



Universidad de Concepción
Facultad de Ciencias Ambientales
Ingeniería Ambiental

**Megaincendios en Chile: entendiendo los factores de un fenómeno
abrumador.**

Habilitación presentada para optar al título de
Ingeniero Ambiental

Aníbal Ignacio Pardo Herrera

Profesor Guía:

Mg. Jorge Féliz Bernal

CONCEPCION (Chile), 2026



Megaincendios en Chile: entendiendo los factores de un fenómeno abrumador.

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniero Ambiental

Alumno: Aníbal Ignacio Pardo Herrera

Profesores Guía: Mg. Jorge Fález Bernal

Dr. Mauricio Aguayo Arias

Comisión evaluadora: Dr. Alberto Araneda Castillo

Dr. Francisco de la Barrera Melgarejo

CONCEPCION (Chile), 2026

**“MEGAINCENDIOS EN CHILE: ENTENDIENDO LOS FACTORES DE UN
FENÓMENO ABRUMADOR”**

Profesor Guía: Ms. Jorge Félez Bernal



Profesor Guía: Dr. Mauricio Aguayo Arias



Profesor Comisión: Dr. Alberto Araneda Castillo



Profesor Comisión: Dr. Francisco De La Barrera Melgarejo



CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad: (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, diciembre 2026

Por el desarrollo libre del espíritu

Decanato: Casilla 160 C - Correo 3 - Fono (56-41) 204002 - Ciudad Universitaria - Concepción Chile <https://cienciasambientales.udec.cl/>

Indice

Índice de tablas	6
Índice de Figuras	8
Agradecimientos:	10
Resumen Ejecutivo:.....	11
I.- Introducción	14
1. Origen e historia de los megaincendios	14
2. Problemática de los megaincendios en nuestro país.....	17
3. Pregunta de investigación e hipótesis	21
4. Objetivos de investigación.....	21
II.- Antecedentes	22
1. Conceptos de la ciencia del fuego (<i>fire science</i>) y la pirogeografía.....	22
2. Los combustibles forestales y el comportamiento del fuego:	24
3. Megaincendios: Definiciones, características y principales factores que inciden en su ocurrencia... 28	
3.1. Definiciones y caracterización de megaincendios	28
3.2. Principales factores que inciden en la ocurrencia de megaincendios	32
3.3 El rol de los monocultivos forestales como propagadores de incendios.....	34
4. Herramientas utilizadas en el análisis de los megaincendios	42
4.1. Evaluación de severidad mediante teledetección	42
4.2. Monitoreo de intensidad mediante sensores satelitales	43
4.3. Caracterización de condiciones del combustible	44
4.4. Análisis del rol de especies vegetales y monocultivos forestales	47
4.5. Integración de <i>machine learning</i> y <i>Google Earth Engine</i> en el análisis de megaincendios.....	48
5. Caracterización detallada de los eventos de megaincendios ocurridos en Chile	49
III.- Metodología.....	54
1. Metodología objetivo específico 1: Caracterizar el daño asociado a los eventos en términos de severidad	54
2. Metodología objetivo específico 2: Caracterizar las condiciones del combustible pre-incendio.....	62
3. Metodología objetivo específico 3: Reconocer patrones asociados a la distribución de intensidad .	67
4. Metodología objetivo específico 4: Relacionar índices de severidad, intensidad y condiciones del combustible	70
IV.- Resultados y Discusión	83
Resultados OE1: Caracterización del daño asociado a los eventos en términos de severidad	83

Resultados OE2: Caracterización de las condiciones del combustible pre-incendio.....	86
Resultados OE3: Reconocimiento de patrones asociados a la distribución de intensidad	88
Resultados OE4: Relaciones entre índices de severidad, intensidad y condiciones del combustible	91
V.- Conclusiones	103
VI.- Contribución a los ODS	107
VII.- Referencias	108
1. Papers	108
2. Libros:	113
3. Informes.....	114
4. Literatura gris, conferencias y otros	115
5. Sitios web.....	116
6. Otros recursos digitales	117
VIII.- Anexos	119

Índice de tablas

Tabla 1: Clasificación de los incendios basada en el comportamiento del fuego y la capacidad de control	30
Tabla 2: Síntesis comparativa de estudios sobre plantaciones forestales y actividad del fuego	40
Tabla 3: Ubicación y coordenadas espaciales de los eventos estudiados	52
Tabla 4: Adquisición de Imágenes Sentinel-2 (2023)	57
Tabla 5: Superficie de los eventos calculadas a partir de severidades efectivas y envolventes	59
Tabla 6: Clases de severidad de quema (0 a 4) según umbrales del índice dNBR (Sentinel-2)	61
Tabla 7: Índices espectrales utilizados para caracterizar el estado del combustible pre-incendio	64
Tabla 8: Tipologías de combustible forestal reclasificadas y sus códigos identificadores	66
Tabla 9: Métodos de interpolación aplicados	69
Tabla 10: Campos de atributos presentes en los datasets generados en SIG	84
Tabla 11: Distribución de categorías de severidad por tipo de combustible en el evento Santa Ana	84
Tabla 12: Distribución de categorías de severidad por tipo de combustible en el evento Santa Gertrudis	83
Tabla 13: Superficie afectada (ha) y porcentaje del total afectado por tipo de combustible en el Megaincendio Santa Ana	87
Tabla 14: Superficie afectada (ha) y porcentaje del total afectado por tipo de combustible en el Megaincendio Santa Gertrudis	87
Tabla 15: Resultados del test de Anova de Welch para diferencias entre tipos de combustible	95
Tabla 16: Comparaciones post-hoc de Games-Howell - Severidad Santa Ana	97

Tabla 17: Comparaciones post-hoc de Games-Howell - Intensidad Santa Ana	97
Tabla 18: Comparaciones post-hoc de Games-Howell - Severidad Santa Gertrudis	98
Tabla 19: Comparaciones post-hoc de Games-Howell - Intensidad Santa Gertrudis	98
Tabla 20: Comparaciones Significativas que involucran al monocultivo forestal	99

Índice de Figuras

Figura 1: Cartografía del Área de Estudio con perímetros envolventes de los eventos Santa Ana y Santa Gertrudis	52
Figura 2: Diagrama metodológico OE1 para evento Santa Ana	55
Figura 3: Diagrama metodológico OE1 para evento Santa Gertrudis	54
Figura 4: Área efectiva y envolventes de los eventos Santa Ana (izq) y Santa Gertrudis (der)	60
Figura 5: Diagrama metodológico OE2 para Eventos Santa Ana y Santa Gertrudis	62
Figura 6: Diagrama metodológico OE3 para Eventos Santa Ana y Santa Gertrudis	67
Figura 7: Diagrama metodológico complementario OE3	69
Figura 8: Diagrama metodológico OE4 para Eventos Santa Ana y Santa Gertrudis	70
Figura 9: Conjunto de Histogramas exploratorios generado para las variables del evento Santa Ana	73
Figura 10: Comparación de distribuciones de datos originales (Santa Ana), transformados y estandarizados	75
Figura 11: Comparación de distribuciones de datos originales (Santa Ana), transformados y estandarizados	76
Figura 12: Análisis symbox aplicado a los datos de Santa Ana Previo Limpieza Outliers	79
Figura 13: Análisis symbox aplicado a los datos de Santa Ana Posterior a limpieza outliers	80
Figura 14: Histogramas y QQplots de variables transformadas Santa Ana	81
Figura 15: Cartografía de las Categorías de severidad de quema de los eventos	83
Figura 16: Cartografía de las categorías de severidad en el Sitio prioritario Cerro Cayumanque	85
Figura 17: Cartografía de las categorías de combustible presentes en el área de estudio	86
Figura 18: Cartografía de las fechas de quema Evento Santa Ana	88

Figura 19: Cartografía de las fechas de quema Evento Gertrudis	89
Figura 20: Correlograma de Spearman Evento Santa Ana	91
Figura 21: Análisis de componentes principales Evento Santa Ana	92
Figura 22: Correlograma de Spearman Evento Santa Gertrudis	93
Figura 23: Análisis de componentes principales Evento Santa Gertrudis	94
Figura 24: Distribución de Severidades por categoría de orientación en evento Santa Ana	102
Figura 25: Distribución de Severidades por categoría de orientación en evento Santa Gertrudis	102

Agradecimientos:

"A mis padres, cuyo amor y sacrificio han sido la base de mi camino. Su espíritu perseverante me inspira y me inspirará siempre.

A mis hermanas, a quienes amo profundamente y cuyo apoyo y cariño han sido fundamentales para mí.

A mis queridos amigos, por todo el apoyo y alegría que me han dado.

A mis estimados profesores, cuya paciencia y guía me permitieron llegar hasta el final de este proceso.

Resumen Ejecutivo:

En el presente trabajo de tesis se aborda la problemática de los megaincendios o "eventos extremos de incendio" (*Extreme Wildfire Events*, o EWE), fenómenos complejos que han venido ocurriendo en las últimas décadas en Chile y en el mundo y que están siendo ampliamente estudiados por la reciente ciencia de la pirogeografía. El trabajo pone foco en los eventos de Santa Ana y Santa Gertrudis, ocurridos en Chile en febrero de 2023. Estos eventos formaron parte de la segunda temporada más devastadora en la historia de Chile, con 25 víctimas fatales y más de 429.103 hectáreas quemadas a nivel nacional. Santa Ana afectó mayormente a las comunas de Santa Juana y Nacimiento, en la región del Biobío, consumiendo 100.723 hectáreas, mientras que Santa Gertrudis impactó a la comuna de Quillón, en la región de Ñuble, con 21.913 hectáreas afectadas, produciendo importantes daños económicos y ecológicos al afectar el sitio prioritario para la conservación de la naturaleza Cerro Cayumanque. El propósito de este trabajo es estudiar cómo se vinculan las variables intrínsecas de estos eventos. La pregunta de investigación es: "¿Cómo se vinculan los indicadores de intensidad del evento, severidad de la quema y las condiciones del combustible en el contexto de los eventos Santa Ana y Santa Gertrudis?", Siendo La principal hipótesis que "El monocultivo forestal presenta mayores niveles de severidad e intensidad que otros tipos de combustible". El objetivo general es evaluar el comportamiento de los eventos Santa Ana y Santa Gertrudis en relación con su intensidad, severidad y condiciones del combustible.

Como introducción, se presenta la problemática del surgimiento de los megaincendios y su historia. Luego, se abordan los antecedentes necesarios para comprender los conceptos, variables y métodos empleados en este trabajo. Se explican conceptos de la pirogeografía y la ciencia del fuego, como regímenes de incendios, intensidad, severidad, comportamiento del fuego y variables que afectan los incendios. Presentando el concepto de combustible, condiciones de combustible, tipologías de combustible, entre otros. Posteriormente, se profundiza en la problemática de los megaincendios, sus definiciones y características, y se realiza una revisión de las herramientas utilizadas en el estudio de estos, tales como los índices espectrales, análisis multivariados y computación en la nube, entre otros, para aterrizar en la realidad local de los recientes eventos ocurridos en Chile, su caracterización detallada y las condiciones que los han favorecido. Se aborda también el rol de las plantaciones forestales en la propagación de los incendios, habiéndose documentado en Chile una sobrerrepresentación desproporcionada de monocultivos exóticos en las áreas afectadas, los cuales ocupan apenas

el 18% del territorio nacional pero concentran hasta el 44% del área quemada durante eventos extremos.

La metodología integró Teledetección, Sistemas de Información Geográfica y análisis estadístico multivariado para abordar los objetivos específicos. La severidad de la quema se evaluó mediante el índice espectral dNBR derivado de imágenes *Sentinel-2*, generando redes de muestreo aleatorias a partir de la severidad efectiva para la extracción de las variables necesarias para análisis posteriores. Las condiciones del combustible se caracterizaron mediante siete índices espectrales de vigor vegetacional y contenido de humedad, variables topográficas, altura del dosel, y tipología de combustible reclasificada del Catastro de Recursos Vegetacionales de CONAF. La intensidad del fuego se obtuvo a partir de las anomalías térmicas satelitales (VIIRS/NASA) generando filtros e interpolaciones del *Fire Radiative Power* (FRP). Las relaciones entre variables se analizaron primero mediante correlaciones de Spearman y análisis de componentes principales (PCA). Posteriormente, se generó un muestreo estratificado balanceado para análisis de diferencias significativas mediante Welch ANOVA y comparaciones múltiples de Games-Howell.

Los resultados muestran que, para ambos eventos, los índices espectrales relacionados con vigor vegetacional y contenido de humedad presentan una fuerte correlación positiva entre sí. Los índices NDVI, NDMI, NBR, VARI y MSAVI2 conforman un núcleo de alta correlación, relacionados positivamente con la altura del dosel y las variables topográficas, mientras que los índices MSI y NDWI muestran correlaciones negativas con este grupo. La presencia de estos patrones en ambos eventos sugiere que las relaciones entre variables son independientes del sitio específico cuando se utilizan las mismas fuentes de datos.

Los análisis estadísticos revelaron que el tipo de combustible tuvo una influencia marginal (explicando menos del 5% de la variabilidad), sugiriendo que, bajo condiciones meteorológicas extremas, el tipo de combustible no representa un factor determinante de las variables severidad e intensidad. Asimismo, los monocultivos presentaron menor severidad que los usos agrícolas debido a la combustión parcial de las estructuras leñosas frente al consumo total de la biomasa herbácea, mientras que los resultados de intensidad resultaron poco concluyentes debido a limitaciones en la resolución satelital

A modo de discusión, se destaca que la hipótesis planteada fue parcialmente rechazada, evidenciando patrones más complejos de los anticipados. El hallazgo severidad con bajo tamaño de efecto apunta a que, bajo condiciones meteorológicas extremas, los factores climáticos,

variables topográficas, entre otras variables no consideradas, aparentemente dominan sobre las características intrínsecas del combustible. Este resultado es consistente con literatura reciente que propone que las sequías extremas superan umbrales donde las diferencias entre tipos de combustible se minimizan. Una limitación muy relevante no evaluada en este trabajo es el efecto del manejo de las plantaciones forestales, aspecto señalado también por otro estudio aquí revisado como fundamental para comprender el comportamiento del fuego en monocultivos.

Las limitaciones metodológicas de FRP-VIIRS, particularmente su baja resolución espacial y frecuencia temporal insuficiente, impiden obtener conclusiones definitivas sobre los patrones de intensidad observados, señalando la necesidad de explorar enfoques que integren múltiples sensores o métricas alternativas como la tasa de propagación del frente de fuego.

El objetivo último de esta tesis es generar conocimiento sobre cómo se vinculan los factores que determinan el comportamiento de estos eventos catastróficos, con el fin de contribuir al conocimiento sobre megaincendios y servir como antecedente valioso para futuras investigaciones que incorporen variables adicionales y aborden las limitaciones identificadas, así como para ser integrado en los diferentes Instrumentos de Planificación Territorial existentes.

I.- Introducción

1. Origen e historia de los megaincendios

Los incendios forestales son un fenómeno natural presente en la Tierra desde la aparición de las plantas terrestres y han desempeñado un rol clave en la historia de la vida en el planeta, actuando como configuradores de ecosistemas, participantes en los ciclos biogeoquímicos, especialmente en el ciclo del carbono, y como forzantes de adaptaciones en especies de plantas. Además, han tenido un rol preponderante en la evolución de la especie humana misma (Pausas y Keeley, 2009).

El fuego surge de la interacción de tres elementos fundamentales que integran el "triángulo del fuego": calor, oxígeno y combustible. Mientras el oxígeno atmosférico y fuentes de calor (rayos, volcanes) ya existían en el planeta primitivo, las plantas terrestres proporcionaron el combustible necesario, convirtiendo al fuego en un proceso ecosistémico integral a lo largo de millones de años. Como señalan Pausas y Keeley (2009): "Se necesita una productividad primaria suficiente para que el fuego se propague, pero se requiere de una estacionalidad climática para convertir estos combustibles potenciales en combustibles disponibles [...] Los regímenes de fuego estarán fuertemente controlados por la frecuencia de las igniciones y la estructura del combustible" (p. 2).

Esta dinámica ecológica ha ejercido múltiples funciones: como reguladores del ciclo del carbono mediante la liberación de CO₂ durante la combustión y posterior fijación durante la regeneración vegetal, transformadores de materia orgánica en formas más disponibles para las plantas, y promotores de sucesión ecológica y renovación ecosistémica. El proceso ha generado presiones selectivas significativas que favorecieron adaptaciones específicas como germinación inducida por fuego, corteza resistente y capacidad de rebrote, contribuyendo tanto a la biodiversidad como al equilibrio dinámico de los ecosistemas (Pausas y Keeley, 2009).

A su vez, el fuego ha constituido un factor crucial en la evolución de la especie humana; según Bowman (2011) y Pausas y Keeley (2009), las primeras evidencias de esta interacción humana con el fuego datan de hace al menos 1,5 millones de años, cuando los primeros homínidos empezaron a usar el fuego. Esta utilización permitió a los humanos adaptarse a diversos ecosistemas y modificar su entorno de una manera que ninguna otra especie logró. Al permitir la cocción de alimentos, el fuego contribuyó a la mejora de la digestión, lo que jugó un papel fundamental en el desarrollo del cerebro humano. Además, se utilizó para colonizar zonas más gélidas, favoreciendo la expansión y proliferación de la especie. El fuego también promovió la

cohesión social alrededor de las fogatas, resultando significativo en el desarrollo de las habilidades sociales y el desarrollo cognitivo y cultural de la especie (Bowman, 2009; Pausas y Keeley, 2009).

A medida que las civilizaciones humanas evolucionaron y se expandieron, el uso del fuego se intensificó para actividades agropecuarias, transformando profundamente su dinámica en los ecosistemas. Bowman (2011) explica que la adopción de prácticas como la quema para la caza o el despeje de terrenos, incluyendo la "agricultura de tala y quema", alteró los regímenes de incendios naturales. Esta intervención antropogénica generó una mayor frecuencia e intensidad de los eventos, desplazando los ciclos naturales y afectando significativamente la sucesión ecológica, la regeneración y la biodiversidad local.

Hoy en día, la relación entre el ser humano y los incendios ha alcanzado una nueva dimensión, marcada por la urbanización, la deforestación y el cambio climático. Las intervenciones humanas, como la deforestación masiva y el cambio en el uso del suelo, han alterado los patrones de combustibilidad y la estructura de los combustibles, lo que contribuye a incendios forestales más destructivos y difíciles de controlar. Además, el cambio climático está generando condiciones más favorables para la propagación de incendios a gran escala en todo el mundo. Según Bowman (2011), el aumento de las temperaturas globales y los cambios en los patrones de precipitación están alterando los ciclos de sequía y creando un entorno más propenso a incendios forestales severos. Es en este contexto donde surge el fenómeno de los megaincendios o eventos extremos de incendio (EWE, por sus siglas en inglés). Aunque son conceptos diferentes cuyas definiciones se abordarán en detalle más adelante, ambos términos se introducen aquí para contextualizar el origen histórico de estos eventos.

Los EWE representan un fenómeno de creciente preocupación global. Según Tedim et al. (2020), "aunque estos eventos representan una minoría entre todos los incendios forestales, su impacto es desproporcionado en términos de vidas humanas, daños económicos y pérdidas ecológicas" (p. 1). Estos eventos han marcado hitos trágicos mundialmente, incluyendo el incendio de Tillamook (1933) en Estados Unidos, primer megaincendio bien documentado caracterizado por intensidad extrema y formación de pirocúmulo de 12,9 km que derivó en políticas nacionales de supresión, y eventos australianos paradigmáticos como el "Ash Wednesday" (1983) con 393.000 hectáreas y 75 muertes, y el "Black Saturday" (2009), considerado el peor incendio australiano con 173 víctimas. Canadá también ha experimentado eventos devastadores, como el megaincendio Fort McMurray Horse River (2016) que afectó 589.552 hectáreas y evacuó 90.000 personas (Tedim et al., 2020).

Esta problemática se ha globalizado significativamente. Según Tedim et al. (2020), "esta realidad surgió en otros muchos países, como Europa mediterránea y América del sur, incluyendo Grecia (2007 y 2018), Portugal (2003, 2005 y 2017), y Chile (2017)" (p. 3). Particularmente, la temporada portuguesa de 2017 ejemplifica la magnitud del problema: el gobierno reportó aproximadamente 21.000 incendios forestales que quemaron 539.920 hectáreas de bosques, matorrales y tierras agrícolas, causando 117 muertes (San-Miguel-Ayanz, 2020).

