cuadro 3). La distribución de la muestra es heterogénea entre regiones y subregiones, lo cual es coherente con la estructura espacial de la población, caracterizada por diferencias en superficie plantada, productividad de sitio, distancia a la industria y precios de madera

¹¹ Es la manera en que un investigador utiliza datos observacionales (es decir, datos no generados por un ensayo aleatorizado) para aproximarse a un experimento real (Angrist y Krueger 1999).

pulpable. Como resultado, la utilización del VMP permite reflejar la heterogeneidad de la rentabilidad de las plantaciones de *Eucalyptus* spp. en el área de estudio. El error de muestreo posee un rango entre 1,70 y 2,26% (promedio 2,02%).

Respecto a los incendios forestales, el tamaño muestral contiene 1.046 polígonos quemados en algún año durante el período 2000–2017 y 3.242 polígonos sin incendios durante el mismo periodo. Para efecto de la etapa posterior, la construcción y estimación del modelo econométrico, este resultado es relevante ya que se cumpliría y superaría la cantidad mínima necesaria de observaciones en cada categoría, para modelos categóricos, descartando problemas de estimación por eventos raros (King y Zeng 2001).

Cuadro 3. Parámetros de la población y tamaño de la muestra obtenida.

Región	Población				Muestra				
	Nº pol.	Sup. plant. (ha)	Nº est.	VMP (USD ha ⁻¹)*	Nº pol.	Sup. (ha)	VMP (USD ha ⁻¹)*	EM (%)*	IF (2000-17)
Maule	10.847	64.434		4.772	928	5.166	5.277	1,87	342
Costa	5.135	30.437	2	4.653	144	866	4.701	1,81	164
Sec. interior.	4.167	25.873	3	4.433	340	2.100	4.425	1,93	145
Dep. interm.	893	4.587	2	5.692	275	1.304	5.775	1,87	27
Prec. andina	652	3.536	1	7.073	169	896	7.108	2,03	6
Ñuble	13.202	98.156		7.774	545	4.160	7.793	1,97	200
Costa	3.226	22.626	2	7.419	153	1.100	7.377	1,96	99
Sec. interior.	5.643	43.936	2	7.099	204	1.585	7.073	1,93	63
Dep. interm.	2.488	19.527	2	8.583	127	1.059	8.577	2,12	32
Prec. andina	1.845	12.066	1	9.591	61	416	9.637	1,89	6
Biobío	35.672	318.912		7.921	781	7.202	7.847	1,96	319
Costa	22.184	199.000	2	7.824	287	2.577	7.808	2,00	179
Sec. interior.	4.962	41.783	1	6.917	223	1.987	7.044	2,05	69
Dep. interm.	3.260	29.266	2	8.028	174	1.738	8.115	1,99	65
Prec. andina	5.266	48.863	2	9.111	97	900	9.208	1,70	6
Auracanía	43.212	333.862		5.887	875	6.775	5.749	2,13	175
Costa	14.175	101.494	4	4.701	295	2.130	4.636	2,26	27
Sec. interior.	11.831	108.334	4	6.459	176	1.555	6.496	2,04	60
Dep. interm.	12.829	90.565	3	6.496	118	920	6.583	2,12	84
Prec. andina	4.377	33.469	2	5.984	286	2.170	5.953	2,05	4
Los Ríos	12.937	84.503		7.890	598	3.574	7.717	2,00	7
Costa	3.283	23.596	2	8.728	144	1.044	8.732	1,83	3
Sec. interior.	5.962	39.762	2	7.211	115	803	7.133	2,13	3
Dep. inter.	3.158	18.715	2	8.434	105	704	8.469	1,95	1
Prec. andina	534	2.430	2	6.660	234	1.022	6.621	1,84	0
Los Lagos	4.016	23.012		6.802	561	3.421	6.416	2,00	3
Sec. interior	3.168	15.247	1	7.280	288	1.220	7.303	1,99	3
Dep. interm.	750	7.432	1	5.828	189	1.916	5.824	2,02	0
Prec. andina	98	333	1	6.664	84	285	6.597	1,95	0
Total	119.886	922.879	–	6.919	4.288	30.299	6.755	2,02	1.046

Donde Sup.: superficie; pol.: polígonos; est.: estratos; VMP: valor de madera en pie; EM: error muestral; IF: incendios forestales; Sec. interior.: secano interior; Dep. interm.:depresión intermedia; Prec. andina.: precordillera andina; (*): valores en negrita representan promedios ponderados respecto de la superficie.