2. Problemática de los megaincendios en nuestro país

El verano de 2017 constituyó la temporada de incendios más destructiva en la historia reciente de Chile, con más de medio millón de hectáreas quemadas y 11 víctimas fatales (CR2, 2020). Según CONAF, el área siniestrada alcanzó 596 mil hectáreas, concentrándose más del 80% entre el 14 de enero y el 14 de febrero (Subsecretaría del Interior, 2017). Gran parte de esta afectación correspondió al megaincendio "Las Máquinas", que consumió 187.000 hectáreas y causó la totalidad de las muertes registradas (CONAF, 2024). Iniciado el 20 de enero y controlado el 9 de febrero, este evento exhibió comportamiento extremo con vientos de 100-130 km/h e intensidades caloríficas de 60000 kW/m, consumiendo 115 mil hectáreas en apenas 14 horas (CONAF, 2017).

El análisis oficial de severidad reveló patrones preocupantes en la distribución espacial del daño. Según el informe de CONAF sobre la afectación entre las regiones de Coquimbo y La Araucanía, el área total comprometida alcanzó 518.174 hectáreas, concentradas principalmente en la Región del Maule (54%, equivalente a 185.877 hectáreas de plantaciones de pino predominantemente), seguida por Biobío (19.2%) y O'Higgins (17.4%). Significativamente, las plantaciones forestales representaron el 54.7% del área afectada, mientras que los bosques nativos solo el 17.24% (89.347 ha) (CONAF, 2017).

Paralelamente, los impactos indirectos de esta catástrofe permanecieron inicialmente invisibilizados en los registros oficiales. Mientras las autoridades documentaban daños directos en infraestructura y áreas protegidas, el estudio de De la Barrera et al. (2018) reveló consecuencias de largo alcance: más del 70% de la población chilena estuvo expuesta a contaminación crítica por material particulado (PM2.5 y PM10), y 37 asentamientos humanos enfrentaron riesgo elevado de deslizamientos e inundaciones, de los cuales 11 se encontraban en condición crítica, debido a la pérdida de cobertura vegetal.

En este contexto de devastación, emergió con particular fuerza el debate sobre el rol de las plantaciones forestales en la propagación del fuego. La evidencia científica disponible presenta un panorama complejo.

Fernandes et al. (2019) analizaron la expansión de eucaliptos en Portugal durante el período 1980-2017, encontrando que las variables climáticas explicaban el 72% de la varianza en el área quemada, mientras que la presencia de eucaliptos no mostró efectos significativos ($p = 0.8443$). Los autores sugieren que este resultado refleja tanto el reemplazo de vegetación previamente

más inflamable (pino marítimo y matorral) por eucaliptos, como el predominio de variables climáticas sobre las características del combustible en la determinación del área quemada.

La situación en Chile parece ser distinta. Bowman et al. (2018) documentaron que durante los megaincendios de 2017, las plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus spp.*, que representaban apenas el 14% de la cobertura vegetal regional, concentraron el 44% del área total incendiada, una desproporción estadísticamente significativa ($p < 0,0001$) que superó 3.1 veces lo esperado bajo distribución aleatoria del fuego. Análisis espectrales complementarios revelaron que estos monocultivos sufrieron pérdidas de biomasa significativamente mayores que los ecosistemas nativos adyacentes ($p < 0,0001$).

McWethy et al. (2018) profundizaron en estos patrones mediante el análisis de datos satelitales para el período 2001-2017 en Chile central (32° - 40° S), aplicando el índice de Murdoch para evaluar la selectividad del fuego por distintos tipos de vegetación. Los resultados revelaron que las plantaciones exóticas mostraron la mayor preferencia relativa en ambas zonas bioclimáticas estudiadas (Mediterránea y transición Mediterránea-Templada), con valores significativamente superiores ($p < 0.01$) a los bosques nativos, incluso después de controlar por variables climáticas y topográficas. Los matorrales presentaron preferencia intermedia, mientras que los bosques de *Nothofagus* exhibieron los valores más bajos, indicando menor propensión a incendios en relación con su disponibilidad espacial.

Gómez-González et al. (2019) compararon dos períodos temporales (2000-2005 y 2011-2016) mediante modelos de ecuaciones estructurales, encontrando que el uso agrícola incluyendo quemas de rastrojos tuvo el mayor efecto directo sobre el número de incendios y área quemada en ambas épocas, mientras que las plantaciones mostraron impacto significativo solo durante el primer período. Los bosques nativos exhibieron efectos negativos consistentes sobre la actividad de fuego.

Más recientemente, Cordero et al. (2024) matizaron estos hallazgos al analizar los megaincendios de 2023, no encontrando diferencias significativas ($p > 0,05$) en el área total quemada entre bosques nativos y plantaciones forestales. El análisis desagregado por especies reveló que la respuesta ante las variables climáticas es generalizada: tanto las plantaciones de eucalipto y pino como los bosques nativos mostraron correlaciones significativas y de similar magnitud (R aprox $+0,5$ - $+0,6$) con la temperatura superficial del mar en la región ENSO 1+2, sugiriendo que bajo este forzante climático, la vulnerabilidad a la ignición se vuelve transversal en todo el paisaje forestal.

La divergencia de resultados entre Portugal y Chile refleja diferencias fundamentales de contexto. En Portugal, la expansión de eucaliptos reemplazó vegetación previamente más inflamable (pino marítimo y matorral), y las variables climáticas explicaron la mayor parte de la varianza en área quemada, relegando el tipo de combustible a un rol secundario. En Chile, la evidencia es más compleja: mientras Bowman et al. (2018) y McWethy et al. (2018) identificaron una sobrerrepresentación de plantaciones en el área quemada durante eventos extremos, Gómez-González et al. (2019) encontraron que el uso agrícola tuvo mayor efecto directo que las plantaciones, y que estas últimas solo mostraron impacto significativo en el primer período analizado (2000-2005). Los autores atribuyeron esta variación temporal a que sequías extremas pueden reducir la relevancia del tipo de combustible como determinante de la actividad de fuego. Más recientemente, Cordero et al. (2024) confirmaron que, bajo la influencia del calentamiento en la zona Niño 1+2, las diferencias de área quemada entre plantaciones y bosques nativos dejan de ser significativas, evidenciando una sensibilidad climática sincronizada de todas las cubiertas vegetales. En conjunto, estos estudios sugieren que el riesgo de incendio depende de una interacción dinámica donde las condiciones climáticas extremas pueden llegar a homogeneizar la inflamabilidad del paisaje, superando las diferencias intrínsecas de los combustibles.

A lo largo de este trabajo se profundizará en este aspecto.

Más allá de los eventos específicos de 2017, la evidencia acumulada sugiere un cambio del régimen de incendios en Chile. El Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) documenta este cambio mediante dos indicadores: la extensión de la temporada de incendios de 6 meses (noviembre-abril) durante 1985-2009 a 8 meses (octubre-mayo) en el período 2010-2018, y el registro de 16 megaincendios solo entre 2010 y 2018, constituyendo la mayoría de estos eventos desde 1985 (CR2, 2020), sin considerar eventos posteriores más recientes. La evidencia aportada por el estudio de Bowman et al. (2018), que señala que once de los eventos más extremos registrados globalmente por MODIS entre 2002-2017 (clasificados por *Fire Radiative Power* por 100 km²) ocurrieron en Chile central entre el 18-26 de enero de 2017, apoya esta idea del cambio de régimen del fuego en Chile.

Esta tendencia se consolidó dramáticamente en 2023, cuando ocurrió la segunda temporada más devastadora registrada, con 429.103 hectáreas quemadas (CONAF, s.f.-b), 25 víctimas fatales (SENAPRED, 2023) y pérdidas económicas superiores a 880 millones de dólares (Cordero et al., 2024). Los eventos de Santa Ana (100.723 ha según este trabajo) y Santa Gertrudis (21.913 ha) destacaron entre los más significativos. El análisis de Cordero et al. (2024) identificó la convergencia de factores críticos: megasequía persistente desde 2008 (déficits >50),

olas de calor (definidas como un período de al menos tres días consecutivos donde la temperatura máxima diaria supera el percentil 90 de la climatología local [DMC, 2022]) y temperaturas máximas récord (41,6°C en Chillán) y vientos Puelche que redujeron la humedad a <20%, Significativamente, el estudio estableció una correlación robusta (R aprox +0,6, $p < 0,05$) entre anomalías de temperatura superficial del mar en la región Niño 1+2 y las temperaturas máximas en Chile central, señalando esta teleconexión climática como variable clave para futuros análisis predictivos, junto a factores de índole antropogénica (aumento de igniciones humanas tanto intencionales como accidentales) y prácticas productivas forestales (que acentúan la vulnerabilidad de las plantaciones ante el estrés hídrico) en la acelerada propagación de estos megaincendios.

Finalmente, estos eventos generan impactos que trascienden el daño inmediato de la combustión. Los megaincendios de 2023 en el Biobío crearon condiciones para crisis hidrológicas posteriores: los suelos afectados desarrollan hidrofobicidad severa y pérdida estructural que reducen drásticamente la infiltración, favoreciendo escorrentía y erosión acelerada (Moody & Ebel, 2012; Matus et al., 2023). Durante las lluvias intensas de junio 2023, esta degradación facilitó el arrastre masivo de sedimentos, afectando 5,500 personas en el Biobío (Radio UdeC, 2023) y generando 21,000 damnificados nacionales con 1,610 viviendas destruidas (La Tercera, 30/06/2023). Estos eventos evidencian la gravedad de los megaincendios: no solo impactan al momento de ocurrir, sino que transforman el territorio en zonas de riesgo hidrológico donde las lluvias posteriores constituyen amenazas secundarias de magnitud quizá comparable a los incendios originales.

Nota. Las cifras de afectación por inundaciones se basan en reportes periodísticos que citan fuentes oficiales (ej., SENAPRED, COGRID Biobío), dado que los datos desagregados por comuna no están disponibles en repositorios públicos. Se priorizaron medios con acceso a informes gubernamentales (La Tercera, Radio UdeC) para garantizar rigurosidad.

3. Pregunta de investigación e hipótesis

Una vez conocida la gravedad de los megaincendios, y del panorama actual del cambio de régimen del fuego en nuestro país, con un esperado aumento en la recurrencia de este tipo de fenómenos, se reconoce la necesidad de estudiarlos más a fondo, a fin de poder mejorar la información disponible para la prevención de daños provocados por megaincendios, con dicha finalidad se plantea la siguiente pregunta de Investigación:

¿Cómo se vinculan los indicadores de intensidad del evento, severidad de la quema y las condiciones del combustible en el contexto de los eventos Santa Ana y Santa Gertrudis?

Esta pregunta es bastante amplia, lo cual abre la posibilidad de obtener múltiples posibles preguntas, hipótesis, asociaciones y respuestas, en este trabajo, a fin de profundizar en el rol de los monocultivos forestales como propagadores de incendios, se plantea como hipótesis principal de este trabajo, que es la siguiente: **El monocultivo forestal presenta mayores niveles de severidad e intensidad que otros tipos de combustible**

4. Objetivos de investigación

Para abordar la pregunta de investigación e hipótesis se plantean los siguientes objetivos

Objetivo general: evaluar el comportamiento de los eventos Santa Ana y Santa Gertrudis en relación a su intensidad, severidad y a las condiciones del combustible

Objetivos específicos:

OE1: Caracterizar el daño asociado a los eventos en términos de severidad.

OE2: Caracterizar las condiciones del combustible pre-incendio.

OE3: Reconocer patrones asociados a la distribución de intensidad.

OE4: Relacionar índices de severidad, intensidad y condiciones del combustible.

Debido a la necesidad de poder comprender el porqué y el cómo cumplir estos objetivos se requiere explicar y desarrollar en profundidad una serie de conceptos de la pirogeografía, los cuales se expondrán en la sección de antecedentes que viene a continuación.

II.- Antecedentes

1. Conceptos de la ciencia del fuego (*fire science*) y la pirogeografía

La *fire science* (ciencia del fuego), entendida como el estudio integral de los procesos de combustión, comportamiento del fuego y sus interacciones ecológicas y sociales (Castro Rego et al., 2021), proporciona las herramientas fundamentales para comprender los aspectos operacionales de los incendios: las propiedades de los combustibles, sus condiciones de humedad, los mecanismos de propagación y el comportamiento del fuego. Estos conocimientos resultan indispensables tanto para explicar la dinámica de megaincendios como para caracterizar los combustibles en el desarrollo de los objetivos de este trabajo. Complementariamente, la pirogeografía; definida como “el estudio de la distribución espacial del fuego a través del planeta” (Krawchuk et al., 2009, p. 2) y como “el estudio del fuego en la Tierra que combina disciplinas de las ciencias biológicas, físicas y sociales” (Bowman et al., 2013, p. 58) ofrece el marco conceptual para comprender los cambios en los regímenes de incendios y el surgimiento de los megaincendios como fenómeno global, analizando la interacción entre clima, vegetación y factores humanos a distintas escalas espacio-temporales. Esta investigación se fundamenta en la sinergia de ambas disciplinas: mientras la *fire science* provee los principios para analizar la combustibilidad y comportamiento del fuego a escala local, la pirogeografía permite contextualizar estos procesos en patrones regionales y globales. A continuación, se presenta una batería de conceptos clave de estas ciencias que sustentan el desarrollo de este trabajo.

El régimen de incendios representa un concepto fundamental dentro de la pirogeografía, el cual integra los patrones espaciotemporales característicos de los incendios en un ecosistema determinado (Resco de Dios, 2020). Este concepto abarca cinco componentes esenciales que interactúan de manera compleja. En primer lugar, el tipo de incendio varía según la capa de combustible afectada: los incendios de copas (*crown fires*) consumen el dosel arbóreo y son típicos de plantaciones forestales densas; los incendios de superficie (*surface fires*) afectan el sotobosque y la hojarasca; mientras que los incendios de suelo (*ground fires*) queman lentamente la materia orgánica del suelo. Cada tipo presenta dinámicas distintas y consecuencias ecológicas específicas.

En segundo término, la intensidad y severidad del fuego constituyen elementos clave del régimen de incendios, aunque conceptualmente distintas (Keeley, 2009). La intensidad, cuantificada mediante la fórmula de Byram ($I = H \times B \times R$), donde H es el poder calorífico (kJ/kg), B el combustible consumido (kg/m²) y R la velocidad de propagación (m/s), expresa la energía liberada por unidad de longitud del frente de fuego (kW/m) (Resco de Dios, 2020). La intensidad

puede también estimarse remotamente mediante el FRP (*Fire Radiative Power*) en MW (megawatts) (Johnston et al., 2022). Por otra parte, la severidad evalúa los impactos ecológicos post-incendio mediante índices como el dNBR, que analiza cambios en la reflectancia vegetal en bandas NIR y SWIR (CONAF, 2017). Como destaca Keeley (2009), esta distinción es fundamental: mientras la intensidad describe el proceso físico (capacidad de causar mortalidad inmediata), la severidad refleja las consecuencias ecológicas (pérdida de biomasa, alteración del suelo), clasificables en siete categorías desde alto crecimiento de la vegetación posterior al fuego (dNBR < -0.25) hasta severidad alta (dNBR > 0.66) (Key & Benson, 2006). Ambas métricas, aunque diferentes, son complementarias para comprender la dinámica completa del régimen de incendios.

El análisis de los patrones temporales incluye métricas como la frecuencia (incendios/año), el intervalo de retorno (años entre incendios) y el período de rotación (tiempo necesario para quemar un área completa) (Resco de Dios, 2020). En Chile, los registros históricos de CONAF revelan una preocupante tendencia: desde 1964 se ha quintuplicado la superficie anual afectada, con el año 2017 marcando un récord histórico.

En cuanto al tamaño y distribución de los parches quemados, se observa la llamada "paradoja del fuego" (Duane et al, 2021), donde la supresión sistemática ha generado acumulación de combustibles que favorecen megaincendios (>1,000 ha), los cuales, aunque menos numerosos, representan el 78% del área total quemada. Finalmente, la estacionalidad ha experimentado cambios significativos, extendiéndose la temporada de incendios en Chile de 6 a 8 meses anuales entre 1985 y 2018 (CR2, 2020).

2. Los combustibles forestales y el comportamiento del fuego:

Combustibles forestales: definición, estratos y propiedades fundamentales

Entendemos por combustible "cualquier elemento que, al combustionar, sea capaz de liberar energía en forma de calor" (Montealegre et al., s.f.). Los combustibles forestales, definidos como toda biomasa vegetal, viva o muerta, capaz de liberar energía térmica durante la combustión (Arroyo et al., 2008) presente en el ecosistema, desde las raíces subterráneas hasta las copas de los árboles, se organizan en tres estratos principales: (1) los combustibles del suelo, que incluyen materia orgánica en descomposición y raíces; (2) los combustibles superficiales, compuestos por pastos, hojarasca, arbustos y troncos caídos; y (3) los combustibles de copa, formados por follaje, ramas y árboles en pie. Cabe destacar que no todos estos estratos necesariamente participan en cada incendio forestal (British Columbia Wildfire Service, 2022). Cada estrato presenta características particulares de inflamabilidad y contribución al comportamiento del fuego, siendo especialmente relevantes factores como la carga combustible (kg/m^2), la continuidad espacial y el contenido de humedad.

La caracterización de combustibles forestales tradicionalmente considera tres grupos de propiedades: físicas (cantidad, continuidad, distribución, compacticidad y grosor), químicas (composición y poder calorífico) y de condición (principalmente humedad) (Julio et al., s.f.). Entre estas, la continuidad espacial, entendida como el contacto entre partículas vegetales que facilita la transferencia de energía, ha sido identificada como factor determinante en los megaincendios chilenos (Saavedra Saldías, 2024). Sin embargo, la medición directa de estas propiedades en grandes extensiones resulta compleja, por lo que la teledetección ofrece alternativas para estimar proxies de estas características mediante índices espectrales y variables derivadas de sensores remotos.

La humedad del combustible, definida técnicamente como la relación porcentual entre la masa de agua contenida y la masa seca del material vegetal (Kane & Prat-Guitart, 2018), constituye uno de los factores más críticos en el comportamiento del fuego. Este parámetro ejerce una influencia determinante en tres procesos fundamentales: (1) la ignición, al requerirse mayor energía térmica para evaporar el agua antes de iniciar la combustión; (2) la propagación, al reducir la velocidad de avance del frente de fuego; y (3) la intensidad, al disminuir la altura de las llamas y favorecer combustiones más lentas.

En la actualidad, el monitoreo de la humedad del combustible ha evolucionado hacia técnicas de teledetección que permiten estimaciones espacialmente explícitas mediante el uso de índices

espectrales derivados de plataformas satelitales como MODIS, Landsat y Sentinel. En el presente trabajo se hará uso de la teledetección para caracterizar tanto la humedad del combustible como otras variables de los incendios forestales estudiados.

Factores que determinan el comportamiento del fuego

El comportamiento del fuego se refiere al conjunto de manifestaciones físicas observables durante el desarrollo de un incendio, incluyendo sus patrones de propagación, intensidad y los efectos mecánicos que produce en el medio ambiente. (Castillo & Garfias, 2010). Las variables más comúnmente citadas que forman parte del comportamiento del fuego son la intensidad, la longitud de llama y la velocidad de propagación, entre otras.

El comportamiento del fuego forestal está determinado por la interacción dinámica entre tres factores principales: los combustibles vegetales, las condiciones meteorológicas y las características topográficas (Castillo & Garfias, 2010). Entre estos elementos, el combustible representa el único componente que puede ser modificado mediante gestión activa (Pyne, 1984), lo que lo convierte en un aspecto clave para la prevención y control de incendios.

Por otro lado, la topografía emerge como el factor más predecible en el comportamiento del fuego (NWFSC, 2017). La pendiente del terreno, definida como el grado de inclinación de una ladera influye directamente en la velocidad de propagación, ya que el fuego se extiende más rápidamente en fuertes pendientes positivas. Este fenómeno ocurre porque el calor y las llamas ascienden precalentando eficientemente los combustibles situados en la parte superior (NWFSC, 2017).

La elevación, entendida como la altitud del terreno sobre el nivel del mar, afecta el comportamiento del fuego a través de múltiples mecanismos: regula el régimen de precipitaciones, la exposición al viento y los patrones térmicos. En zonas bajas, los combustibles se secan más temprano en la temporada debido a las temperaturas más cálidas, mientras que en mayores elevaciones la persistencia de la nieve retarda el inicio de la temporada de incendios. Adicionalmente, las áreas elevadas presentan mayor frecuencia de rayos como fuente de ignición natural (NWFSC, 2017).

La exposición de las laderas a los rayos solares determina diferencias significativas en la humedad de los combustibles, siendo las orientaciones norte (en el hemisferio sur) las que presentan mayor exposición y, consecuentemente, mayor riesgo de incendios (NWFSC, 2017).

El conocimiento detallado del combustible resulta fundamental en tres etapas del manejo de incendios forestales. En la prevención, permite anticipar el comportamiento del fuego mediante la caracterización de tipologías y humedad. Durante la extinción, facilita la predicción de propagación para limitar el desarrollo de grandes incendios. Finalmente, en el escenario post-fuego, posibilita evaluar daños y planificar la restauración (Montealegre et al., s.f.).

Tipologías y modelos de combustible

De acuerdo con la presentación de Montealegre et al. (s.f., diapositiva 34), que sintetiza los trabajos de Rothermel (1972), Pyne (1984) y Arroyo et al. (2008), se distinguen dos categorizaciones fundamentales de combustibles forestales: (1) el "tipo de combustible", que corresponde a categorías o estructuras de vegetación con características de comportamiento similar ante el fuego (como matorrales, praderas o bosques nativos), y (2) el "modelo de combustible", entendido como la descripción numérica de parámetros físicos (longitud de llama, velocidad de propagación, intensidad de la línea de fuego) utilizados para modelar matemáticamente la dinámica de propagación según las características del combustible.

Los modelos de combustible consisten en una clasificación de la vegetación considerando su influencia en las variables de propagación de los incendios forestales. Estos modelos están caracterizados por una serie de parámetros cuantitativos y/o cualitativos que los identifican y les confieren unas determinadas condiciones para la propagación (Blanco, 2016). Una de las principales aplicaciones de los modelos de combustible formar parte de los modelos de predicción de comportamiento del fuego, que de acuerdo con el investigador de incendios forestales Javier Blanco, (2016) consisten en una ecuación o conjunto de ecuaciones, que pronostican distintos aspectos del desarrollo de un incendio forestal en función de las propiedades de los combustibles, el tiempo atmosférico y la topografía. Estos modelos son resultado de la amplia variedad de combustibles existentes, su alta variabilidad temporal y espacial y la necesidad de conocer la propagación. (Montealegre et al., s.f.).

A nivel global existen diversas aproximaciones para la modelación. En cuanto a la caracterización de combustibles, destacan los modelos estándar estadounidenses (NFFL y FBFM de Scott y Burgan), el sistema FCCS y el sistema canadiense FBP. Estos modelos alimentan sistemas de predicción del comportamiento, tales como el software BehavePlus, el simulador espacial Prometheus (usado en Europa y Canadá) y, en el caso de Chile, el sistema KITRAL.

Este último cuenta con 31 modelos de combustible propios (Julio et al., s.f.), cada uno caracterizado por diferentes valores de carga de combustible por área, poder calorífico y

resistencia al control (capacidad de combate necesaria para apagarlos), además de otros atributos que se encuentran estandarizados para determinadas condiciones de pendiente, viento y capacidades operativas.

En este contexto, resulta necesario establecer el concepto operativo de 'Condiciones del Combustible' como un sistema de evaluación integrado que incorpora los principales factores que influyen en el comportamiento del fuego: (1) Vigor vegetacional y humedad del combustible, representada por una batería de siete índices espectrales (NDVI, NDWI, NDMI, NBR, MSAVI2, MSI, y VARI) que capturan tanto la humedad de la vegetación viva como la de los combustibles muertos, así como el vigor vegetacional y vigor vegetacional corregido; (2) Estructura vertical, representada por la altura del dosel como indicador indirecto de la distribución vertical del combustible y su potencial carga energética; (3) Tipo de combustible, derivado de categorías de uso de suelo que reflejan la composición y estructura de la vegetación; y (4) Variables topográficas, considerando altitud, pendiente y orientación. Estas variables, constituirán la base de las vinculaciones estadísticas a realizar en este trabajo. Se detallará más sobre esto en la metodología."

3. Megaincendios: Definiciones, características y principales factores que inciden en su ocurrencia

3.1. Definiciones y caracterización de megaincendios

Los megaincendios han emergido como un tema clave en la investigación científica, aunque no existe una definición única y clara. Un metaanálisis llevado a cabo por Linley et al. (2022) encontró que la mayoría de las definiciones, un 85%, se basan en el área quemada, que varía desde más de 100 hectáreas en Europa hasta más de 100.000 en Norteamérica. Estos autores sugieren que un megaincendio posee un umbral de 10.000 hectáreas, originándose por una única ignición o por varias igniciones relacionadas (p. 1912). Sin embargo, este enfoque de tamaño contrasta con enfoques que enfatizan el comportamiento extremo del fuego, como el propuesto por Tedim et al. (2018) que define a los eventos extremos de incendio (EWE) como "fenómenos piroconvectivos con intensidades superiores a 10.000 kW/m y tasas de propagación >50 m/min, capaces de generar *spotting* (lluvia de pavesas) a más de 1 km de distancia" (p. 9). Esta dualidad conceptual refleja la complejidad del fenómeno: Linley et al. (2022) proponen una clasificación según el tamaño (megaincendio >10.000 ha, gigaincendio >100.000 ha, teraincendio >1.000.000 ha), mientras que Tedim et al. (2020) resalta que el carácter de "extremo" depende del fuego y de la vulnerabilidad del territorio afectado (p. 15). La integración de ambos enfoques resulta crucial, ya que, como señalan estos estudios, un incendio puede superar las 10.000 hectáreas sin generar una nube piroconvectiva (lo cual es común en sabanas), mientras que incendios de menor envergadura como el de Attica (1.276 ha), pueden ser devastadores por su comportamiento extremo y contexto de alta vulnerabilidad (Tedim et al., 2018, p. 9; Linley et al., 2022, p. 1914).

Los eventos extremos de incendio forestal (EWE) pueden clasificarse según determinados parámetros de comportamiento del fuego, siguiendo la propuesta de Tedim et al. (2018) que establece una escala de gravedad similar a las utilizadas para tornados (escala Fujita) o huracanes (escala Saffir-Simpson). Esta clasificación distingue entre incendios normales (dentro de la capacidad de supresión convencional) y EWE, los cuales superan la capacidad de control y presentan características excepcionales. Los criterios clave incluyen: (1) parámetros medibles en tiempo real como la intensidad de la línea de fuego (FLI >10.000 kW/m) y tasa de propagación (ROS >50 m/min); y (2) manifestaciones observables de comportamiento extremo como formación de pyroCb, corrientes descendentes, *spotting* (lluvia de pavesas) a larga distancia (>1 km) y longitudes de llama excepcionales (>3 m) (Tedim et al., 2018, p. 11).

Estos fenómenos exhiben dos patrones fundamentales de propagación: los incendios *wind-driven* (impulsados por viento), donde la dinámica de crecimiento del incendio está dominada por vientos superficiales intensos (>80 km/h) que determinan la dirección y velocidad de avance; y los *plume-driven* (impulsados por columnas convectivas), donde la liberación masiva de calor genera su propia circulación atmosférica independiente del viento superficial, formando columnas convectivas que pueden alcanzar la tropopausa (Castellnou et al., 2018). Particularmente relevante resulta la formación de nubes piroconvectivas. La piroconvección corresponde una convección potenciada, dado que los incendios de gran intensidad liberan gran cantidad de calor y vapor de agua a la atmósfera, a su vez esta humedad al condensarse aporta calor latente, produciendo pirocúmulos (pyroCu), (Dowdy et al., 2019) y en casos más extremos, pirocumulonimbus (PyroCb), cuando estas tienen un desarrollo vertical considerable. que incluso pueden dar lugar a rayos (Tedim et al, 2018 p.9), si bien no está del todo clara la microfísica de estas nubes generadoras de llamas (Duane et al, 2021) se sabe que el calor generado por los incendios puede ascender formando estos pirocumulos, los cuales al colapsar generan corrientes descendientes que contienen pavesas que generan nuevos focos de incendios (Duane et al, 2021).

En definitiva, y centrándonos en los parámetros del comportamiento del fuego que definen a los EWE, La siguiente tabla resume los criterios propuestos para la clasificación de EWE de acuerdo con Tedim et al (p.9)

Tabla 1.

Clasificación de los incendios basada en el comportamiento del fuego y la capacidad de control

Categoría de Fuego	Parámetros del comportamiento del fuego medibles en tiempo real			Manifestaciones Observables en tiempo real de Comportamiento del fuego Extremo				Tipo de fuego y capacidad de control
	Longitud de llama (kW/m)	Tasa de propagación (m/min)	Longitud de llama(m)	PyroCb	Corrientes descendentes	Actividad de spotting	Distancia de spotting (m)	
1 (Incendio normal)	<500	<5a <15b	<1,5	Ausente	Ausente	Ausente	0	Fuego superficial (control fácil)
2 (Incendio normal)	500–2.000	<15b	<2,5	Ausente	Ausente	Baja	<100	Fuego superficial (control moderado)
3 (Incendio normal)	2.000–4.000	<20c <50d	2,5–3,5	Ausente	Ausente	Alta	100	Fuego superficial/ torching (muy difícil)
4 (Incendio normal)	4.000–10.000	<50c <100d	3,5–10	Poco probable	En algunos casos localizados	Prolífero	500–1.000	Fuego superficial/ crowning (extremadamente difícil)
5 (EWE)	10.000–30.000	<150c	10–50	Posible	Presente	Prolífico	>1.000	Fuego de copa, crecimiento por spotting (virtualmente imposible)
6 (EWE)	30.000–100.000	<250d	50–100	Probable	Presente	Masivo	>2.000	Fuego plume-driven, crecimiento caótico (imposible)
7 (EWE)	>100.000	>300	>100	Presente	Presente	Masivo	>5.000	Tormenta de fuego, frentes no organizados (imposible)

Fuente: Tedim et al, 2018

Dentro de la literatura revisada de incendios encontramos múltiples definiciones referidas a estos eventos de dimensiones e impactos colosales. Para efectos de esta tesis, nos centraremos en los conceptos que han sido correctamente definidos y caracterizados: EWE y megaincendios, por su relevancia en la comprensión de la dinámica y gravedad de los recientes eventos ocurridos en Chile, foco central de este trabajo.

No obstante, también es fundamental aclarar otros conceptos recurrentes en la literatura:

Fire disaster (desastre de incendio forestal): Según Linley et al. (2022), los incendios se consideran desastres cuando cumplen al menos uno de los siguientes criterios: (a) causan víctimas humanas (civiles o bomberos), (b) destruyen viviendas primarias, o (c) son declarados "desastre" por los gobiernos. Este concepto prioriza los impactos socioeconómicos sobre el tamaño (p. 1914).

Environmentally extreme fires (incendios ambientalmente extremos): Incendios que superan los parámetros históricos en dimensiones como tamaño o intensidad, evaluables mediante teoría de valores extremos (Katz et al., 2005; Gaines & Denny, 1993).

Extreme wildfire seasons (temporadas extremas de incendios): Temporadas con áreas quemadas anómalas producto de múltiples igniciones no relacionadas (Duane et al., 2021).

Finalmente, aunque el término 'tormenta de fuego' es frecuente en medios y documentos oficiales (BBC, 2019; Subsecretaría del Interior, 2017), carece de definición científica consensuada. Los términos "tormenta de fuego" y "*firestorm*" son usados entre comillas en la mayoría de los textos donde aparecen y son excluidos de revisiones sistemáticas como la de Linley et al. (2022), empleándose más como descriptor coloquial de comportamiento piroconvectivo extremo (Fromm et al., 2006) que como categoría científica rigurosa. Por esta razón, este trabajo priorizará la clasificación de eventos como EWE y megaincendios según los criterios establecidos por Linley et al. (2022) y Tedim et al. (2018).

3.2. Principales factores que inciden en la ocurrencia de megaincendios

Ya que hemos revisado las definiciones y abordado la caracterización de estos eventos de megaincendios y EWE, entraremos a comprender cuáles son los principales "*drivers*" o factores que inciden en la ocurrencia de estos fenómenos recientes y desproporcionados, tanto a nivel global como a escala local.

Factores globales

Los autores Duane et al. (2021) identifican una serie de factores climáticos y antrópicos que explican la aparición de megaincendios en lugares donde nunca los hubo. Entre ellos, cabe destacar, en primer lugar, las alteraciones sobre la estabilidad atmosférica que empeoran los eventos piroconvectivos; seguido por las recientes interacciones producidas por sequías y eventos de vientos, como los huracanes. Un tercer factor crucial es el aumento del estrés vegetacional a causa de las altas temperaturas y el déficit hídrico, lo que deriva en una mayor disponibilidad de combustible a nivel planetario, pero por sobre todo en climas templados como los ecosistemas mediterráneos. Este incremento de combustible contribuye, a su vez, a la prolongación de la temporada de incendios a nivel mundial; al respecto, estos autores señalan que un cuarto de la superficie vegetada de la Tierra ha visto extendida su temporada. Finalmente, interactuando con el clima, existen mecanismos socioecológicos vinculados al cambio global que incrementan los impactos de los megaincendios: entre ellos, se incluyen el abandono de tierras, que favorece las acumulaciones de combustible; la presencia de plantaciones de especies introducidas e inflamables a gran escala en países como Chile y Portugal; la fragmentación del paisaje, que genera nuevos focos de ignición debido al tránsito vehicular en autopistas, las quemas agrícolas e incendios de interfaz urbano-forestal; y, finalmente, las fuertes estrategias de supresión de incendios, que paradójicamente favorecen acumulaciones de combustible, entre otros elementos.

Factores climáticos en Chile central

El cambio climático antropogénico (IPCC, 2023) ha elevado la temperatura global en +1,1°C desde 1850, intensificando las condiciones para incendios. En Chile central, esto se manifiesta a través de una megasequía prolongada con un déficit hídrico del 40% desde 2010 (CR2, 2023; González et al., 2018) que persiste hasta hoy, junto con olas de calor recurrentes (+1,5°C sobre lo normal) y un aumento proyectado del 14% en incendios extremos para 2030 bajo un escenario de +1,5°C (IPCC, 2023).

A escala regional, históricamente el sistema El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) modula los patrones climáticos (Urrutia-Jalabert et al., 2018) mediante dos mecanismos interrelacionados: durante la fase de El Niño se observa un aumento significativo de precipitaciones invernales (González, 2010) que promueve acumulación de biomasa vegetal, la cual al año siguiente, especialmente si sigue una fase de La Niña, se convierte en combustible altamente inflamable debido a las condiciones secas.

Asimismo, el estudio de Urrutia-Jalabert et al. (2018) revela que los incendios en Chile central y sur responden a un sistema climático más complejo. Si bien el ENSO es importante, particularmente en el centro-norte donde explica hasta el 43% de la variabilidad interanual en área quemada, la Oscilación Antártica (AAO) emerge como el driver más determinante en el centro-sur, donde su fase positiva en invierno-primavera explica hasta el 67% del área quemada ($r=0.67$) al reducir precipitaciones y aumentar temperaturas. Esto se debe a que la AAO+ intensifica los vientos del oeste y desplaza hacia el sur los sistemas frontales. Las temperaturas máximas muestran correlaciones más fuertes con el área quemada hacia el sur ($r=0.72$ en Los Lagos vs. 0.48 en Valparaíso), donde la vegetación más densa es más sensible al estrés hídrico.

Sobre esta base histórica, como demostró Cordero et al. (2024) en su análisis específico de los megaincendios de 2023, la región Niño 1+2 del Pacífico oriental juega un papel determinante. En este evento, anomalías positivas de temperatura superficial del mar coincidieron con incendios intensos mientras persistían condiciones de La Niña en la región Niño 3.4, generando una configuración atmosférica que intensificó los vientos del este secos (Puelche) y procesos de subsidencia.

Finalmente, las proyecciones bajo el escenario RCP8.5, el peor caso de emisiones de gases de efecto invernadero donde se mantiene un uso intensivo de combustibles fósiles que conduce a un aumento de $+4,5$ °C hacia 2100 (IPCC, 2021), indican reducciones de hasta un 40% en precipitaciones invernales y aumentos de $+4$ °C en verano para 2050, extendiendo la temporada de incendios en 67 días (Ciocca et al., 2023).

Factores socioecológicos

La Es precisamente en este marco de extrema fragilidad climática donde los factores socioecológicos y las fuentes de ignición antrópica se amplifican, transformando focos menores en catástrofes. La megasequía post-2010 es la prueba empírica de esta interacción: en el curso de este fenómeno, entre 2010 y 2023, el número de incendios mayores a 200 ha aumentó un 27% y el área quemada un 69% (CONAF, 2023), según datos oficiales de la Corporación

Nacional Forestal. Si bien el clima impulsa la severidad, la ignición sigue siendo predominantemente humana: las estadísticas de CONAF (2023) detallan que el 65% de los incendios se deben a negligencias (ej. quema de basura) y el 33% a causas intencionales.

Por otro lado, la exposición humana al fuego ha aumentado significativamente. En la zona mediterránea de Chile, cerca del 25% de la población urbana habita en interfaces urbano-rurales (Wildland-Urban Interface, o WUI), donde el riesgo de incendio es alto debido a la proximidad entre viviendas y vegetación inflamable. Según Sarricolea et al. (2020), aproximadamente 55.680 personas fueron afectadas por incendios forestales en estas zonas entre 2001 y 2017, concentrándose el 50% de esta población en la Región del Biobío. Esta convergencia entre vegetación inflamable y presencia humana plantea riesgos severos no solo ecológicos, sino también sociales y económicos, complicando aún más las estrategias de prevención y control.

Esto, combinado con el actual modelo de plantaciones y el crecimiento de las zonas WUI, dichos factores anticipan temporadas de incendios más extensas, intensas y precoces, desafiando los modelos predictivos globales y requiriendo políticas urgentes de adaptación al nuevo escenario. En este contexto, el paisaje del centro-sur de Chile presenta una creciente dominancia de plantaciones forestales de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, cuyo rol específico en la propagación del fuego ha generado un intenso debate científico que se aborda en la siguiente sección.

3.3 El rol de los monocultivos forestales como propagadores de incendios

El paisaje forestal de las regiones de Maule, Biobío, Ñuble y La Araucanía ha experimentado cambios profundos durante las últimas cuatro décadas, caracterizados históricamente por la expansión de plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*. No obstante, si bien análisis recientes indican que la superficie total plantada ha experimentado pocos cambios durante la última década (Cordero et al., 2024), la masa forestal existente constituye una alta carga de combustible. Estas especies exóticas ocupan aproximadamente 3.12 millones de hectáreas, equivalentes al 17.37% de la superficie forestal del país (Corporación Nacional Forestal [CONAF], 2023). Pese a esta estabilización superficial, las plantaciones forestales han representado aproximadamente el 30% del área quemada en eventos de gran magnitud (Cordero et al., 2024). Esta desproporción plantea interrogantes urgentes sobre los mecanismos que vinculan el tipo de combustible con la propagación y severidad del fuego.

El caso portugués

El debate sobre el rol de las plantaciones de eucalipto en los incendios forestales no es exclusivo de Chile. En Portugal, donde los eucaliptos cubren aproximadamente 812.000 hectáreas (26% de la superficie forestal), Fernandes et al. (2019) analizaron la relación entre la expansión de *Eucalyptus globulus* y el área quemada durante el período 1980-2017. Mediante un enfoque de modelación estadística que combinó regresión lineal múltiple con modelos de *splines* cúbicos para interpolar datos de cobertura vegetal, los autores evaluaron la contribución relativa de variables climáticas y de vegetación sobre la variabilidad interanual del área quemada.

Los resultados revelaron que las variables climáticas, particularmente el percentil 95 del *Fire Weather Index* (FWI), explicaban el 72% de la varianza en el área quemada ($\beta = 0,527$, $p < 0,0001$), mientras que las métricas de eucalipto no mostraron efectos significativos después de controlar por otras variables ($p = 0.8443$). Este hallazgo fue respaldado mediante análisis de severidad de quema utilizando el *Relative differenced Normalized Burn Ratio* (RdNBR) derivado de imágenes *Sentinel-2*. Comparando tipos de vegetación mediante modelos lineales mixtos con contrastes post-hoc de Tukey HSD, los eucaliptales exhibieron una severidad ligeramente menor (índice de severidad = 2.60) que los pinos marítimos (2.73), aunque las diferencias absolutas en RdNBR fueron mínimas (1043 vs. 1147).