4. CONCLUSIONES PRELIMINARES

A partir de los resultados obtenidos se concluye que:

- Al igual que la estructura de la población, la distribución de la muestra es heterogénea entre regiones y subregiones.
- La utilización del VMP permite reflejar la heterogeneidad de la rentabilidad de las plantaciones de *Eucalyptus* spp. en el área de estudio.
- El error de muestreo estuvo en un rango entre 1,70 y 2,26% (promedio 2,02%).
- El número de casos positivos (1.046 polígonos quemados) de afectación por incendios en la muestra permite descartar errores de estimación por eventos raros.
- La muestra permitirá desarrollar un modelo econométrico robusto en términos de la representatividad espacial de las plantaciones de *Eucalyptus* spp. dentro del área de estudio.

5. REFERENCIAS

- Abrevaya J, Y-C Hsu. 2021. Partial effects in non-linear panel data models with correlated random effects. *The Econometrics Journal* 24(3):519-535. <https://doi.org/10.1093/ectj/utab004>
- Altonji JG, RL Matzkin. 2005. Cross Section and Panel Data Estimators for Nonseparable Models with Endogenous Regressors. *Econometrica* 73(4):1053-1102. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0262.2005.00609.x>
- Amacher GS, AS Malik, RG Haight. 2005. Not Getting Burned: The Importance of Fire Prevention in Forest Management. *Land Economics* 81(2):284-302. <https://doi.org/10.3368/le.81.2.284>
- Angrist JD, AB Krueger. 1999. Empirical strategies in labor economics. In Ashenfelter O, D Card eds. Handbook of labor economics. Vol. 3, Part A. Elsevier. p. 1277-1366. [https://doi.org/10.1016/S1573-4463\(99\)03004-7](https://doi.org/10.1016/S1573-4463(99)03004-7)
- Angrist JD, J-S Pischke. 2009. Mostly Harmless Econometrics: An Empiricist's Companion. Princeton University. 373 p.
- Araya-Osses D, A Casanueva, C Román-Figueroa, JM Uribe, M Paneque. 2020. Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Climate Dynamics* 54(9-10):4309-4330. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05231-4>
- Bañados Munita JC, E Pardo Velásquez. 2025. Directorio de la Industria Forestal Chilena 2025. Instituto Forestal, Chile. 156 p.

- Blundell RW, JL Powell. 2004. Endogeneity in Semiparametric Binary Response Models. *Review of Economic Studies* 71(3):655-679 <https://doi.org/10.1111/j.1467-937X.2004.00299.x>
- Botequim B, J Garcia-Gonzalo, S Marques, A Ricardo, J Borges, M Tomé, M Oliveira. 2013. Developing wildfire risk probability models for *Eucalyptus globulus* stands in Portugal. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 6(4):217-227. <https://doi.org/10.3832/ifor0821-006>
- Brodie EG, EE Knapp, WR Brooks, SA Drury, MW Ritchie. 2024. Forest thinning and prescribed burning treatments reduce wildfire severity and buffer the impacts of severe fire weather. *Fire Ecology* 20(1):17. <https://doi.org/10.1186/s42408-023-00241-z>
- Büchner C, M Martin, R Sagardia, A Ávila, E Molina, Y Rojas, JC Muñoz, S Barros, J Rose, M Barrientos, L Barrales, R Guiñez. 2018. Disponibilidad de Madera de Plantaciones de *Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens* 2017-2047. Instituto Forestal, Chile. Informe Técnico N° 220. 123 p.
- Carrasco G, AC Almeida, M Falvey, GF Olmedo, P Taylor, F Santibañez, NC Coops. 2022. Effects of climate change on forest plantation productivity in Chile. *Global Change Biology* 28(24):7391-7409. <https://doi.org/10.1111/gcb.16418>
- Carrasco-Escaff T, R Garreaud, D Bozkurt, M Jacques-Coper, A Pauchard. 2024. The key role of extreme weather and climate change in the occurrence of exceptional fire seasons in south central Chile. *Weather and Climate Extremes* 45:100716. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2024.100716>
- Ciocca I, A Fernández, E Jaque, F Justino, V Shumacher, AS Da Silva, A Muñoz, F De La Barrera. 2023. Increased wildfire hazard along South-Central Chile under the RCP8.5 scenario as revealed by high-resolution modeling. *Environmental Research Letters* 18(3):034023. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acba33>
- Cochran WG. 1977. Sampling Techniques. 3rd ed. New York, USA. John Wiley & Sons. 428 p.
- CONAF (Corporación Nacional Forestal, CL). 2024. Ocurrencia y daño histórico nacional, 1985-2024. Conjunto de datos. Disponible en: <https://www.conaf.cl/centro-documentals/estadisticas-historicas/> (Consulta 1 nov. 2025).
- Cordero RR, S Feron, A Damiani, J Carrasco, C Karas, C Wang, CT Kraamwinkel, A Beaulieu. 2024. Extreme fire weather in Chile driven by climate change and El Niño-Southern Oscillation (ENSO). *Scientific Reports* 14(1):1974. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52481-x>
- Corporación Nacional Forestal (CONAF). 2022. Manual de buenas prácticas en medidas de prevención y mitigación contra incendios forestales con énfasis en el ciclo productivo forestal: Silvicultura preventiva. 113 p.