Fernandes et al. (2019) atribuyeron la ausencia de efecto significativo de los eucaliptos principalmente a los siguientes factores: Primero, la expansión de eucaliptos en Portugal reemplazó mayormente vegetación más inflamable: del incremento de ~480.000 hectáreas entre 1970 y 1995, el 44.7% provino de áreas previamente ocupadas por pino marítimo (*Pinus pinaster*), el 23.7% de matorral, el 19.8% de tierras agrícolas y el 10.8% de encinares perennifolios, principalmente Alcornoque (*Quercus suber*) y Encina (*Quercus rotundifolia*). Este reemplazo de combustibles más inflamables por eucaliptos podría explicar, en parte, por qué su expansión no incrementó el área quemada a escala regional. Segundo, las variables climáticas, particularmente las condiciones meteorológicas extremas medidas por el FWI, dominaron sobre las características del tipo de vegetación en la determinación del área quemada interanual.

No obstante, los autores reconocieron importantes limitaciones y complejidades en la caracterización del efecto de las plantaciones. Respecto al manejo forestal, señalaron que si bien las plantaciones industriales reciben tratamiento de combustibles a una tasa anual del 14.1% entre 2002-2017 (CELPA, 2018), esta cifra representa solo una fracción del patrimonio total de eucaliptos. En 2005, el 47% de las plantaciones se encontraba en forma de rodales mixtos o

irregulares, y el 21% superaba la edad de rotación, implicando cargas de combustible aumentadas. Asimismo, los autores destacaron la dificultad de cuantificar el abandono de plantaciones, variable crítica para la acumulación de combustibles a largo plazo, reconociendo que el patrimonio no manejado o abandonado, especialmente después de temporadas de grandes incendios, constituye una preocupación para el futuro. Además, el análisis a escala regional podría enmascarar efectos locales donde las plantaciones de eucalipto efectivamente incrementan el riesgo de incendio bajo condiciones específicas de manejo y configuración del paisaje.

El caso chileno

La situación documentada en el Chile central presenta contrastes marcados con el caso portugués. Bowman et al. (2018) analizaron los megaincendios de enero-febrero 2017, que consumieron más de 500.000 hectáreas en Chile central bajo condiciones meteorológicas extremas que incluyeron temperaturas récord y valores de FWI sin precedentes en el registro de reanálisis ERA-Interim (1979-2017). Mediante superposición geoespacial de perímetros de incendio validados por CONAF con cartografías de uso de suelo (Zhao et al., 2016), los autores cuantificaron la distribución del área quemada por tipo de cobertura.

Los resultados revelaron que las plantaciones de *Pinus radiata* (31% del área quemada) y *Eucalyptus spp.* (12%) concentraron el 44% del área total incendiada, a pesar de constituir solo el 14% de la cobertura vegetal regional. Esta desproporción fue estadísticamente significativa (χ^2 , $p < 0,0001$) y superó 3.1 veces lo esperado bajo un escenario de distribución aleatoria del fuego. Complementariamente, el procesamiento de anomalías del *Enhanced Vegetation Index* (EVI) derivado de sensores MODIS, analizadas mediante pruebas de Kolmogorov-Smirnov, reveló que las plantaciones exhibían pérdidas de biomasa significativamente mayores (anomalía media EVI = -0.19) en comparación con ecosistemas nativos adyacentes (EVI = -0.14). Las distribuciones de anomalías fueron estadísticamente diferentes ($p < 0,0001$), con las plantaciones mostrando una distribución sesgada hacia mayores pérdidas de biomasa.

McWethy et al. (2018) profundizaron en estos patrones de selectividad mediante análisis de datos satelitales MODIS para el período 2001-2017 en seis regiones administrativas de Chile central (32°-40° S). Utilizando datos de cobertura vegetal del Catastro de Recursos Vegetacionales Nativos de CONAF, los autores diferenciaron siete tipos de vegetación, incluyendo bosques esclerófilos nativos, bosques caducifolios de *Nothofagus spp.*, bosques mixtos, matorrales

mediterráneos, plantaciones forestales de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, y diversos usos agrícolas.

Para evaluar la selectividad de los incendios, los investigadores aplicaron el índice de Murdoch (Krebs, 1999), herramienta que compara la proporción de área quemada observada para cada tipo de vegetación con su disponibilidad espacial en el paisaje. Valores mayores a 1 indican preferencia (mayor probabilidad de incendio que lo esperado), mientras que valores menores a 1 señalan evitación. Los análisis revelaron que las plantaciones exóticas mostraron la mayor preferencia relativa en ambas zonas bioclimáticas estudiadas (Mediterránea y transición Mediterránea-Templada), con valores significativamente superiores a los bosques nativos. Los matorrales presentaron preferencia intermedia, mientras que los bosques de *Nothofagus* exhibieron los valores más bajos, indicando menor propensión a incendios en relación con su disponibilidad espacial. (Véase Anexo 1).

Estos hallazgos se sustentaron mediante modelos lineales generalizados que controlaron el efecto de variables climáticas (temperatura media anual, precipitación estacional, índice de aridez, índice de severidad de sequía) y topográficas (elevación, pendiente, índice de rugosidad). Los resultados demostraron que la probabilidad de ocurrencia de incendios en plantaciones exóticas superó significativamente ($p < 0.01$) a la observada en bosques nativos, incluso después de controlar el resto de las variables. Los autores propusieron tres mecanismos explicativos, aunque sin profundizar en los mismos: "(1) la estructura homogénea y altamente conectada de los parches de plantaciones forestales exóticas en comparación con algunos bosques nativos caducifolios (principalmente *Nothofagus spp.*), (2) la abundancia de fuentes de ignición antropogénicas, tanto accidentales como intencionales, adyacentes a las plantaciones forestales exóticas, y (3) la estructura del combustible y las características propensas al fuego de las plantaciones de *Eucalyptus* y *Pinus*, así como de los bosques esclerófilos nativos" (McWethy et al., 2018, pp. 16-17).

Gómez-González et al. (2019) analizaron la variabilidad temporal de los incendios mediante modelos de ecuaciones estructurales (SEM) aplicados sobre una malla de 3.643 celdas de 5×5 km en Chile central, comparando dos períodos (2000-2005 y 2011-2016). Esta metodología permitió sopesar cuantitativamente, mediante coeficientes estandarizados y caminos de causalidad, los efectos directos, indirectos y totales de variables de uso de suelo (bosque nativo, agricultura, plantaciones), climáticas (temperatura, aridez, sequía), topográficas y de presión humana sobre el número de incendios y el área quemada.

Los resultados revelaron que el uso agrícola, incluyendo quemas de rastrojos en rotación cultivo-pradera, tuvo el mayor efecto directo positivo sobre el número de incendios y área quemada en ambos períodos estudiados. En contraste, las plantaciones forestales mostraron un efecto significativo solo durante el primer período (2000-2005), mientras que en el segundo período (2011-2016) su efecto directo no fue estadísticamente significativo. Los bosques nativos exhibieron efectos negativos consistentes sobre la actividad de fuego en ambos períodos, representando una cobertura resistente al fuego. La temperatura media anual mostró el mayor efecto total (suma de efectos directos e indirectos) sobre ambas métricas de fuego, seguida por el uso agrícola y la presión humana. El análisis también evidenció persistencia espacial significativa ($p \approx 0.6$) entre períodos, indicando que áreas con mayor actividad de fuego en 2000-2005 mantuvieron esa condición en 2011-2016.

En el segundo período estudiado, las plantaciones perdieron significancia estadística. Gómez-González et al. (2019, p. 8) proponen que "la sequía extrema probablemente superó el umbral necesario para que las condiciones meteorológicas hicieran inflamable la vegetación; por lo tanto, el combustible se volvió menos relevante en la determinación de la actividad de fuego". Esto sugiere que durante períodos de sequía severa, como la megasequía 2010-2015 documentada por Garreaud et al. (2017), las diferencias entre tipos de combustible se minimizan debido a que toda la vegetación se deseca por igual.

Cordero et al. (2024) matizaron estos hallazgos al analizar los megaincendios de enero-febrero 2023, que consumieron más de 429.103 hectáreas en Chile central bajo condiciones caracterizadas por déficits de precipitación superiores al 50%, temperaturas hasta 2°C por encima de valores típicos, y valores de FWI hasta 100% sobre el promedio de largo plazo (1981-2010). Los autores emplearon dos estrategias analíticas complementarias con distintas categorizaciones de la vegetación.

Para el análisis de los megaincendios de 2023, utilizando datos del Catastro Vegetacional de CONAF y estadísticas de ODEPA, clasificaron la vegetación afectada en tres categorías amplias: bosques nativos, plantaciones forestales, y otras tierras no clasificadas. Mediante análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de diferencia de medias, los autores no encontraron diferencias significativas ($p > 0.16$) en el área total quemada entre bosques nativos y plantaciones forestales durante el evento de 2023 (véase Anexo 2), sugiriendo que bajo condiciones climáticas extremas, sequía, vientos Puelche, y teleconexiones ENSO, el tipo de vegetación tuvo un impacto menos determinante que los factores meteorológicos en la extensión total de los incendios. Las

comparaciones pareadas confirmaron que plantaciones y bosques nativos no difieren significativamente entre sí (véase Anexo 3).

La evidencia comparada revela que el efecto de las plantaciones forestales sobre el régimen de fuego depende del contexto climático y relativo a la escala de análisis. Mientras que en Portugal la expansión de eucaliptos no incrementó el área quemada a escala regional (Fernandes et al., 2019), en Chile se documenta una desproporción consistente bajo condiciones normales: las plantaciones concentraron el 44% del área quemada en 2017 a pesar de representar solo el 14% de la cobertura territorial (Bowman et al., 2018; McWethy et al., 2018). Sin embargo, esta desproporción aparentemente se diluye bajo condiciones meteorológicas extremas, cuando la sequía severa homogeniza la inflamabilidad entre tipos de vegetación (Gómez-González et al., 2019; Cordero et al., 2024).

Estos hallazgos subrayan que el debate sobre el rol de los monocultivos forestales en el régimen de fuego no admite respuestas simplificadas: su comportamiento depende de la interacción compleja entre características del combustible, configuración del paisaje, manejo forestal y, críticamente, las condiciones meteorológicas durante el evento. En este contexto de creciente frecuencia de megaincendios y condiciones climáticas extremas, resulta imperativo profundizar en la caracterización empírica del comportamiento del fuego en diferentes tipos de cobertura vegetal, integrando múltiples métricas que permitan diseñar estrategias de gestión territorialmente diferenciadas y basadas en evidencia.

A continuación, se presenta una tabla síntesis de los estudios anteriormente mencionados, que expone tanto las metodologías como los hallazgos y limitaciones de los mismos, (tabla 2).

Tabla 2.

Síntesis comparativa de estudios sobre plantaciones

Estudio	Contexto	Metodología	Resultado estadístico	Hallazgo principal	Discusión/Limitaciones
Fernandes et al. (2019)	Portugal, 1980-2017; 812.000 ha eucaliptos (26% superficie forestal)	Para evaluar efecto eucaliptos sobre área quemada: regresión múltiple con cobertura vegetal, clima (FWI), igniciones. Para comparar severidad entre tipos: RdNBR (<i>Sentinel-2</i>), modelos mixtos, Tukey HSD	Efecto eucaliptos: $p = 0,8443$ (NO significativo). Variables climáticas: $R^2 = 0,72$, FWI $\beta = 0,527$ ($p < 0,0001$). Severidad: RdNBR 1.043 vs. 1.147 (diferencia mínima)	Expansión eucaliptos NO aumentó área quemada a escala regional	Eucaliptos reemplazaron vegetación más inflamable (44,7% pino, 23,7% matorral). 47% plantaciones irregulares, 21% sobreedad. Abandono difícil de cuantificar
Bowman et al. (2018)	Chile central, enero-febrero 2017; >500.000 ha	Para cuantificar desproporción: superposición perímetros CONAF con uso suelo, test χ^2 . Para pérdida biomasa: anomalías EVI (MODIS), K-S test	Desproporción: χ^2 , $p < 0,0001$. 44% área quemada vs. 14% cobertura (ratio 3,1x). EVI: -0,19 (plantaciones) vs. -0,14 (nativos), $p < 0,0001$	Plantaciones concentraron área quemada desproporcionadamente y exhibieron mayor severidad	FWI récord histórico 1979-2017. Mayor pérdida biomasa en plantaciones. NO profundiza mecanismos causales
McWethley et al. (2018)	Chile central (32°-40°S), 2001-2017; Entre Valparaíso y Araucanía	Para selectividad por vegetación: Índice Murdoch área quemada vs. disponibilidad (MODIS MCD64A1). Para controlar variables confusoras: GLM con clima y topografía	Murdoch: Plantaciones ~1,4-1,6. Mixtos nativos-exóticos ~1,3-1,4. Matorrales ~1,2-1,3. <i>Nothofagus</i> <1,0. GLM: plantaciones >> nativos, $p < 0,01$	Plantaciones y mixtos mostraron mayor preferencia. <i>Nothofagus</i> evitación	Proponen 3 mecanismos: estructura homogénea, igniciones antropogénicas, características combustible.

Estudio	Contexto	Metodología	Resultado estadístico	Hallazgo principal	Discusión/Limitaciones
Gómez-González et al. (2019)	Chile central, 3.643 celdas 5x5 km; 2000-2005 vs. 2011-2016	Para efectos directos/indirectos sobre incendios: SEM con uso suelo, clima, topografía, presión humana	2000-2005: Plantaciones significativas, agricultura mayor efecto. 2011-2016: Plantaciones NO significativas, agricultura persiste. Temperatura = mayor efecto total. Persistencia espacial $R \approx 0.6$	Agricultura > plantaciones ambos períodos. Plantaciones significativas solo 2000-2005	"Sequía extrema superó umbral: combustible menos relevante". Bajo mega-sequía 2010-2015, diferencias minimizan
Cordero et al. (2024)	Chile central; Megaincendios enero-febrero 2023 (>420.000 ha) + análisis temporal 2000-2022	Para comparar, entre tipos forestales, clasificación en 3 grupos, + pruebas diferencia medias. Para evaluar si tipos responden diferencialmente a clima: correlaciones Pearson entre área quemada de cada grupo forestal (pino, eucalipto, árboles nativos, matorral, pastizales) (2000-2022) y variables climáticas (T° máxima, SST ENSO 1+2, FWI)	ANOVA 3 grupos: $p > 0,16$ (NO diferencias significativas en área total). Correlaciones por grupo (2000-2022): Eucaliptos (T° max $R=+0,6$; ENSO 1+2 $R=+0,5$); Pinos (T° max $R=+0,5$; ENSO 1+2 $R=+0,6$); Nativos (T° max $R=+0,6$; ENSO 1+2 $R=+0,5$). Niño 3.4 $R \approx 0$ para todos.	O diferencias significativas de área total entre tipos (2023), confirmando al clima como driver principal. El análisis desagregado desmiente la vulnerabilidad exclusiva del eucalipto: todas las coberturas (Pino, Eucalipto, Nativo) responden significativa y sincronizadamente al forzante Niño 1+2.	Bajo condiciones extremas (precipitación -50%, FWI +100%), el tipo de vegetación es menos determinante en el área total. La fuerte correlación transversal con el Niño 1+2 sugiere que el calentamiento costero actúa homogeneizando la inflamabilidad a escala de paisaje.

4. Herramientas utilizadas en el análisis de los megaincendios

El estudio de los megaincendios o EWE, en la actualidad se basa en la caracterización de sus diferentes variables (severidad, intensidad, comportamiento del fuego, condiciones del combustible, impactos, etc), mediante el estudio en terreno, pero por, sobre todo, de la utilización de modernas tecnologías de teledetección o percepción remota, así como de análisis estadístico. Las cuáles serán detalladas en la presente sección:

4.1. Evaluación de severidad mediante teledetección

La severidad de los incendios en general y de los megaincendios en particular requiere de la valiosa información proporcionada por plataformas Landsat (especialmente Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, y Landsat 8-9 OLI/TIRS) y *Sentinel-2* MSI. Estas plataformas permiten calcular el *Normalized Burn Ratio* ($NBR = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$), índice desarrollado específicamente para evaluar los efectos de incendios mediante el uso de bandas espectrales que responden de manera opuesta al paso del fuego (Key & Benson, 2006). La banda del infrarrojo cercano (NIR, 0,8-0,9 μm) disminuye su reflectancia después del incendio, mientras que la banda de infrarrojo de onda corta (SWIR, 1,5-2,5 μm) aumenta su reflectancia, proporcionando así una señal óptima para distinguir áreas quemadas (Key & Benson, 2006).

La versión diferencial de este índice (dNBR), calculada como la diferencia entre imágenes pre y post-incendio, permite clasificar la severidad del daño en siete categorías: rebrote alto (< -0,25), rebrote bajo (-0,25 a -0,1), no quemado (-0,1 a 0,1), gravedad baja (0,1 a 0,27), gravedad moderada-baja (0,27 a 0,44), gravedad moderada-alta (0,44 a 0,66) y gravedad alta (> 0,66) (Key & Benson, 2006).

Los autores Key y Benson (2006) desarrollaron una serie de protocolos y recomendaciones para clasificar y mapear las áreas quemadas, así como para validar los resultados en terreno. Según estos autores, el propósito fundamental del cálculo y mapeo de los índices NBR/dNBR trasciende la mera identificación de áreas quemadas, ya que permite cuantificar los impactos ecológicos del fuego, establecer líneas base para el monitoreo de la recuperación post-incendio y priorizar áreas para la restauración ecológica.

Sin ir más lejos, el estudio de Miranda et al. (2022) realizado para nuestro país desarrolló la "*Landscape Fire Scars Database*" (Base de Datos de "Cicatrices" de Incendios del Paisaje), un sistema pionero que reconstruye 8,153 eventos de quema, cubriendo el 66.6% de los incendios oficialmente registrados en Chile entre 1985 y 2018. Este trabajo, implementado mediante *Google Earth Engine*, generó cuatro productos clave para cada incendio: 1.- mosaicos Landsat

de imágenes pre y post incendio, 2.- mapas binarios de áreas quemadas, 3.- cálculo automatizado de índices de severidad (NBR, RdNBR), y 4.- archivos vectoriales geoespaciales con perímetros y clasificación de severidad.

4.2. Monitoreo de intensidad mediante sensores satelitales

El estudio de la intensidad en megaincendios se fundamenta en la integración de mediciones satelitales de última generación con los principios teóricos de comportamiento del fuego. Los sensores VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*), con su resolución espacial de 375 m en las bandas infrarrojas I4 (3.55-3.93 μm) e I5 (10.5-12.4 μm), representan un avance significativo en la detección de anomalías térmicas asociadas a incendios forestales. Como demostró Schroeder et al. (2014), este sensor puede identificar focos de hasta 1 MW de potencia radiante con una precisión superior al 95%, gracias a su algoritmo Fire Detection and Characterization (FDC) que discrimina eficientemente entre verdaderos incendios y artefactos térmicos como reflejos solares en superficies metálicas o espejos de agua, emisiones industriales (hornos, chimeneas), actividad geotérmica natural, y superficies urbanas con alta retención de calor (techos de asfalto, estructuras metálicas). Un parámetro clave derivado de estas mediciones es el *Fire Radiative Power* (FRP), que cuantifica la energía radiada por el fuego en MW y sirve como proxy para estimar la intensidad del incendio. Complementariamente, MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), aunque con menor resolución espacial (1 km en sus bandas 21/22 centradas en 4 μm), proporciona una cobertura temporal más frecuente (4 pasadas diarias frente a 2 de VIIRS), siendo fundamental para el monitoreo global de la actividad del fuego (Giglio et al., 2016).

La relación entre estas mediciones de FRP y el concepto clásico de intensidad de Byram (IB en kW/m) fue establecida experimentalmente por Johnston et al. (2017) en incendios controlados de escala media (<100 ha). Sus resultados determinaron que la fracción radiante (radF) de la energía total oscila entre 0.15-0.20, permitiendo estimar la IB a partir del FRP cuando se conoce la tasa de propagación (ROS). Sin embargo, como advierte Kremens et al. (2012), los megaincendios presentan características que desafían esta aproximación: frentes de llama no lineales, múltiples focos activos simultáneos, y extensas áreas de combustión lenta (smouldering). La combustión lenta es la forma de combustión sin llama y de baja temperatura más persistente, que se propaga lentamente a través de materiales combustibles porosos (como el mantillo o la turba) mediante una oxidación directa de la superficie sólida (Rein, 2016). Esta combustión latente reduce significativamente la eficiencia radiante, lo que se manifiesta particularmente en una subestimación de intensidad en frentes fragmentados.