- Costafreda-Aumedes S, C Comas, C Vega-García. 2017. Human-caused fire occurrence modelling in perspective: a review. *International Journal of Wildland Fire* 26:983-998. <https://doi.org/10.1071/WF17026>
- Faustmann, M. 1849. Calculation of the Value Which Forest Land and Immature Stands Possess for Forestry. *Allgemeine Forstund Jagdzeitung*, 15, 441-55.
- Feron S, RR Cordero, A Damiani, PJ Llanillo, J Jorquera, E Sepulveda, V Asencio, D Laroze, F Labbe, J Carrasco, G Torres. 2019. Observations and Projections of Heat Waves in South America. *Scientific Reports* 9(1):8173. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44614-4>
- Ferreira L, M Constantino, JG Borges. 2014. A stochastic approach to optimize Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) stand management scheduling under fire risk. An application in Portugal. *Annals of Operations Research* 219:359-377. <https://doi.org/10.1007/s10479-011-0845-z>
- Ferreira L, MF Constantino, JG Borges, J Garcia-Gonzalo. 2012. A stochastic dynamic programming approach to optimize short-rotation coppice systems management scheduling: An application to Eucalypt plantations under wildfire risk in Portugal. *Forest Science* 58(4):353 - 365. <https://doi.org/10.5849/forsci.10-084>
- Gajardo J, M Yáñez, R Padilla, S Espinoza, M Carrasco-Benavides. 2025. Modeling the Spatial Distribution of Wildfire Risk in Chile Under Current and Future Climate Scenarios. *Fire* 8(3):113. <https://doi.org/10.3390/fire8030113>
- Gannon B, Y Wei, E Belval, J Young, M Thompson, C O'Connor, D Calkin, C Dunn. 2023. A Quantitative Analysis of Fuel Break Effectiveness Drivers in Southern California National Forests. *Fire* 6(3):104. <https://doi.org/10.3390/fire6030104>
- Garreaud RD, C Alvarez-Garreton, J Barichivich, JP Boisier, D Christie, M Galleguillos, C LeQuesne, J McPhee, M Zambrano-Bigiarini. 2017. The 2010-2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences* 21(12):6307-6327. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>
- Garreaud RD, JP Boisier, R Rondanelli, A Montecinos, HH Sepúlveda, D Veloso-Aguila. 2020. The Central Chile Mega Drought (2010-2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology* 40(1):421-439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- González JR, M Palahí, A Trasobares, T Pukkala. 2006. A fire probability model for forest stands in Catalonia (north-east Spain). *Annals of Forest Science* 63(2):169-176. <https://doi.org/10.1051/forest:2005109>