No obstante, el uso de estas herramientas ha permitido avances significativos en el estudio de la intensidad en megaincendios, incluyendo: 1.- la generación de sistemas de alerta temprana basados en umbrales de FRP para detectar transiciones a comportamiento extremo (Schroeder et al., 2014); 2.- la calibración de modelos predictivos mediante la conversión de FRP a intensidad de Byram (IB) usando factores radiométricos validados experimentalmente (Johnston et al., 2017); y 3.- la evaluación en tiempo cercano al real de estrategias de supresión mediante el monitoreo de cambios en los patrones de FRP (Andela et al., 2019).

Cabe mencionar también la disponibilidad de otras opciones satelitales para el monitoreo de la intensidad, por ejemplo, GOES que aunque con menor resolución espacial (2 km vs. 375 m de VIIRS), ofrece una ventaja crítica en resolución temporal (datos cada 5-15 minutos), permitiendo capturar la dinámica horaria de los frentes de fuego. Otras alternativas como Himawari-8/9 (Asia-Pacífico) y Sentinel-3 SLSTR (Europa) complementan estas capacidades con diferentes balances entre resolución espacial y frecuencia de observación. Estas aplicaciones, pese a sus limitaciones técnicas, han revolucionado el monitoreo y gestión operativa de incendios a gran escala (Andela et al., 2019), lo cual resulta fundamental al considerar la nueva escala y la severidad de los incendios asociados a los Eventos de Clima Extremo (EWE).

4.3. Caracterización de condiciones del combustible

Para poder caracterizar los megaincendios, así como los incendios en general, es necesario considerar las condiciones del combustible consumido en dichos eventos, las cuales ya definimos previamente en este trabajo y engloban estructura del combustible (categoría o tipología), condiciones de propagación como la topografía, condiciones dependientes de la climatología, fundamentalmente la humedad del combustible, así como el efecto de la presencia de especies invasoras.

Ante todo, las condiciones climáticas modulan drásticamente la humedad de los combustibles y la probabilidad de megaincendios. El *Fire Weather Index* (FWI) constituye un elemento fundamental del *Canadian Forest Fire Danger Rating System* (CFFDRS) para evaluar científicamente la interacción dinámica entre las condiciones meteorológicas y el estado de humedad de los combustibles forestales (National Wildfire Coordinating Group [NWCG], s.f.). Como sistema integrado de evaluación, el FWI cuantifica de manera precisa cómo los principales parámetros meteorológicos; temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y precipitación, modifican las propiedades físicas de los diferentes estratos de combustible, afectando directamente su inflamabilidad y potencial de propagación. La relevancia operativa de este índice queda demostrada en el estudio de Fernandes (2019) sobre incendios en Portugal, donde se

estableció que valores FWI superiores a 50 generan un incremento significativo en el área quemada, evidenciando la particular sensibilidad de los combustibles finos (diámetro <1 cm) a condiciones meteorológicas extremas.

En el contexto específico de Chile central, McWethy et al. (2021) documentaron cómo los vientos catabáticos del este, asociados a sistemas de alta presión persistentes en el Pacífico suroriental, aceleran notablemente los procesos de secado de los combustibles. Cuando estos patrones de viento coinciden con valores FWI particularmente elevados, se crean las condiciones propicias para fenómenos extremos como la formación de pirocumulonimbos (pyroCb) y comportamientos del fuego de extraordinaria intensidad (Cordero et al., 2023). La estructura del FWI, según detalla el *National Wildfire Coordinating Group* (s.f.), refleja esta compleja relación combustible-meteorología mediante tres componentes principales: el FFM (Fine Fuel Moisture Code) que evalúa la humedad horaria de combustibles finos superficiales, el DMC (Duff Moisture Code) que monitorea las condiciones diarias del mantillo, y el DC (Drought Code) que responde a sequías prolongadas en combustibles profundos.

La capacidad del sistema FWI para integrar procesos meteorológicos a distintas escalas temporales explica su creciente implementación operativa en diversas regiones del mundo. Un ejemplo destacado es su aplicación en Córdoba, Argentina, donde se utiliza sistemáticamente para evaluar el estado actual y proyectado de los combustibles como base para la toma de decisiones en materia de prevención y combate de incendios (Dirección de Gestión de Riesgos de Córdoba, 2021). Si bien diversos estudios coinciden en que el sistema requiere ajustes regionales para adaptarse a tipos de combustible no forestales (Fernandes, 2019), su complementación con otras herramientas de monitoreo lo convierte en un elemento indispensable para la evaluación del riesgo de incendios, particularmente en el contexto actual de cambio climático donde las condiciones meteorológicas extremas son cada vez más frecuentes e intensas.

Los índices espectrales constituyen herramientas fundamentales en teledetección para cuantificar propiedades biofísicas de la vegetación mediante la relación matemática entre bandas del espectro electromagnético. Su construcción se basa en el principio de que las cubiertas vegetales presentan firmas espectrales características: alta absorción en el visible (por pigmentos como clorofila, con picos en 445 nm y 645 nm), elevada reflectancia en el infrarrojo cercano (debido a la estructura celular), y absorción variable en el infrarrojo de onda corta (SWIR, 1,3-2,5 μm) asociada al contenido de agua en tejidos (Chuvieco, 2008). Estos comportamientos permiten diseñar índices normalizados que minimizan efectos externos (iluminación, geometría

de observación) y maximizan la sensibilidad a parámetros específicos, como el vigor vegetal (NDVI), estrés hídrico (NDII) o humedad foliar (NDMI) (Félez-Bernal, 2023). Entre ellos, el NDMI (Normalized Difference Moisture Index), calculado como $(B8A - B11) / (B8A + B11)$ en Sentinel-2, destaca por su capacidad para detectar cambios en el agua foliar mediante la banda SWIR (B11 a 1,61 μm), donde el agua presenta marcadas bandas de absorción (Tanase et al., 2022). Este índice ha demostrado una correlación significativa ($R^2 = 0,63$) con mediciones in situ de humedad de combustible vivo (LFMC) en bosques mediterráneos, superando a otros índices ópticos cuando se combina con variables estructurales como la altura del dosel (Tanase et al., 2022). La eficacia del NDMI radica en su capacidad para aislar la señal de humedad independientemente de variaciones en pigmentación o cobertura, lo que lo convierte en un indicador robusto para evaluar el riesgo de ignición en sistemas forestales.

Complementando esta aproximación basada en sensores pasivos, la tecnología LIDAR (Light Detection and Ranging) ha transformado radicalmente el análisis de combustibles forestales mediante su capacidad para generar representaciones tridimensionales de alta precisión. Este sistema activo de teledetección emite pulsos láser en el espectro del infrarrojo cercano (1064 nm para aplicaciones topográficas) que, al interactuar con la vegetación y el terreno, permiten reconstruir la estructura vertical del bosque con errores cuadráticos medios inferiores a 30 cm en elevación (Montealegre et al., 2023, Principios básicos). La versatilidad de los sistemas LIDAR se manifiesta en sus diferentes configuraciones de plataforma: los sensores terrestres (TLS) destacan por su extraordinaria precisión (1-3 mm en distancias menores a 80 metros) y capacidad de escaneo omnidireccional, siendo particularmente útiles para validación de modelos y estudios a escala detallada (Montealegre et al., 2023, Plataformas y sensores LIDAR). Los sistemas aerotransportados (ALS), como el conocido NASA G-LiHT, operan desde plataformas aéreas generando nubes de puntos con densidades comprendidas entre 0,5 y 3 puntos por metro cuadrado, lo que los convierte en herramientas indispensables para inventarios forestales a escala regional (Montealegre et al., 2023, Aplicaciones LIDAR). En el ámbito satelital, la misión GEDI a bordo de la Estación Espacial Internacional representa un avance significativo, empleando pulsos láser a 1064 nm con huellas de 25 metros de diámetro para mapear variables estructurales clave como la altura del dosel y biomasa a escala global (Dubayah et al., 2022).

Entre las métricas más relevantes que se pueden derivar integrando metodologías basadas en LIDAR se encuentran la altura del dosel (CHM), obtenida mediante la diferencia entre modelos digitales de superficie y terreno (Vosselman & Maas, 2010, cap. 3); la densidad de combustible, estimada a través del índice de área foliar (LAI) calculado a partir de patrones de penetración del

láser (Kane et al., 2010, p. 21); y la continuidad vertical, cuantificada mediante el índice *rumple* que relaciona superficies reales y proyectadas (Kane et al., 2010, p. 25). Estas variables constituyen insumos fundamentales para modelos predictivos de comportamiento del fuego como el FCCS desarrollado por el Servicio Forestal de EE. UU., particularmente en lo que respecta a la evaluación del riesgo de transición de fuego superficial a copas (Montealegre et al., 2023, Aplicaciones LIDAR).

4.4. Análisis del rol de especies vegetales y monocultivos forestales

Como se discutió en la sección sobre el rol de los monocultivos forestales, esta línea de investigación ha cobrado particular relevancia en Chile y otras regiones con paisajes dominados por plantaciones exóticas. La caracterización de estas relaciones ha demandado el desarrollo de aproximaciones estadísticas y espaciales robustas, entre las cuales destacan los modelos de ecuaciones estructurales (SEM), los análisis espaciales de selectividad, y las técnicas de correlación multivariada.

Los modelos de ecuaciones estructurales (SEM) permiten cuantificar simultáneamente efectos directos, indirectos y totales de variables predictoras sobre métricas de actividad de incendios. Gómez-González et al. (2019) emplearon esta metodología sobre una grilla de 3,643 celdas de 5 × 5 km, evaluando coeficientes estandarizados y caminos de causalidad entre variables explicativas (uso de suelo, clima, topografía, presión humana) y variables respuesta (número de incendios y área quemada). Esta arquitectura permite descomponer mecanismos causales y cuantificar la persistencia espacial de patrones mediante coeficientes de autocorrelación ($\rho \approx 0.6$ entre períodos), revelando "puntos calientes" crónicos en el paisaje.

Para cuantificar la selectividad espacial, se utiliza la superposición georreferenciada de perímetros de incendio sobre cartografías de uso de suelo, evaluada mediante pruebas de chi-cuadrado (χ^2) para determinar si la afectación difiere del azar. Complementariamente, las diferencias en severidad entre coberturas se evalúan comparando las distribuciones de anomalías de índices espectrales (como EVI) mediante pruebas no paramétricas de Kolmogorov-Smirnov (Bowman et al., 2018)

El índice de Murdoch compara la proporción de área quemada observada con la disponibilidad relativa en el paisaje, generando valores entre -1 (evitación) y +1 (preferencia). Para evaluar estadísticamente estos patrones y controlar las variables confusoras (climáticas y topográficas), McWethy et al. (2018) complementaron este índice implementando una batería de modelos

predictivos que incluyó modelos lineales generalizados (GLM), modelos aditivos generalizados (GAM) y algoritmos de Random Forest.

Finalmente, los análisis de correlación multivariada permiten evaluar la sensibilidad específica de distintas coberturas ante variables meteorológicas. Cordero et al. (2024) emplearon esta aproximación mediante ANOVA y correlaciones de Pearson para vincular el área quemada de cada tipo de vegetación con forzantes climáticos específicos (como la temperatura superficial del mar ENSO y la temperatura máxima del aire). Esta desagregación metodológica resulta esencial para revelar patrones de asociación climática detallados que suelen permanecer ocultos en los análisis agregados a escala de paisaje.

4.5. Integración de *machine learning* y *Google Earth Engine* en el análisis de megaincendios

Para concluir esta sección sobre herramientas de análisis de megaincendios, es fundamental destacar el rol decisivo de dos tecnologías complementarias: el *machine learning* (ML) y *Google Earth Engine* (GEE). El ML ha revolucionado el estudio de estos fenómenos al permitir el análisis de patrones complejos en grandes conjuntos de datos multivariados. Como detallan Jain et al. (2020), estos métodos incluyen tanto algoritmos supervisados (Random Forests, Support Vector Machines - SVM, redes neuronales artificiales) como no supervisados (*clustering* K-means), diferenciándose de los modelos estadísticos tradicionales por su capacidad para identificar relaciones no lineales en datos de alta dimensionalidad. Sus aplicaciones abarcan desde la caracterización de combustibles y detección de incendios hasta la modelación de comportamiento del fuego y evaluación de impactos ecológicos, incluyendo el análisis de teleconexiones climáticas como ENSO.

La implementación práctica de estos avances analíticos ha sido posible gracias a plataformas como *Google Earth Engine* (GEE), que ofrece tres capacidades fundamentales: (1) procesamiento masivo en la nube de datos satelitales (P. ej.: cálculo continental de dNBR en minutos, como demostró Miranda et al. [2022] para Chile), (2) acceso a catálogos actualizados de imágenes Landsat, *Sentinel-2* y VIIRS con mínima latencia, además de a modelos climáticos como ERA5 y (3) interfaces programables que permiten implementar flujos de trabajo personalizados. Esta combinación representa un salto cualitativo en la investigación de megaincendios: mientras el ML revela interacciones complejas entre variables climáticas, de combustible y topográficas, GEE proporciona la infraestructura necesaria para validar y operacionalizar estos hallazgos, transformando conocimiento teórico en sistemas de alerta temprana y herramientas de gestión aplicables a diferentes escalas geográficas.

5. Caracterización detallada de los eventos de megaincendios ocurridos en Chile

Los megaincendios han marcado hitos trágicos en la historia reciente de Chile, destacando las temporadas de 2017 y 2023 como las más destructivas. En la presente sección se reseñan ambas, haciendo énfasis en la segunda, y en particular en los eventos Santa Ana y Santa Gertrudis, foco de este trabajo. Se presentan, a continuación, datos oficiales sobre extensión afectada, daños humanos y ecológicos, con énfasis en primer lugar en fuentes primarias como CONAF, Subsecretaría del Interior y SENAPRED, y en segundo lugar en estudios técnicos/científicos posteriores.

La temporada de incendios de 2017 fue la más catastrófica registrada hasta ese momento, con un total de 596,000 hectáreas quemadas, según datos de la Subsecretaría del Interior (2017). El 80% de esta superficie se consumió en solo un mes, entre el 14 de enero y el 14 de febrero. El costo humano fue de 11 personas fallecidas: 4 civiles, 3 brigadistas CONAF, 2 Carabineros, y 2 Bomberos.

Los megaincendios de 2017 dejaron 2.072 viviendas completamente destruidas y 311 con daños significativos entre las regiones de O'Higgins y Biobío, según el catastro oficial recogido por Galilea (2018, p. 62). La tragedia alcanzó su máxima expresión en Santa Olga (Maule), donde las llamas consumieron 859 hogares; todas las viviendas de la localidad, además de infraestructura pública esencial como escuelas y centros de salud (Catastro Inicial del Ministerio de Vivienda, 2017, citado en Galilea, 2018), registros basados en la Ficha Básica de Emergencia (FIBE) aplicada durante febrero de 2017.

En términos de vegetación afectada, de acuerdo con el informe técnico de CONAF (2017) en el cual se consideran los incendios ocurridos entre el 01 de enero y 10 de febrero del 2017 entre la IV y IX regiones. Se obtuvo que el área afectada total fue 518.174 ha, de las cuales el 54% corresponde a la región del Maule, le siguen las regiones de Biobío y O'Higgins con 19,2% (60.280,3 ha) y 17,4% (34.429 ha) respectivamente. Se obtuvo también que el subuso de suelo más afectado fue de plantaciones forestales 54,7%, respecto al sub-uso bosque nativo, se afectaron 89.347 ha (17,24%), (*Véase Anexo 5: Superficie afectada según vegetación y otros usos de suelo por incendios forestales entre las regiones de Coquimbo y La Araucanía*).

El evento más devastador fue "Las Máquinas", gigaincendio (o EWE) que arrasó 187,000 hectáreas en la Región del Maule y causó las 11 víctimas fatales reportadas ese año (Subsecretaría del Interior, 2017). Otros eventos relevantes de esa temporada fueron Nilahue-Barahona (46748 ha) y San Antonio (30443 ha), (Castillo Soto et al., 2019). Los tres dentro del

criterio de área que los clasifica como megaincendios de Linley et al. (2022), una cartografía que adjunta dichos eventos se puede apreciar en el Anexo 6 (*Véase Anexo 6: Detalle de los tres grandes incendios forestales que afectaron a Chile en la temporada 2017*).

Un detalle que llama la atención y que no puede dejar de mencionarse en este punto es el de las discordancias entre áreas quemadas y otros parámetros de caracterización de los eventos que existen en diversas fuentes. Esto es un factor con el que se debe lidiar a la hora de estudiar megaincendios, puesto que CONAF, que es el organismo oficial encargado de catastrar los incendios en Chile, utiliza protocolos cuyas metodologías detalladas no se encuentran completamente disponibles en los informes públicos, mientras que otros estudios utilizan metodologías que se pueden considerar igualmente válidas, aunque puedan discrepar. Ejemplo de ello es el estudio de De la Barrera et al. (2018), que al calcular el área afectada por los incendios de dicha temporada obtuvieron dos resultados distintos: 529,794 ha (valiéndose de imágenes LANDSAT y considerando una superficie plana) y 555,381 ha (utilizando LANDSAT pero tomando en consideración la rugosidad del terreno), y un tercer cálculo, utilizando un insumo de resolución más gruesa de MODIS de 500m (Landsat cuenta con 30m de resolución), dio como resultado una superficie de 475,075 ha. Adicionalmente, Las cifras pueden variar cuando se consultan informes técnicos elaborados durante la emergencia o datos de estadísticas oficiales consolidadas, por estas razones, no cabe extrañarse que los resultados de áreas, severidades, impactos de los eventos, características del comportamiento del fuego de dichos Incendios entre otros parámetros de estos fenómenos que son los megaincendios y/o EWE puedan resultar diferentes según la metodología aplicada y fuentes consultadas.

Retomando el evento más importante de la temporada 2017, “Las Máquinas”, evento que arrasó la localidad de Santa Olga, (*Véase Anexo 7: Cartografía de Severidad de incendio Las Máquinas*). exhibió un comportamiento extremo (EWE) según los criterios de Tedim et al. (2018), superando los 100.000 kW/m de intensidad en su punto crítico (25-26 de enero de 2017), valor que quintuplica el umbral de 10.000 kW/m establecido para eventos extremos de incendios. Durante 14 horas consecutivas, el fuego avanzó a una velocidad media de 8.200 ha/h, consumiendo 114.000 ha en ese periodo, con pulsos de viento de 100-120 km/h que derribaron árboles y produjeron fuego de copas (Castellnou et al., 2017).