- González ME, R Sapiains, S Gómez-González, R Garreaud, A Miranda, M Galleguillos, M Jacques, A Pauchard, J Hoyos, L Cordero, F Vásquez, A Lara, P Aldunce, V Delgado, AM Arriagada Ugarte, A Sepúlveda, L Fariás, R García, RJ Rondanelli, R Ponce, F Vargas, M Rojas, JP Boisier, C Carrasco, C Little, M Osses, C Zamorano, I Díaz-Hormazábal, A Ceballos, E Guerra, M Moncada, I Castillo. 2020. Incendios forestales en Chile: causas, impactos y resiliencia. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, Universidad de Chile, Universidad de Concepción y Universidad Austral de Chile. 80 p.
- González ME, S Gómez-González, A Lara, R Garreaud, I Díaz-Hormazábal. 2018. The 2010-2015 Megadrought and its influence on the fire regime in central and south-central Chile. *Ecosphere* 9(8):e02300. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2300>
- Holz A, T Kitzberger, J Paritsis, TT Veblen. 2012. Ecological and climatic controls of modern wildfire activity patterns across southwestern South America. *Ecosphere* 3(11):1-25. <https://doi.org/10.1890/ES12-00234.1>
- Jones MW, JT Abatzoglou, S Veraverbeke, N Andela, G Lasslop, M Forkel, AJP Smith, C Burton, RA Betts, GR Van Der Werf, S Stich, JG Canadell, C Santín, C Kolden, SH Doerr, C Le Quéré. 2022. Global and Regional Trends and Drivers of Fire Under Climate Change. *Reviews of Geophysics* 60(3):e2020RG000726. <https://doi.org/10.1029/2020RG000726>
- Kampf SK, CS Stevens-Rumann, L Nunes, AC Sequeira, FC Rego, C Fernández, A Hernández-Duarte, CE Mosso, JP Francois, A Miranda. 2025. Fire, Fuel, and Climate Interactions in Temperate Climates. *AGU Advances* 6(2): e2024AV001628. <https://doi.org/10.1029/2024AV001628>
- King G, L Zeng. 2001. Logistic Regression in Rare Events Data. *Political Analysis* 9(2):137-163. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pan.a004868>
- Labbé R, M Niklitschek, M Contreras. 2023. Effect of climate change on the land rent of radiata pine plantations in Chile: Site productivity and forest fires. *Forest Policy and Economics* 156:103068. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2023.103068>
- Marques S, J Garcia-Gonzalo, B Botequim, A Ricardo, JG Borges, M Tomé, MM Oliveira. 2012. Assessing wildfire occurrence probability in *Pinus pinaster* Ait. stands in Portugal. *Forest Systems* 21(1):111-120. <https://doi.org/10.5424/fs/2112211-11374>
- McWethy DB, RD Garreaud, A Holz, GT Pederson. 2021. Broad-Scale Surface and Atmospheric Conditions during Large Fires in South-Central Chile. *Fire* 4(2):28. <https://doi.org/10.3390/fire4020028>

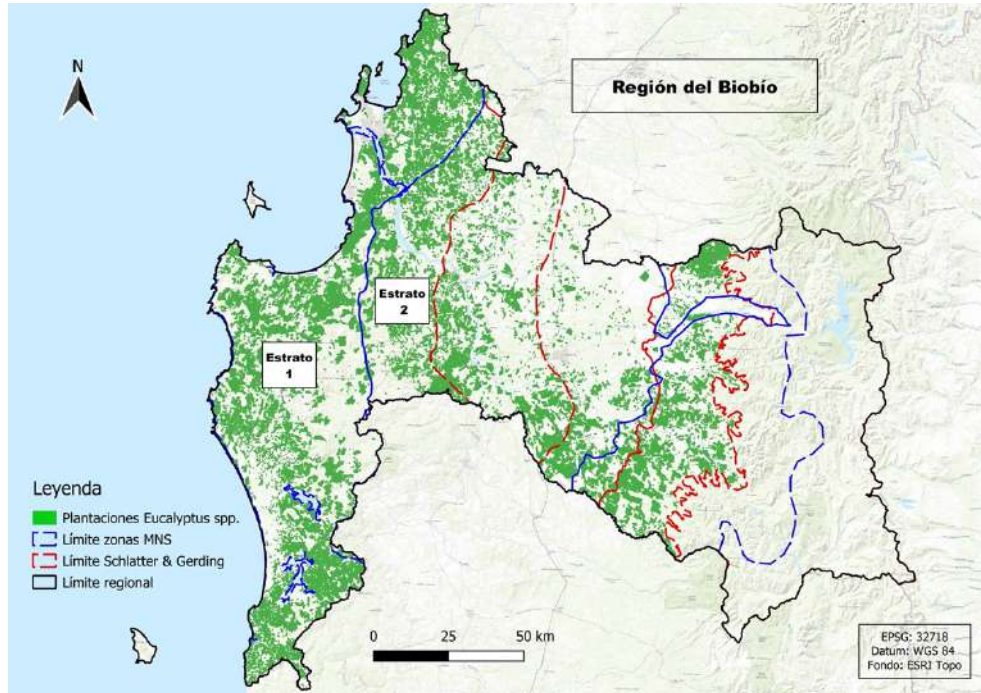
- Miranda A, R Mentler, Í Moletto-Lobos, G Alfaro, L Aliaga, D Balbontín, M Barraza, S Baumbach, P Calderón, F Cárdenas, Í Castillo, G Contreras, F de la Barra, M Galleguillos, ME González, C Hormazábal, A Lara, I Mancilla, F Muñoz, C Oyarce, F Pantoja, R Ramírez, V Urrutia. 2022. The Landscape Fire Scars Database: Mapping historical burned area and fire severity in Chile. *Earth System Science Data* 14(8):3599-3613. <https://doi.org/10.5194/essd-14-3599-2022>
- Niklitschek M, R Labbé, RM Alzamora, R Rubilar, F Droppelmann, G Trincado, N Almonacid. 2024. Estrategia de adaptación al cambio climático en plantaciones de *Pinus radiata*: Una guía para la toma de decisiones. Universidad Austral de Chile; Corporación Nacional Forestal (CONAF); Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). 68 p.
- Niklitschek M, R Labbé. 2024. Modeling stand fire probabilities with unobserved heterogeneity. Estimating stand age and climate change effects in Chilean radiata pine plantations. *Canadian Journal of Forest Research* 55:1-21. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2024-0082>
- Oliveira TM, AMG Barros, AA Ager, PM Fernandes. 2016. Assessing the effect of a fuel break network to reduce burnt area and wildfire risk transmission. *International Journal of Wildland Fire* 25:619-632. <https://doi.org/10.1071/WF15146>
- Ortega M, FRY Silva, JR Molina. 2024. Modeling fuel break effectiveness in southern Spain wildfires. *Fire Ecology* 20(1):40. <https://doi.org/10.1186/s42408-024-00270-2>
- Papke LE, JM Wooldridge. 2008. Panel data methods for fractional response variables with an application to test pass rates. *Journal of Econometrics* 145(1-2):121-133. <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2008.05.009>
- Pardo Velásquez E. 2025. Precios Forestales. Instituto Forestal, Chile. Boletín N° 194. 34 p.
- Pinilla JC, M Ferrando, C Bahamóndez, M Martín. 2000. Modelo de crecimiento para eucalipto en Chile: Avances de investigación. Instituto Forestal (INFOR). Informe Técnico N° 148. 29 p.
- Poblete Hernández P, JC Bañados Munita, J Gysling Caselli, C Kahler González, E Pardo Velásquez, D Baeza Rocha, L Catelicán Vera, J Hernández Pineda, B Celis Cantillana, H Troncoso Recabarren. 2025. Anuario Forestal 2025. Instituto Forestal, Chile. Boletín Estadístico N° 207. 278 p.
- Reed WJ. 1984. The Effects of the Risk of Fire on the Optimal Rotation of a Forest. *Journal of Environmental Economics and Management* 11(2):180-190. [https://doi.org/10.1016/0095-0696\(84\)90016-0](https://doi.org/10.1016/0095-0696(84)90016-0)
- Reed WJ. 1987. Protecting a Forest Against Fire: Optimal Protection Patterns and Harvest Policies. *Natural Resource Modeling* 2(1):23-53. <https://doi.org/10.1111/j.1939-7445.1987.tb00025.x>