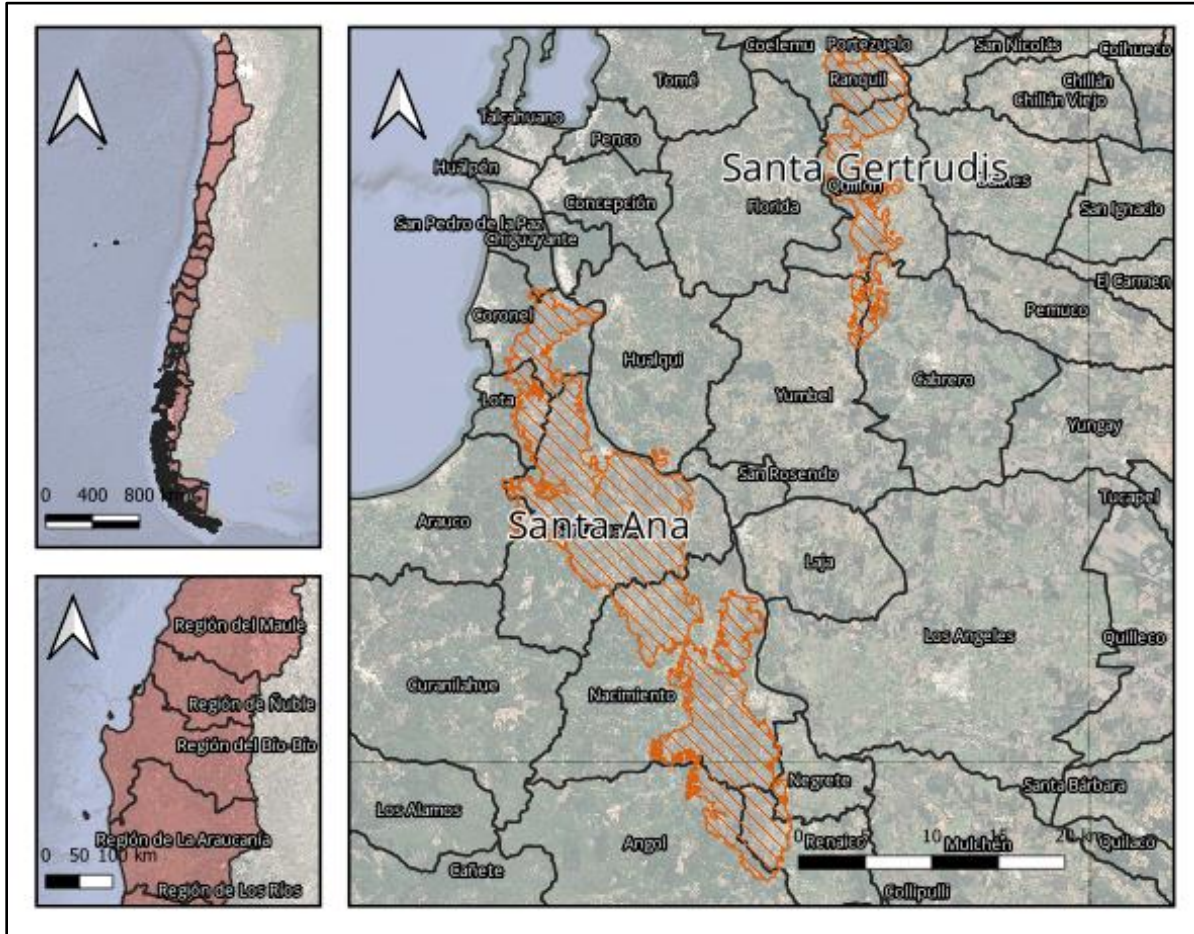
La temporada de incendios 2023 se consolidó como la segunda más extensa en Chile, con 429.103 hectáreas afectadas según el registro histórico de CONAF (s.f.-b). El Consolidado de incendios forestales relevantes de SENAPRED (2023) reportó 25 víctimas fatales, con la

siguiente distribución regional: 16 fallecidos en Biobío, 8 en La Araucanía y 1 en Ñuble. Dicho informe da cuenta de 1.987 viviendas destruidas, 1.405 en Biobío, 348 en Ñuble y 230 en La Araucanía, 7038 Damnificados; 5458 en Biobío, 927 en Ñuble y 657 en La Araucanía, 6 establecimientos educacionales destruidos en Biobío y 6 en La Araucanía, entre otros daños a infraestructuras. El impacto económico total alcanzó US\$880 millones, según estimaciones del Banco Central citadas en el mismo informe, distribuidos en reconstrucción de infraestructura (US\$320 millones), viviendas (US\$285 millones) y compensaciones al sector productivo (US\$275 millones). Los Incendios más grandes de la temporada de acuerdo con dicho informe (actualizado hasta el 17/02/2023), fueron "Santa Ana" (Nacimiento, Biobío), con 64,856 hectáreas consumidas hasta ese momento, seguido, "El Cortijo" (Florida-Penco-Tomé, Biobío), que arrasó 26,980 hectáreas. El incendio "Santa Gertrudis" (Quillón, Ñuble) quemó 23,122 hectáreas y "Casablanca 3" (Ninhue) afectó 13,125 hectáreas. (SENAPRED, 2023).

La justificación de la elección de Los eventos Santa Ana y Santa Gertrudis como foco del presente estudio es, en el Caso Santa Ana, el elevado coste humano, ecológico y económico que representó para la región del Biobío y en el caso Santa Gertrudis, a que este afectó al sitio prioritario para la conservación de la biodiversidad "Cerro Cayumanque" (MMA, 2023). A continuación, se presenta una cartografía con los eventos en cuestión, representados mediante la envolvente de incendios, enmarcados en el contexto regional con el detalle de las comunas afectadas (BCN, s.f.)

Figura 1.

Cartografía del Área de Estudio con perímetros envolventes de los eventos Santa Ana y Santa Gertrudis.



A continuación, se presenta una Tabla con las coordenadas de ambos eventos

Tabla 3.

Ubicación y coordenadas espaciales de los eventos estudiados:

Incendio	Oeste (m)	Este (m)	Sur (m)	Norte (m)
Santa Ana	666260	710260	5819380	5908720
Santa Gertrudis	714873.28	727433.04	5899415.20	5944648.99

A modo de cierre de esta sección, se presenta el análisis integral desarrollado por la Corporación Nacional Forestal (CONAF, 2023) en su informe técnico "Análisis de las condiciones de peligrosidad a corto y mediano plazo para el periodo de alta ocurrencia de incendios forestales 2023-2024", documento obtenido mediante solicitud por Ley de Transparencia, donde se caracterizó exhaustivamente el incendio Santa Ana de febrero de 2023 como un Evento Extremo (EWE). Esta categorización se fundamentó en tres parámetros críticos: una intensidad térmica excepcional que superó los 110.000 kW/m en el frente de llama, una velocidad de propagación crítica que alcanzó 140 m/min (equivalente a 8.4 km/h), y una capacidad de control operacional limitada que se extendió por 48 horas continuas. El análisis de datos satelitales multispectrales (GOES, VIIRS, LANDSAT y SENTINEL) permitió generar isócronas que identificaron patrones de propagación con tasas máximas de 7.000 ha/h y avances extremos de 9 km en apenas 30 minutos, comportamiento asociado a fenómenos de convección intensa, turbulencia atmosférica y generación masiva de focos secundarios. Estos indicadores, integrados con modelos de combustibles y valores de poder calorífico, confirmaron la similitud estructural con el EWE de 2017 (Complejo Las Máquinas), ubicando al evento Santa Ana en las categorías 5 a 7 de la clasificación EWE según Tedim et al. (2018), es decir, completamente fuera de los parámetros de predicción y supresión convencionales. La interacción sinérgica entre vientos de alta intensidad y la topografía local potenció el desarrollo de una columna convectiva de fuego, consolidando este episodio como uno de los eventos piroconvectivos más severos registrados en la historia de incendios forestales en Chile. En los anexos (8, 9 y 10) se puede apreciar la progresión del evento.

III.- Metodología

1. Metodología objetivo específico 1: Caracterizar el daño asociado a los eventos en términos de severidad

Figura 2.

Diagrama metodológico OE1 para evento Santa Ana.

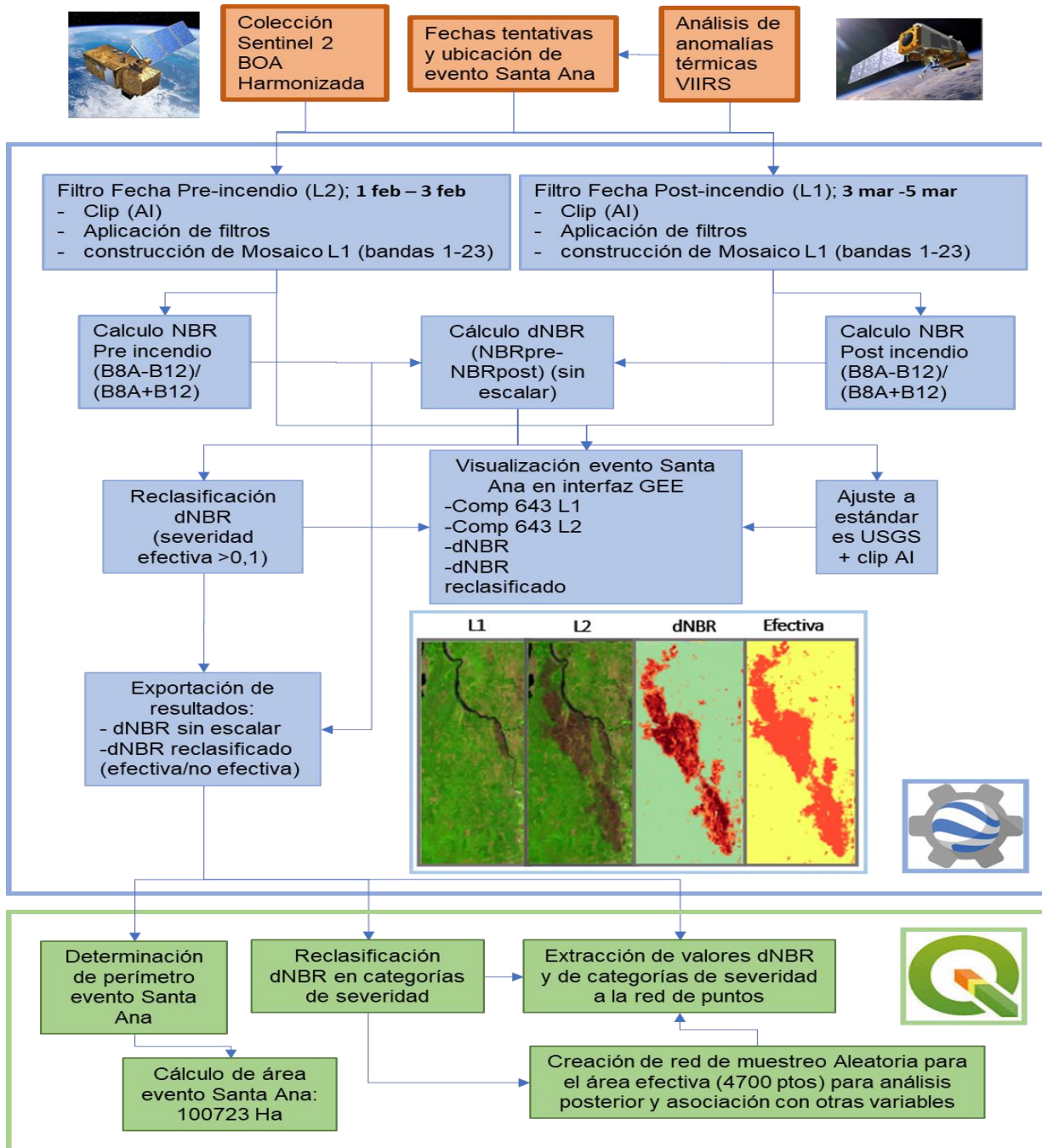
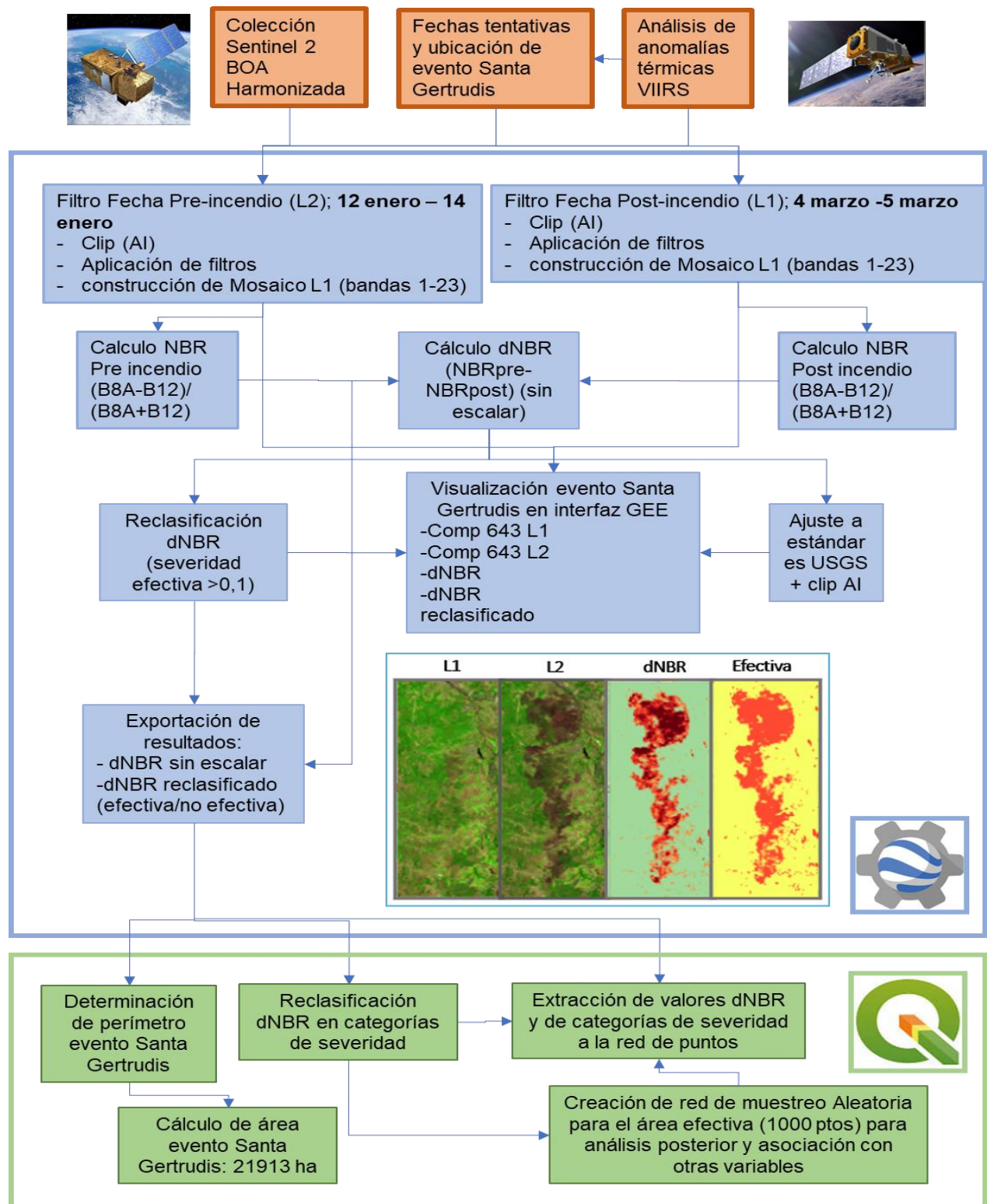


Figura 3.

Diagrama metodológico OE1 para evento Santa Gertrudis.



Obtención severidad mediante scripts en GEE

En los diagramas previos (Figuras 2 y 3) se expone de manera gráfica el procedimiento metodológico para obtener la severidad de los megaincendios Santa Ana y Santa Gertrudis. El trabajo se realizó en los entornos de *Google Earth Engine* y QGIS, principalmente. La colección de imágenes utilizada fue Harmonized *Sentinel-2* MSI, disponible en *Google Earth Engine* mediante el snippet: `ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED")`, la cual contiene imágenes del sensor multiespectral MSI de *Sentinel-2* a una resolución espacial de 20 metros, en su máximo nivel de corrección; *bottom of atmosphere* (BOA), y cuenta con imágenes a partir del 28 de marzo de 2017 (*Google Earth Engine*, s.f.). las bandas contenidas en dicho sensor se muestran en el anexo 11.

Se utilizó un script, disponible en *Google Earth Engine* mediante el enlace <https://code.earthengine.google.com/fa3cc3cce98172b6e58468527cfdcdfd> y en el repositorio GitHub <https://github.com/AnibalPardoHerrera/ScriptsTesisMegaincendios>. (Repositorio construido para este trabajo). Este script automatiza los procesos que se describen en los párrafos subsiguientes.

La fase inicial consistió en la identificación espaciotemporal de los eventos mediante: (1) shapefiles oficiales de CONAF que registraron para el incendio Santa Ana un período activo desde el 2 de febrero hasta el 6 de abril de 2023, y para Santa Gertrudis desde el 2 de febrero hasta el 26 de marzo de 2023 (CONAF, 2025); (2) análisis de anomalías térmicas VIIRS (Figuras 18 y 19); y (3) coordenadas de referencia (Tabla 3). Estas fechas no son las que directamente van en el script, pero ayudan a definir los lapsos pre y post-incendio que se introdujeron en el mismo, desviándonos levemente de las indicaciones del protocolo de Key & Benson (2006, pp. 26-29) para optimizar la selección de imágenes.

El script genera mosaicos aplicando tres filtros principales: intervalos de fechas (lapsos pre y post-incendio, L1 y L2, respectivamente), delimitación espacial mediante polígonos de área de interés, y porcentaje de nubosidad (<20%, con imágenes que en todos los casos presentaron valores inferiores al 17%). Para combinar las imágenes, se empleó el método `.max()`, que selecciona para cada píxel el valor de reflectancia más alto disponible, minimizando así la presencia de nubes en los mosaicos resultantes. Los lapsos temporales seleccionados se muestran en la tabla 4:

Tabla 4.*Adquisición de Imágenes Sentinel-2 (2023)*

Sitio	Período	Rango de Búsqueda (Fechas)	Fecha de Captura (Efectiva)	Imágenes Obtenidas
Santa Ana	Pre-incendio	2023-02-01 a 2023-02-03	2023-02-02	6
Santa Ana	Post-incendio	2023-03-03 a 2023-03-05	2023-03-04	6
Santa Gertrudis	Pre-incendio	2023-01-17 a 2023-01-19	2023-01-18	4
Santa Gertrudis	Post-incendio	2023-02-15 a 2023-02-18	2023-02-17	4

Si bien las fechas de las imágenes post incendio preceden a las fechas oficiales de extinción, se pudo constatar que prácticamente la totalidad del área quemada de los eventos fue considerada en los lapsos. Para el incendio Santa Gertrudis, el lapso entre las imágenes pre y post-incendio fue de 30 días (18 de enero al 17 de febrero), mientras que para Santa Ana fue de 30 días (2 de febrero al 4 de marzo), desviándonos levemente de las indicaciones del protocolo de Key & Benson (2006, p. 28), el cual, para la Evaluación Inicial (*Initial Assessment*) establece que la imagen pre-incendio "debe provenir generalmente de un período similar del año anterior", permitiendo el uso del mismo año únicamente para incendios de corta duración ("*short-lived*") donde ambas escenas se capturen en un lapso de 8 a 24 días. Dicha desviación se justifica por la disponibilidad de imágenes Satelitales, puesto que para ambos eventos se presentaron imágenes con poca cobertura nubosa en fechas cercanas a los eventos.

Los mosaicos generados, que incluyen todas las bandas espectrales de Sentinel-2 debidamente referenciadas (Véase anexo 11) (European Space Agency [ESA], 2015, pp. 53-54; Google Earth Engine, s.f.), sirvieron como base para el cálculo sistemático de los índices NBR correspondientes a los períodos pre y post-incendio. Posteriormente, se derivó el dNBR (differenced NBR) mediante la diferencia aritmética entre los valores NBR del período pre-incendio (L1) y post-incendio (L2), obteniéndose así un valor crudo que refleja los cambios espectrales asociados al impacto del fuego. Key y Benson (2006)

Para garantizar la coherencia metodológica con los protocolos de referencia, los valores de dNBR fueron escalados mediante su multiplicación por un factor de 1000, ajustándose así a los estándares establecidos por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) Key y Benson (2006, pp 31). Este producto intermedio, denominado dNBR escalado, fue sometido a un proceso de reclasificación dicotómica que permitió discriminar las áreas efectivamente quemadas de aquellas no afectadas, utilizando como umbral crítico el valor de 0.1. Esta reclasificación generó una capa binaria (dNBR efectivo) donde los valores superiores al umbral establecido fueron codificados como 1 (área quemada) y los inferiores como 0 (no quemado), proporcionando así una delimitación espacial precisa del impacto del incendio.

El script implementado en *Google Earth Engine* automatizó además la generación de representaciones visuales de los lapsos analizados (L1 y L2) mediante composiciones en falso color que emplearon las bandas B11, B8 y B4, facilitando la verificación cualitativa de los resultados. Como producto final, el proceso exportó de manera sistemática los siguientes elementos en formato GeoTIFF: los mosaicos originales de ambos lapsos (conservando las bandas espectrales a sus resoluciones nativas de 10m y 20m), la severidad en forma del dNBR absoluto escalado (valores de -2 a 2) y el dNBR reclasificado como capa binaria de severidad efectiva. Todos estos productos fueron posteriormente trasladados al entorno QGIS.

Generación de perímetros y cálculos de áreas

Una vez que se dispone del índice de severidad de quema no escalado (dNBR, con valores entre -2 y 2), las composiciones satelitales en falso color (bandas B11, B8 y B4), y la recalificación binaria de dicho índice, se procede a la obtención del área efectivamente quemada (severidad efectiva) mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG). Este proceso se llevó a cabo en dos etapas clave: en primer lugar, se poligonizó la recalificación binaria del dNBR y, posteriormente, los polígonos obtenidos fueron depurados en el entorno de QGIS para consolidar las áreas quemadas y eliminar errores de clasificación. En segundo lugar, también se contó con la envolvente de los eventos, estas delimitan un perímetro que incluye áreas quemadas e islotes no quemados dentro del siniestro. La elaboración de dichas envolventes se basó en las recomendaciones de Key y Benson (2006, pp. 35-36); es decir, tomando como referencia las composiciones en falso color y el dNBR como guía visual, digitalizando a una escala de 1:24000 e incluyendo un margen externo de 0.5 píxel para asegurar la inclusión total del daño.