- Reed WJ. 2006. A note on fire frequency concepts and definitions. *Canadian Journal of Forest Research* 36(7):1884-1888. <https://doi.org/10.1139/x06-096>
- Schlatter JE, V Gerding, H Huber. 1995. Sistema de Ordenamiento de la Tierra. Herramienta para la planificación forestal aplicada a la X Región. Serie Técnica. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 110 p.
- Schlatter JE, V Gerding, J Adriazola. 1994. Sistema de Ordenamiento de la Tierra. Herramienta para la planificación forestal, aplicada a las regiones VII, VIII y IX. Serie Técnica. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 114 p.
- Schlatter JE, V Gerding. 1995. Método de clasificación de sitios para la producción forestal, ejemplo en Chile. *Bosque* 16(2):13-20. <https://doi.org/10.4206/bosque.1995.v16n2-02>
- Suri T. 2011. Selection and comparative advantage in technology adoption. *Econometrica* 79(1):159-209. <https://doi.org/10.3982/ECTA7749>
- Syphard AD, JE Keeley, TJ Brennan. 2011a. Factors affecting fuel break effectiveness in the control of large fires on the Los Padres National Forest, California. *International Journal of Wildland Fire* 20(6):764-775. <https://doi.org/10.1071/WF10065>
- Syphard AD, JE Keeley, TJ Brennan. 2011b. Comparing the role of fuel breaks across southern California national forests. *Forest Ecology and Management* 261(11):2038-2048. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.02.030>
- Urrutia-Jalabert R, ME González, Á González-Reyes, A Lara, R Garreaud. 2018. Climate variability and forest fires in central and south-central Chile. *Ecosphere* 9(4):e02171. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2171>
- Van Vuuren DP, J Edmonds, M Kainuma, K Riahi, A Thomson, K Hibbard, GC Hurtt, T Kram, V Krey, J-F Lamarque, T Masui, M Meinshausen, N Nakicenovic, SJ Smith, SK Rose. 2011. The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change* 109(1-2):5-31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Viale M, R Garreaud. 2015. Orographic effects of the subtropical and extratropical Andes on upwind precipitating clouds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 120(10):4962-4974. <https://doi.org/10.1002/2014JD023014>
- Wooldridge JM. 2010a. Introducción a la econometría: Un enfoque moderno. 4a ed. Cengage Learning Editores. Traducción de M del C E Hano Roa y É M Jasso Hernan D'Borneville. Obra original publicada en 2009. 865 p.

Wooldridge JM. 2010b. Econometric analysis of cross section and panel data. 2nd ed. Cambridge, Mass., London. MIT. 1064 p.

ANEXOS

Anexo 1. Ejemplo de cruce entre límites y estratos para el proceso de estimación de la muestra



Anexo 2. Distancia promedio de los polígonos cada subregión a la industria más cercana.

Región	Zona longitudinal	Industria	
		Nombre	Distancia (km)
Maule	Costa	Celulosa Arauco y Constitución S.A. (Planta Nueva Aldea)	226,0
	Sec. interior.	Celulosa Arauco y Constitución S.A. (Planta Nueva Aldea)	171,0
	Dep. interm.	Celulosa Arauco y Constitución S.A. (Planta Nueva Aldea)	137,0
	Prec. andina	Celulosa Arauco y Constitución S.A. (Planta Nueva Aldea)	167,0
Ñuble	Costa	Celulosa Arauco y Constitución S.A. (Planta Nueva Aldea)	68,8
	Sec. interior.	Celulosa Arauco y Constitución S.A. (Planta Nueva Aldea)	59,0
	Dep. interm.	Celulosa Arauco y Constitución S.A. (Planta Nueva Aldea)	53,7
	Prec. andina	Celulosa Arauco y Constitución S.A. (Planta Nueva Aldea)	93,1
Biobío	Costa	Celulosa Arauco y Constitución S.A. (Planta Arauco I y II)	60,4
	Sec. interior.	CMPC Pulp S.A. (Planta Santa Fé)	31,9
	Dep. interm.	Fullgreen	45,9
	Prec. andina	Fullgreen	69,9
Araucanía	Costa	Bosques Cautín	162,0
	Sec. interior.	Bosques Cautín	45,4
	Dep. interm.	Bosques Cautín	111,0
	Prec. andina	Bosques Cautín	144,0
Los Ríos	Costa	Celulosa Arauco y Constitución S.A. (Planta Valdivia)	56,6
	Sec. interior.	Celulosa Arauco y Constitución S.A. (Planta Valdivia)	93,8
	Dep. interm.	Celulosa Arauco y Constitución S.A. (Planta Valdivia)	70,9
	Prec. andina	Celulosa Arauco y Constitución S.A. (Planta Valdivia)	132
Los Lagos	Costa	Biomasa Salinas y Waeger SPA	81,4
	Sec. interior.	Biomasa Salinas y Waeger SPA	33,4
	Dep. interm.	Biomasa Salinas y Waeger SPA	72,1

Donde Sec. interior.: Secano Interior; Dep. interm.:Depresión Intermedia; Prec. andina.: Precordillera Andina

Anexo 3. Tipo de variables para la estimación del modelo econométrico.

Variables	Tipo de variable	Unidad/Categoría	Nivel	Fuente
Afectación por IF temporada 2000-17	Respuesta	Afectación por incendio Quemado No quemado	Polígono	Miranda <i>et al</i> (2022)
-T° media del trimestre más seco en el año en curso -T° media del trimestre más húmedo en el año anterior- Precipitación del trimestre más seco en el año en curso y en los tres años anteriores	Control no constante	Grados Celsius Milímetros	Polígono	Carrasco <i>et al</i> (2022) y Proyecto CORFO*
-Edad de la plantación	Control de interés	Años		
-Índice de sitio (promedio por período)	Control de interés, no constante por periodos	Altura media (metros) de los 100 árboles más grandes por hectárea del rodal a la edad de 10 años. Período de referencia (1990-2010) 1ª rotación hasta el presente (2021-2033) 2ª rotación hasta el presente (2034-2045) 3ª rotación hasta el presente (2046-2057) 4ª rotación hasta el presente (2058-2069)	Polígono	Empresas Forestales Proyecto CORFO*
-Distancia a carreteras -Distancia a ferrocarriles -Distancia a la interfaz bosque-urbano -Elevación -Pendiente -Orientación	Control constante	Metros Metros Metros sobre el nivel del mar Porcentaje Exposición sur Otras exposiciones	Polígono	GIS y mapas digitales de mapoteca BCN ¹²
-Eventos violentos durante 2013-22	Control no constante	Número de eventos	Municipio	Multigremial Araucanía ¹³

*Adaptación al cambio climático en la actividad forestal, productividad y reducción de impactos (código 19BP-117312)

¹² https://www.bcn.cl/siit/mapas_vectoriales/index.html

¹³ <https://multigremialaraucania.cl/barometro-de-conflictos/>

Anexo 4. Formulación de probabilidad de afectación por incendio (Reed 2006)

$$p(y_{it} = 1|x_{it}) = p(y_{jt} = 1|y_{it} = 1, x_{it}) \cdot p(y_{jt} = 1|x_{jt}) \quad [1]$$

Donde $p(y_{it} = 1|x_{it})$ corresponde a la probabilidad de que el polígono, con x_{it} características, se incendie, $p(y_{jt} = 1|y_{it} = 1, x_{it})$ es la probabilidad de que i se incendie dado que hubo una ignición en el área contigua más amplia, y $p(y_{jt} = 1|x_{jt})$ es la probabilidad de que esa ignición ocurra en esa área contigua, siendo x_{jt} el vector de variables asociadas con la susceptibilidad a la primera fuente de ignición.

Anexo 5. Formulación de modelo econométrico (Labbé y Niklitschek 2024)

$$y_{it} = 1[x_{it}\beta + c_i + u_{it}] \quad [2]$$

Donde β es el vector de parámetros asociado a las características del polígono x_{it} , c_i es un escalar que representa la heterogeneidad no observada constante en el tiempo, y u_{it} es la perturbación idiosincrática. Acorde a Wooldridge (2010b, p. 615), en la formulación de Mundlak del modelo de correlación de efectos aleatorios (CRE, por sus siglas en inglés), la heterogeneidad no observada c_i puede formularse paramétricamente como:

$$c_i = \psi + \bar{x}_i\xi + v_i \quad [3]$$

Al sustituir la ecuación 3 en la ecuación 4, y bajo el supuesto de normalidad para v_i y u_{it} , la probabilidad de observar un incendio en el punto " i " en la temporada " t " puede ser representado por:

$$p(y_{it} = 1|x_{it}) = \Phi(\psi + x_{it}^c\beta_c + x_{it}^p\beta_{01} + x_i^r\beta_{02} + \bar{x}_i\xi) \quad [4]$$

Donde y_{it} es igual a uno si ocurre un incendio e igual a cero si no ocurre, $\Phi(\cdot)$ denota la función de distribución acumulada normal. Los vectores x_{it}^c representan las variables climáticas, x_{it}^p la edad del rodal (la covariable principal de interés con variabilidad temporal), y x_i^r corresponde al vector de controles sin variación temporal. El promedio en el tiempo de las covariables que varían temporalmente es $\bar{x}_i = \frac{\sum_1^T x_{it}}{T}$; los parámetros que se estimarán son ψ , β_c , β_{01} , β_{02} , ξ . Además, se incluirán en la

estimación las variables climáticas rezagadas (x_{it-1}^c y x_{it-2}^c), términos cuadráticos y de interacción, así como también términos no lineales para la edad del rodal, el índice de sitio y las covariables antrópicas.