Las áreas de los eventos basadas en la severidad efectiva como en la envolvente se muestran en la tabla 5.

Tabla 5.

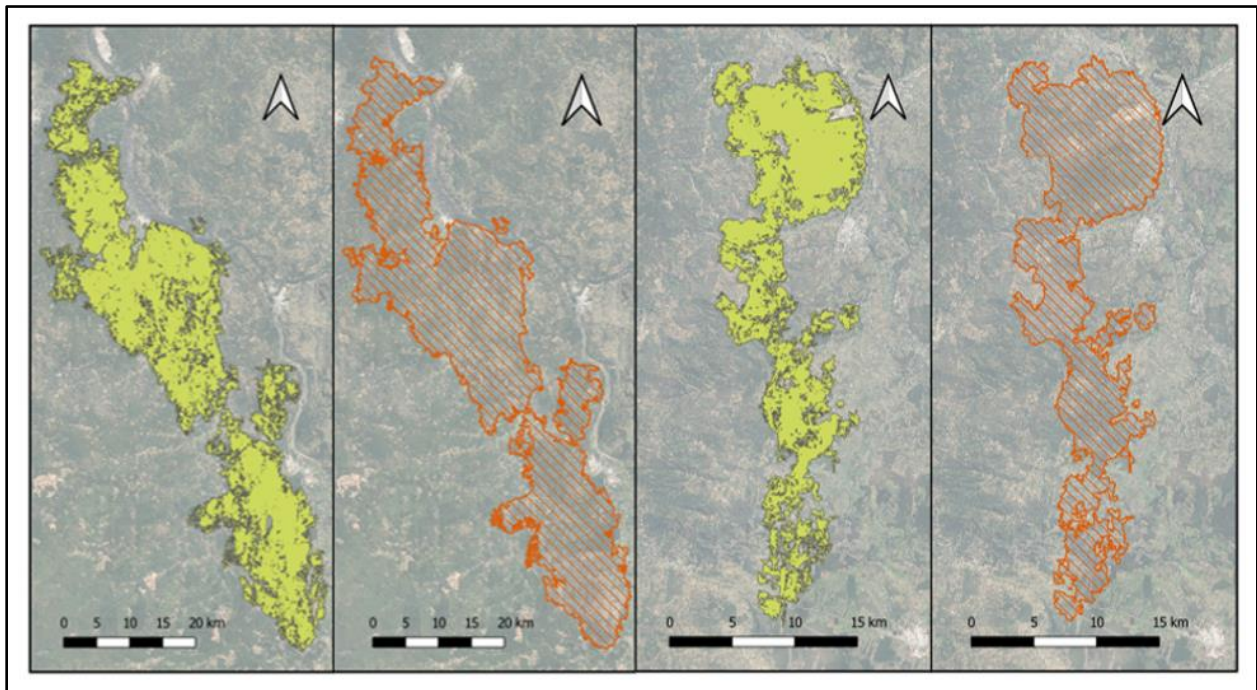
Superficie de los eventos calculadas a partir de severidades efectivas y envolventes

Evento	Área de Severidad Efectiva (ha)	Área de la Envolvente (ha)
Santa Ana	100.723	107.631
Santa Gertrudis	21.913	23.953

Es relevante precisar que existen discrepancias entre las superficies reportadas por distintas fuentes oficiales y las consideradas en este trabajo (Tabla 5). Por ejemplo, mientras SENAPRED (2023) asigna al evento Santa Ana una superficie de 64.856 ha, las estadísticas históricas de CONAF reportan 69.080 ha. El análisis de los datos geoespaciales (CONAF, 2025) permite identificar el origen de estas diferencias: los organismos oficiales administrativamente segmentaron eventos que presentaron continuidad espaciotemporal. En el caso de Santa Ana, la superficie total de 91.065 ha considerada en los registros oficiales se fragmenta en tres incendios distintos (Santa Ana, Quillota VIII Región y Butaco 3). Para efectos de esta investigación, y siguiendo el criterio de 'megaincendio' de Linley et al. (2022), definido como un evento espacial y temporalmente continuo que excede las 10.000 hectáreas, se han unificado los polígonos adyacentes para reconstruir la envolvente real del evento, lo que explica las diferencias de superficie respecto a los reportes administrativos segregados.

Figura 4.

área efectiva y envolventes de los eventos Santa Ana (izq) y Santa Gertrudis (der)



Construcción de primeras redes de muestreo

Posteriormente se procedió a construir las primeras redes de muestreo para ambos eventos. Para ello se recurrió al algoritmo “Puntos aleatorios dentro de los límites” de QGIS, generando 1,000 puntos para Santa Gertrudis (21.913 ha) y ~4,700 puntos para Santa Ana (100.723 ha), manteniendo una densidad muestral proporcional (~0.046 puntos/ha). Este enfoque aseguró cobertura homogénea en ambos incendios, superando el mínimo de 50 muestras/clase recomendado para clasificaciones binarias (Chuvieco, 2008). Los puntos se distribuyeron aleatoriamente dentro del área efectiva para evitar sesgos espaciales, priorizando viabilidad computacional (pruebas piloto mostraron que $n > 2,000$ colapsaban el software).

La red resultante permitió extraer valores de dNBR, indicadores de las condiciones del combustible e intensidad para los análisis estadísticos posteriores. Las tablas de severidades construidas en base a estas redes de muestreo, así como las cartografías de severidad elaboradas en el entorno de Qgis se presentarán en la sección resultados.

Tabla 6.

Clases de severidad de quema (0 a 4) según umbrales del índice dNBR (Sentinel-2)

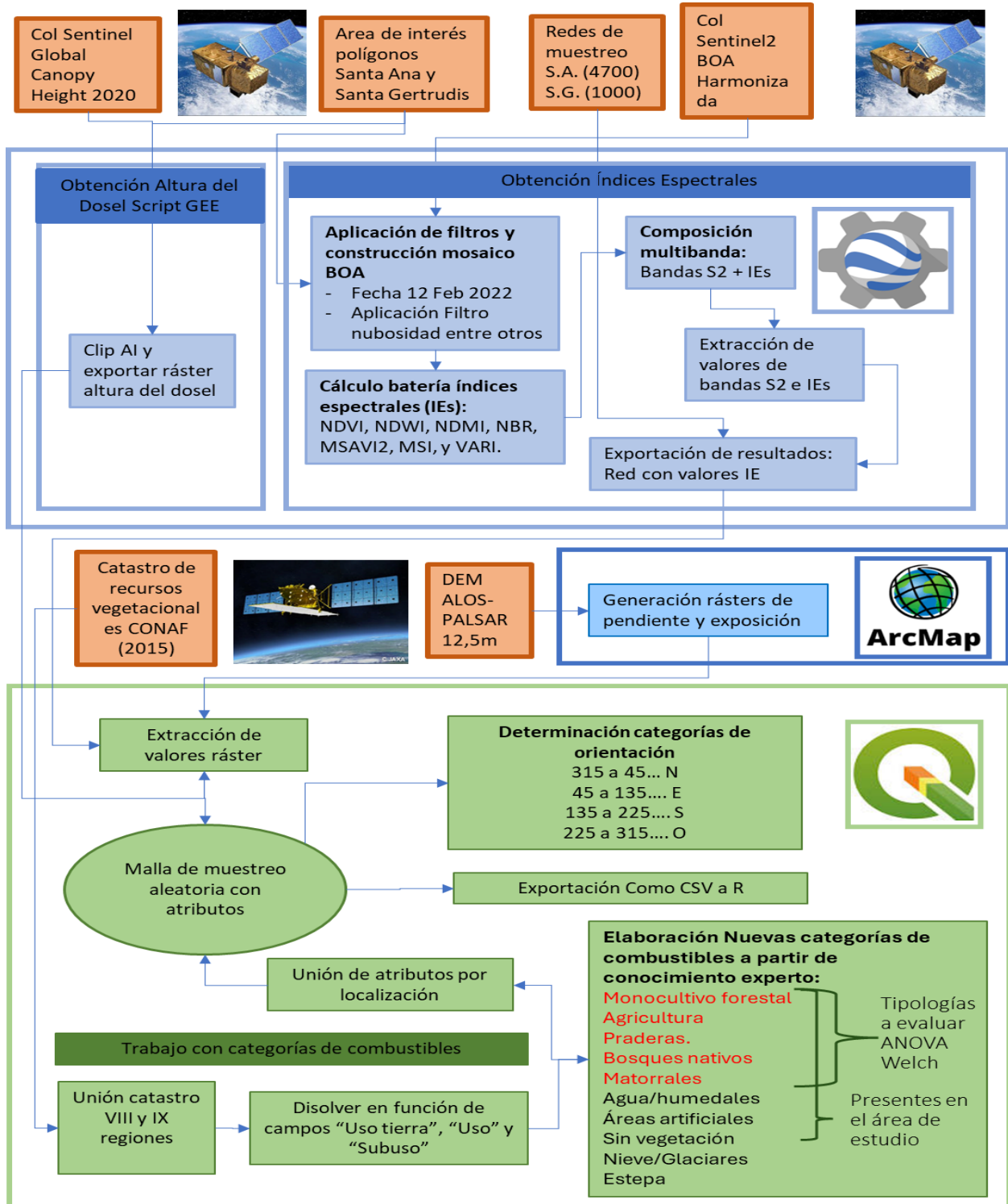
Rango dNBR	categoría de severidad de quema	Valor campo
< -0,25 – 0,1	Regeneración y No quemado	0
0,1 – 0,27	Zonas quemadas con gravedad baja	1
0,27 – 0,44	Zonas quemadas con gravedad moderada-baja	2
0,44 – 0,66	Zonas quemadas con gravedad moderada-alta	3
> 0,66	Zonas quemadas con gravedad alta	4

En este punto cabe adelantar que si bien estas redes de muestreo de 1,000 puntos para Santa Gertrudis y ~4,700 puntos para Santa Ana fueron útiles para obtener parte de los resultados de este trabajo, posteriormente surgió la necesidad de generar un segundo muestreo creando redes de muestreo de 5000 puntos por cada evento, 1000 por cada categoría de combustible relevante (muestreo estratificado balanceado), utilizando las capacidades computacionales del software R, no obstante se dará detalle de este procedimiento en la sección 4 de la metodología.

2. Metodología objetivo específico 2: Caracterizar las condiciones del combustible pre-incendio

Figura 5.

Diagrama metodológico OE2 para Eventos Santa Ana y Santa Gertrudis.



La figura 6 expone la caracterización de las condiciones del combustible previas a los eventos Santa Ana y Santa Gertrudis e integró variables espectrales, estructurales, topográficas y tipológicas del combustible, procesadas mediante una combinación de plataformas geoespaciales. El punto de partida lo constituyeron las redes de muestreo aleatorias generadas en el OE1; de 4700 puntos uniformemente distribuidos para Santa Ana y 1000 para Santa Gertrudis, sobre las cuales se extrajeron sistemáticamente los atributos de interés.

Caracterización espectral del combustible mediante índices de vegetación

Para evaluar el estado de la vegetación pre-incendio, se implementó en Google Earth Engine (GEE) un script, disponible en GEE mediante el link <https://code.earthengine.google.com/e072623b843211a5c5da9a241e62d366> (y en el repositorio GitHub de la tesis antes mencionado), a partir de imágenes Sentinel-2 de la colección COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED.

Las imágenes se filtraron considerando un porcentaje de nubosidad inferior al 20% y fechas equivalentes al mismo período fenológico del año anterior al incendio ('2022-02-11' a '2022-02-13'). Esto permite controlar las variaciones estacionales y capturar las condiciones de estrés hídrico características del verano mediterráneo, generándose mosaicos mediante la mediana de píxeles para minimizar ruido.

Una vez preparado el mosaico, el script calculó una batería de siete índices espectrales. Estos índices, seleccionados con base en su capacidad para capturar propiedades clave del combustible (tabla 7), incluyeron el NDVI (Rouse et al., 1974) y MSAVI2 (Qi et al., 1994) como indicadores de vigor vegetacional; NDMI (Tanase et al., 2022) y MSI (Hunt & Rock, 1989) para evaluar humedad del combustible; NBR (Key & Benson, 2006) para mostrar las áreas quemadas, junto con VARI (Gitelson et al., 2002) por su resistencia a efectos atmosféricos, y NDWI (Gao, 1996) por su sensibilidad al contenido de agua en la vegetación.

Tabla 7.

Indices espectrales utilizados para caracterizar el estado del combustible pre-incendio

Índice	Fórmula	Rango	Utilidad	Fuente
MSAVI2 (Modified Soil Adjusted Vegetation Index 2)	$\frac{(2 * NIR + 1 - 1 \sqrt{(2 * NIR + 1) - 8 * (NIR - RED)})}{2}$	-1 a 1	Versión mejorada del SAVI para corregir interferencia del suelo en vegetación escasa.	Qi et al. (1994) <i>Remote Sensing of Environment</i>
NBR (Normalized Burn Ratio)	$(NIR - SWIR2) / (NIR + SWIR2)$	-1 a 1	Detecta áreas quemadas. Valores negativos altos = quemaduras severas.	Key & Benson (2006) <i>USGS Landscape Assessment</i>
NDMI (Normalized Difference Moisture Index)	$(NIR - SWIR1) / (NIR + SWIR1)$	-1 a 1	Evalúa humedad en vegetación. Valores positivos altos = mayor contenido de agua.	Gao (1996)
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$(NIR - RED) / (NIR + RED)$	-1 a 1	Índice estándar de salud vegetal. >0.6 = vegetación densa; <0.1 = suelo desnudo.	Rouse et al. (1974) <i>NASA</i>
NDWI (Normalized Difference Water Index)	$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR)$	-1 a 1	Detecta agua/humedad en vegetación. Valores positivos = presencia de agua.	Gao (1996) <i>Remote Sensing of Environment</i>
VARI (Visible Atmospherically Resistant Index)	$(Green - Red) / (Green + Red - Blue)$	-1 a 1	Minimiza efectos atmosféricos para estimar fracción de vegetación.	Gitelson et al. (2002) <i>Remote Sensing of Environment</i>
MSI (Moisture Stress Index)	$SWIR1 / NIR$	0 a >3	Indica estrés hídrico. <1 = hidratación óptima; >2 = estrés severo.	Hunt & Rock (1989) <i>Remote Sensing of Environment</i>

Obtención de la variable altura del dosel

Paralelamente, la altura del dosel se obtuvo del dataset Global Forest Canopy Height (Lang et al., 2022), disponible en GEE. Este producto utiliza un modelo de *machine learning* entrenado con mediciones LiDAR de GEDI/ICESat-2, donde las imágenes *Sentinel-1* y *Sentinel-2* sirven como predictores para generar mapas de altura a 10m de resolución. La validación reporta un error medio de 3.5m (RMSE), proporcionando datos confiables de estructura vertical para nuestro análisis de combustibles. Estos datos fueron remuestreados a 20 m para homogeneizarse con los índices espectrales, mediante el script disponible en GEE (<https://code.earthengine.google.com/45cb279f57f85d9acc22af0f14ede246>).

Variables topográficas y su procesamiento

En el entorno de ArcMap 10.4.1 se procesaron las variables topográficas a partir del modelo digital de elevación ALOS PALSAR de 12.5 m (JAXA, 2021), descargado mediante el portal Alaska Satellite Facility. Tras unificar las teselas correspondientes al área de estudio y aplicar correcciones de vacíos mediante herramientas hidrológicas, se derivaron capas de pendiente (%) y orientación (°). Esta última fue reclasificada en cuatro categorías cardinales (Norte: 315°–45°; Este: 45°–135°; Sur: 135°–225°; Oeste: 225°–315°) para analizar su influencia en el secado diferencial del combustible. Adicionalmente, se decidió incorporar también las variables "Eastness" y "Northness", que también representan variables topográficas asociadas a la orientación y son consideradas en (Tanase et al., 2022). Eastness = $\sin(\text{orientación})$ mide cuán hacia el este está la ladera (valores positivos corresponden a laderas este y negativos a laderas oeste). Northness = $\cos(\text{orientación})$ mide cuán hacia el norte está la ladera (valores positivos corresponden a laderas norte y negativos a laderas sur). Su integración podría ser interesante de estudiar y no representa una dificultad adicional mayor.

Tipología de combustible: reclasificación del Catastro CONAF

El proceso de clasificación de los combustibles en categorías/tipologías se basó en el Catastro de Recursos Vegetacionales de CONAF, instrumento oficial que constituye la única fuente sistemática disponible para el área de estudio. La reclasificación se realizó siguiendo criterios establecidos mediante comunicación personal con el profesor Féliz Bernal (2023), unificando las 51 categorías originales en 10 clases funcionales, las cuales se muestran en la tabla 8. El anexo 12 presenta la correspondencia completa entre categorías originales y reclasificadas.

Los datos de partida presentaban dos limitaciones temporales principales: para la Región del Biobío (VIII región) se utilizó información actualizada al año 2015, mientras que para La Araucanía (IX región) los datos correspondían al año 2014. Esta diferencia temporal entre regiones adyacentes representó una restricción metodológica inevitable, dado que no se contaba con información más reciente y consistente para todo el ámbito de estudio. La reclasificación se aplicó de manera uniforme sobre estos datos base, generando una clasificación homogénea que permitió el análisis comparativo de las tipologías de combustible.

La decisión de trabajar con este catastro respondió a su carácter de instrumento oficial estandarizado, que garantiza cobertura completa y metodología consistente para todo el territorio nacional, a pesar de las limitaciones temporales mencionadas.

Tabla 8.

Tipologías de combustible forestal reclasificadas y sus códigos identificadores

Número Identificador categoría	Tipología/categoría de combustible
1	Monocultivo forestal
2	Agricultura
3	Praderas
4	Bosque nativo
5	Matorrales
6	Estepa
7	Agua/Humedales
8	Áreas artificiales
9	Sin vegetación
10	Nieve/Glaciares

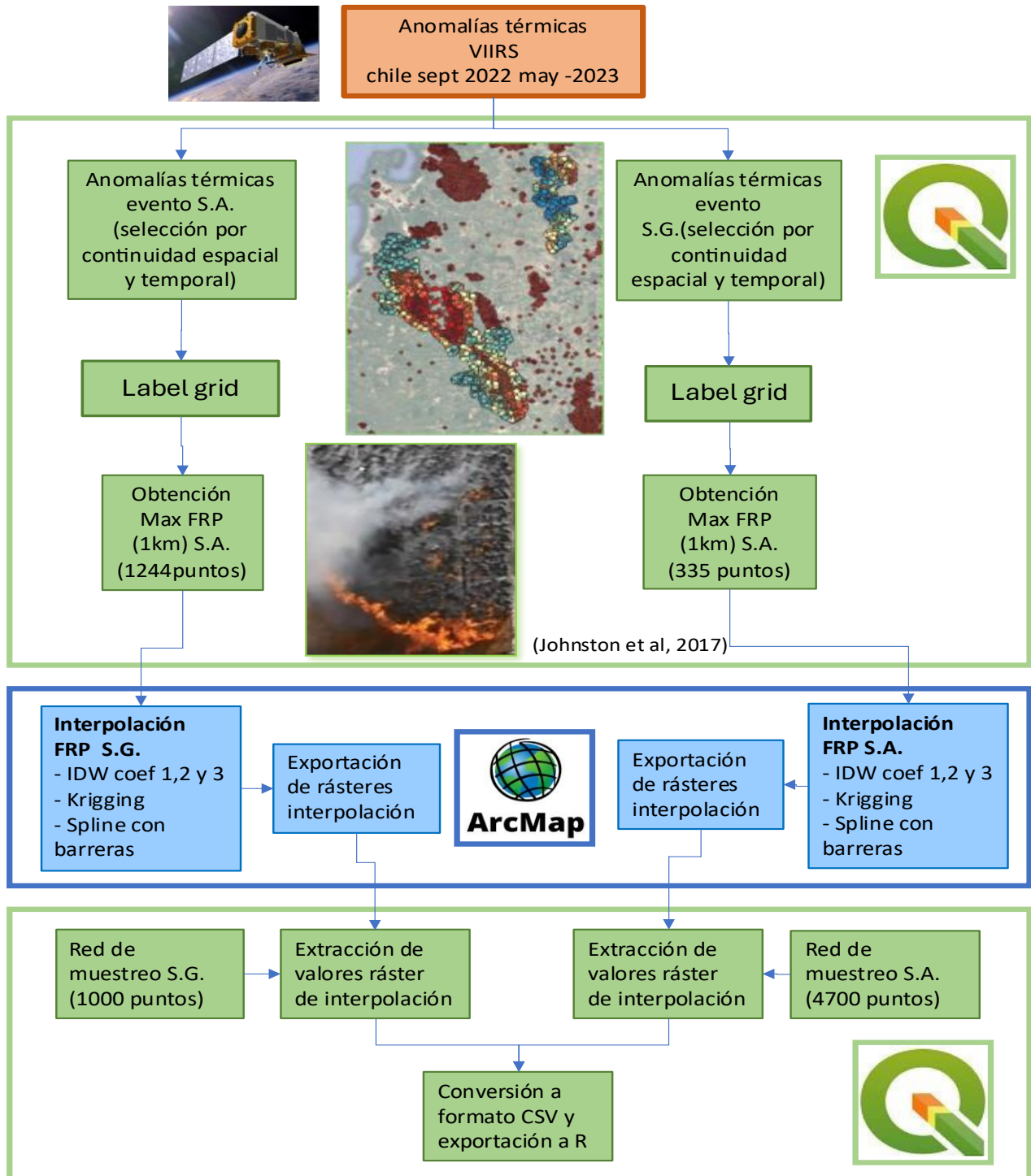
Nota: Basada en reclasificación del Catastro de Recursos Vegetacionales (CONAF, 2023) según criterios de experto (Félez Bernal, 2023).