A partir de la ecuación 4, y siguiendo a Papke y Wooldridge (2008), se obtendrá la función estructural promedio (ASF, por sus siglas en inglés) para todos los períodos de tiempo como:

$$ASF(x^{po}) = NT^{-1} \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \Phi(\psi + x_{it}^c \beta_c + x_{it}^{po} \beta_{01} + x_i^r \beta_{02} + \bar{x}_i \xi) \cdot W_i \quad [5]$$

Donde x^{po} corresponde a un valor arbitrario de la covariable principal de interés, es decir, la edad del rodal. El tamaño heterogéneo de los polígonos será considerado con una ponderación dada por $W_i = \frac{a_i}{\bar{a}}$, donde a_i es el área del polígono i y \bar{a} el área promedio de los polígonos. L

La función estructural promedio local (ASFL, por sus siglas en inglés) (Altonji y Matzkin 2005) para la edad del rodal:

$$LASF(x^{po}) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \Phi(\psi + x_{it}^c \hat{\beta}_c + x_{it}^p \hat{\beta}_{01} + x_i^r \hat{\beta}_{02} + \bar{x}_i \hat{\xi}) \cdot W_i \cdot K\left(\frac{x_{it}^p - x^{po}}{h_t}\right)}{\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T K\left(\frac{x_{it}^p - x^{po}}{h_t}\right)} \quad [6]$$

Donde $K(\cdot)$ corresponde a la función *kernel* de Epanechnikov. Acorde a abreviación de Abrevaya y Hsu (2021): $K(x_t^p) = \frac{3}{4} \left(1 - \frac{(x_{it}^p - x^{po})^2}{h_t^2}\right)$, donde $h_t = 2.34 \hat{\sigma}_{x_t^p} N^{-0.2}$ y $\hat{\sigma}_{x_t^p}$ son, el ancho de banda y desviación estándar muestral, respectivamente; un mayor ancho de banda entrega mayores ponderaciones a los polígonos con una edad del rodal más alejada del valor seleccionado que se evalúa.

La derivada parcial de las ecuaciones 5 y 6, permiten obtener el efecto parcial promedio condicional (CAPE, por sus siglas en inglés) y la respuesta local promedio condicional (CALR, por sus siglas en inglés) (Abrevaya y Hsu 2021).

El efecto parcial promedio (APE, por sus siglas en inglés) del cambio climático sobre el área quemada por periodo proyectado, se estima como la diferencia entre las ASF evaluadas bajo los distintos escenarios, expandidas a la población de cada subregión:

$$APE_{BA_j} = \sum_{h=1}^H g_h \sum_{i=1}^{n_h} \frac{a_i}{T_j} \sum_{t=1}^{T_j} \cdot [\Phi(\psi + x_{it}^{c1} \hat{\beta}_c + x_{it}^{r1} \hat{\beta}_{r1} + x_{it}^{p1} \hat{\beta}_p + x_i^r \hat{\beta}_{r2} + \bar{x}_i \hat{\xi}) - \Phi(\psi + x_{it}^{c0} \hat{\beta}_c + x_i^{r0} \hat{\beta}_{r1} + x_{it}^{p0} \hat{\beta}_p + x_i^r \hat{\beta}_{r2} + \bar{x}_i \hat{\xi})] \quad [7]$$

Donde x_{it}^{c1} y x_{it}^{c0} corresponden al vector de covariables climáticas en un año proyectado del periodo j , de duración T_j con (“1”) y sin (“0”) cambio climático, respectivamente. De igual manera, x_{it}^{p1} y x_{it}^{p0} son

los cambios en la edad del rodal, y x_{it}^{r1} y x_i^{r0} , los cambios en el índice de sitio. El vector de covariables no climáticas que se mantiene constante es x_i^r ; a_i es el área del polígono i , g_h es el inverso de la fracción de área muestreada del estrato h , y H es el número de estratos en una subregión.