Tras la reclasificación, la integración final de los datos se realizó en QGIS 3.28, donde todas las capas (índices espectrales, altura del dosel, variables topográficas y tipología de combustible) fueron consolidadas y asociadas a los puntos de muestreo mediante herramientas de extracción por estadística zonal. Cabe destacar que, como parte del OE3, estos mismos puntos de muestreo servirían posteriormente para extraer valores de intensidad del fuego (FRP).

3. Metodología objetivo específico 3: Reconocer patrones asociados a la distribución de intensidad

Figura 6.

Diagrama metodológico OE3 para Eventos Santa Ana y Santa Gertrudis.



La evaluación de la intensidad de los incendios se realizó mediante el procesamiento de anomalías térmicas del sensor VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*), obtenidas de la plataforma FIRMS de la NASA. El proceso metodológico, ilustrado en la Figura 6, se desarrolló en los entornos de QGIS 3.28 y Arcmap 10.4.1.

Selección y filtrado de anomalías térmicas VIIRS

Para la evaluación de la intensidad del fuego, fue necesario generar una superficie continua a partir de los valores de *Fire Radiative Power* (FRP). Este proceso se inició con la selección de las anomalías térmicas, priorizando solo aquellos puntos que representaran el frente de fuego activo (componente flamígero) en detrimento de los valores asociados a la combustión lenta (*smouldering*). La combustión lenta es la forma de combustión sin llama y de baja temperatura más persistente, que se propaga lentamente a través de materiales combustibles porosos (como el mantillo o la turba) mediante una oxidación directa de la superficie sólida. Esta combustión latente es menos eficiente radiativamente y subestima la intensidad, por lo que la exclusión de estos puntos es crucial para la correcta estimación de la intensidad máxima del frente de llama.

Para este filtrado se implementó una malla de cuadrantes de 1 km², aplicando un ranking de puntos dentro de cada celda para seleccionar exclusivamente el máximo valor de FRP. La malla de 1 km² se justificó por tres imperativos metodológicos: primero, compensar la distribución irregular de las detecciones VIIRS (que en áreas de alta actividad podían presentar múltiples puntos solapados, mientras que en zonas de *smouldering* mostraban vacíos); segundo, operar en una escala espacial coherente con la magnitud física de los megaincendios analizados 7; y tercero, facilitar la comparación directa con estudios de la literatura existente, muchos de los cuales usan los productos MODIS/VIIRS con resoluciones espaciales de 1 km² (Schroeder et al., 2014; Giglio et al., 2016). Mediante el plugin “Point Selection” de QGIS (QGIS Development Team, 2021), se procesaron las 9.526 anomalías térmicas iniciales que se consideraron parte del evento Santa Ana y las 2.405 de Santa Gertrudis, identificando en cada celda de 1 km² el punto con el valor más alto de FRP. Este filtrado redujo el conjunto a 1.244 y 335 puntos representativos en Santa Ana y Santa Gertrudis, respectivamente¹⁰.

Interpolación espacial y extracción de valores

Los conjuntos de puntos para ambos eventos se interpolaron en el entorno de Arcmap, en donde se realizaron los métodos de interpolación IDW con coeficientes de potencia 1, 2 y 3, método kriging con los parámetros: semivariograma esférico y radio de búsqueda variable, y método Spline con barreras. Ello con la finalidad de comparar interpolaciones, buscando establecer si es

que el método de interpolación introduce diferencias en la relación de la intensidad con las otras variables. Los rásters resultantes de interpolación se incorporaron al entorno de Qgis, donde se les extrajeron los valores de FRP para las redes de muestreo. Los valores de interpolaciones se incorporaron a la red de muestreo con los nombres de FRP1, FRP2, FRP3, FRP4 y FRP5, posteriormente en el entorno de R se incorporaría, a modo exploratorio un sexto campo FRP con los promedios de los demás valores. El resultado de este proceso de interpolaciones se resume en la tabla 9. A su vez que los procesos realizados durante este objetivo se pueden observar de manera más gráfica en la figura 7, complementaria al diagrama metodológico del OE3.

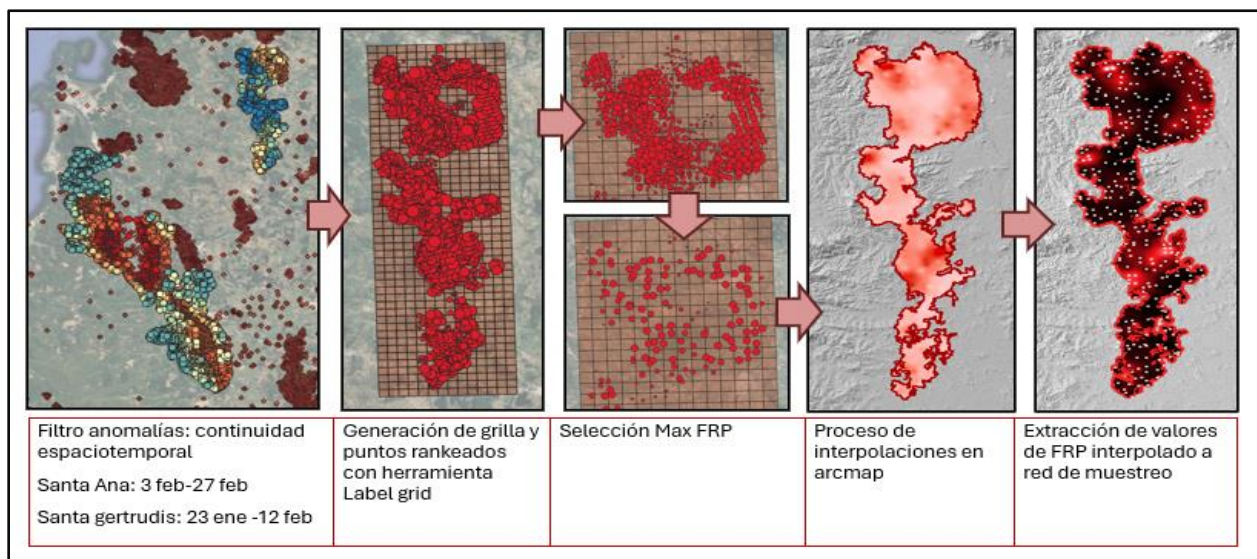
Tabla 9.

Métodos de interpolación aplicados

Método	Parámetros clave	Software	Nombre campo
IDW	Potencia: 1	ArcMap 10.4.1	FRP1
IDW	Potencia: 2	ArcMap 10.4.1	FRP2
IDW	Potencia: 3	ArcMap 10.4.1	FRP3
Krigging	Semivariograma: esférico; Radio:	ArcMap 10.4.1	FRP4
Spline	Tipo: con barreras	ArcMap 10.4.1	FRP5
Promedio	Media de FRP1 a FRP5	Rstudio	FRP6

Figura 7.

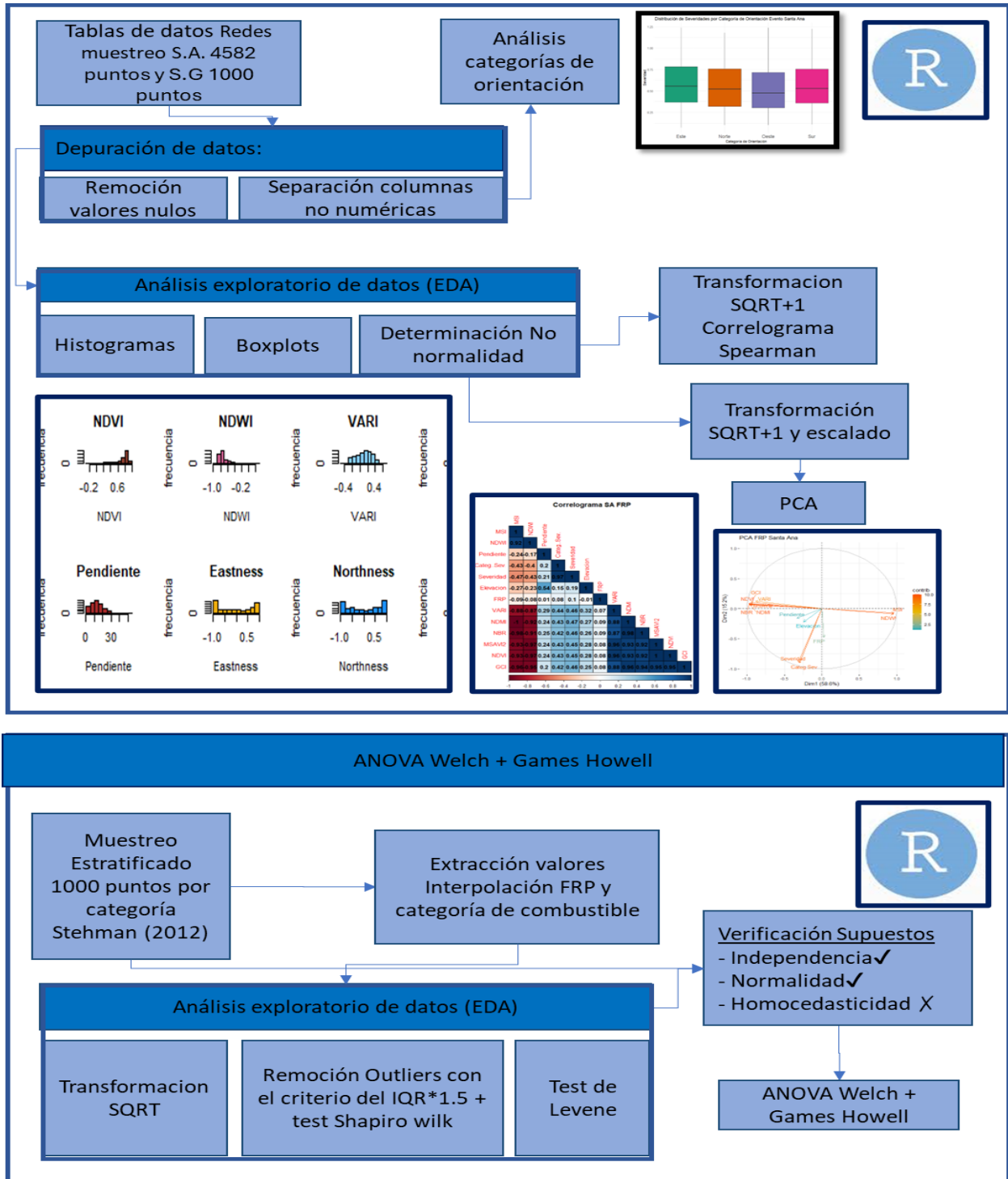
Diagrama metodológico complementario OE3.



4. Metodología objetivo específico 4: Relacionar índices de severidad, intensidad y condiciones del combustible

Figura 8.

Diagrama metodológico OE4 para Eventos Santa Ana y Santa Gertrudis.



Resumen del proceso de trabajo

El proceso del objetivo 4 se realizó principalmente en el entorno de Rstudio y se resume principalmente en 5 etapas:

1. EDA: análisis exploratorio de datos, con la finalidad de visualizar los datos, detectar y corregir errores, depurar datos, detectar patrones visualmente, y preparar los datos para análisis posteriores
2. Análisis de Correlaciones: Correlaciones mediante Coeficiente de Spearman (1904)
3. PCA: (Pearson, K., 1901) Análisis de Componentes Principales (PCA), con fines exploratorios, para dilucidar relaciones y extraer conclusiones.
4. Análisis categóricos: se realizaron las pruebas ANOVA de Welch (Welch, 1951) para evaluar diferencias significativas entre tipos de combustible versus intensidad y tipos de combustibles versus la variable severidad. Y posteriormente comparaciones múltiples mediante el test Games y Howell (1976)
5. Análisis de Categorías de Orientación mediante las *boxplots* simples

Primeros análisis: EDA, Correlaciones y PCA

Al extraer la totalidad de los atributos a las redes de muestreo durante etapas previas se obtuvieron dos datasets, el primero correspondiente a Santa Ana, con 4582 puntos, y el segundo correspondiente a Santa Gertrudis con 1000 puntos, Si bien la red de muestreo original de santa Ana contenía 4700 puntos, se corroboró que una fracción de ellos (~2.5% del total) se perdió debido principalmente a celdas con valores nulos durante el procesamiento y reclasificación del catastro de combustibles, no obstante esto no afecta la representatividad estadística del estudio.

Para ambos datasets los campos obtenidos (26 en total) fueron los siguientes: (tabla 10)

Tabla 10.

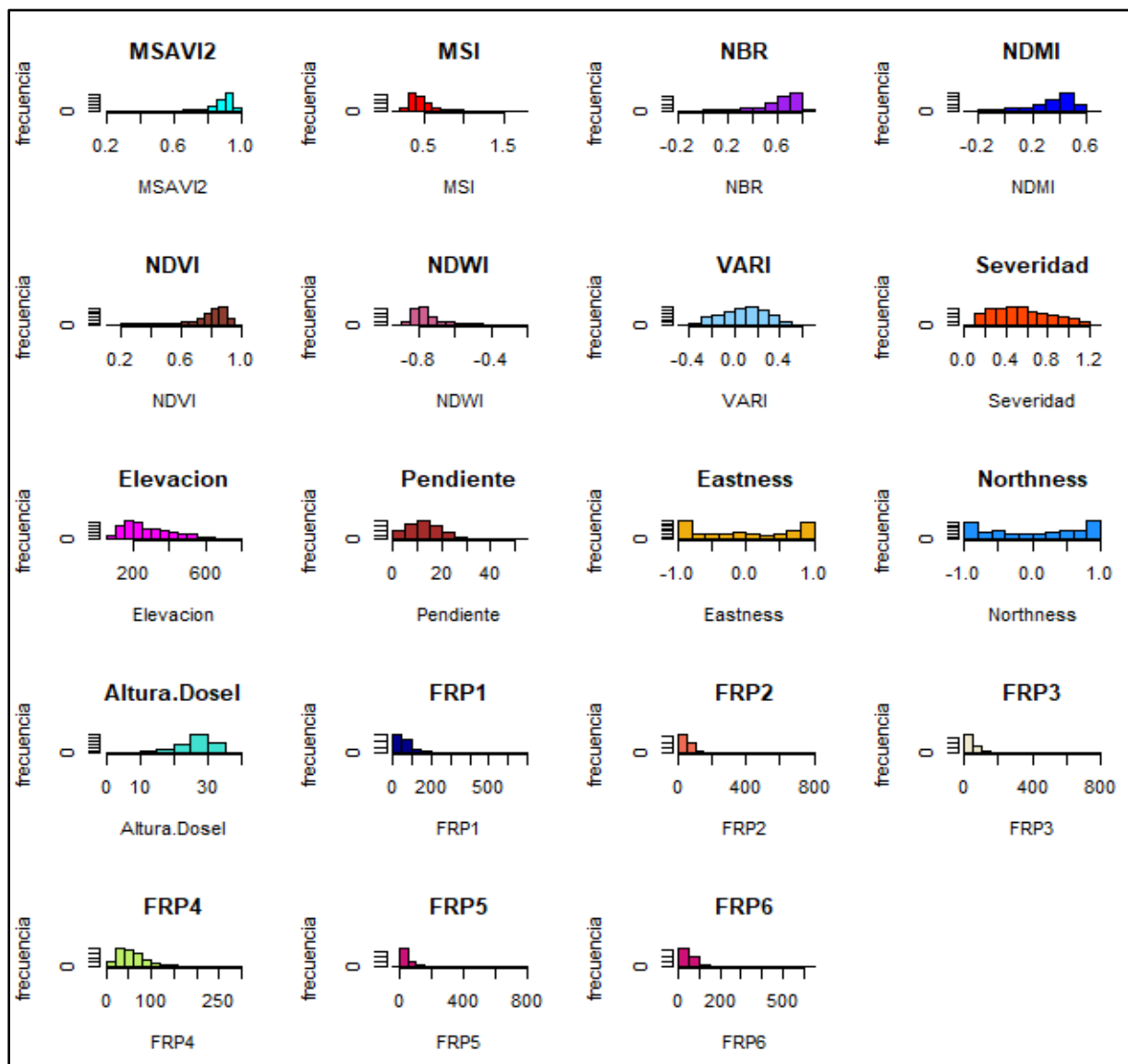
Campos de atributos presentes en los datasets generados en SIG; al momento del primer análisis en R

Campo	Descripción
fid	Identificador nativo del software GIS (residual)
Ident	Identificador requerido por script de índices espectrales (residual)
MSAVI2	índice MSAVI2
MSI	índice MSI
NBR	índice NBR
NDMI	índice NDMI
NDVI	índice NDVI
NDWI	índice NDWI
VARI	índice VARI
Categ.Sev	dNBR recategorizado en categorías de severidad de 0 a 4 (ver tabla 6)
Severidad	dNBR valores originales
Uso	Campo USO del catastro de recursos vegetacionales de CONAF (residuo del proceso de reclasificación del catastro)
Estructura	Campo Estructura del catastro de recursos vegetacionales de CONAF (residuo del proceso de reclasificación del catastro)
Elevación	Altitud en metros (procedente del DEM)
Pendientes	Valor de pendiente (%)
Orientación	Valor de orientación (en grados azimutales)
Eastness	Cuan al este está una ladera
Northness	Cuan al norte está una ladera
Altura.Dosel	Valor de altura del dosel en metros
FRP1	Valores de FRP (interpolación IDW1)
FRP2	Valores de FRP (interpolación IDW2)
FRP3	Valores de FRP (interpolación IDW3)
FRP4	Valores de FRP (interpolación Krigging)
FRP5	Valores de FRP (interpolación Spline)
Categ.orientacion	Categorías de orientación: N, E, S,O
ID_Fuel	Categorías de combustible (véase tabla 8)

El primer proceso de depuración de datos consistió en eliminar aquellas columnas inservibles como Ident, Fid, uso y estructura, además de todos aquellos registros que presentaran valores nulos en algún campo, esto mediante el comando *complete.cases*, si bien, esto significó que se redujeron los registros de 4582 a 3134 en Santa Ana y de 1000 a 588 en Santa Gertrudis, fue necesario para evitar errores que se produjeron en pruebas preliminares durante el proceso. Posteriormente se procedió a generar distintos conjuntos de histogramas y *boxplots*, como por ejemplo el que se ve en la figura 10.

Figura 9.

Conjunto de Histogramas exploratorios generado para las variables del evento Santa Ana.



De los histogramas exploratorios generados se pudo observar que a simple vista la mayor parte de los datos no muestran una distribución normal, lo cual ya se esperaba desde un principio, por lo que se hará necesario generar transformaciones para acercarlos a la normalidad.

Inicialmente se había considerado el test de Kolmogorov-Smirnov (K-S) para evaluar normalidad, pero se descartó debido a:

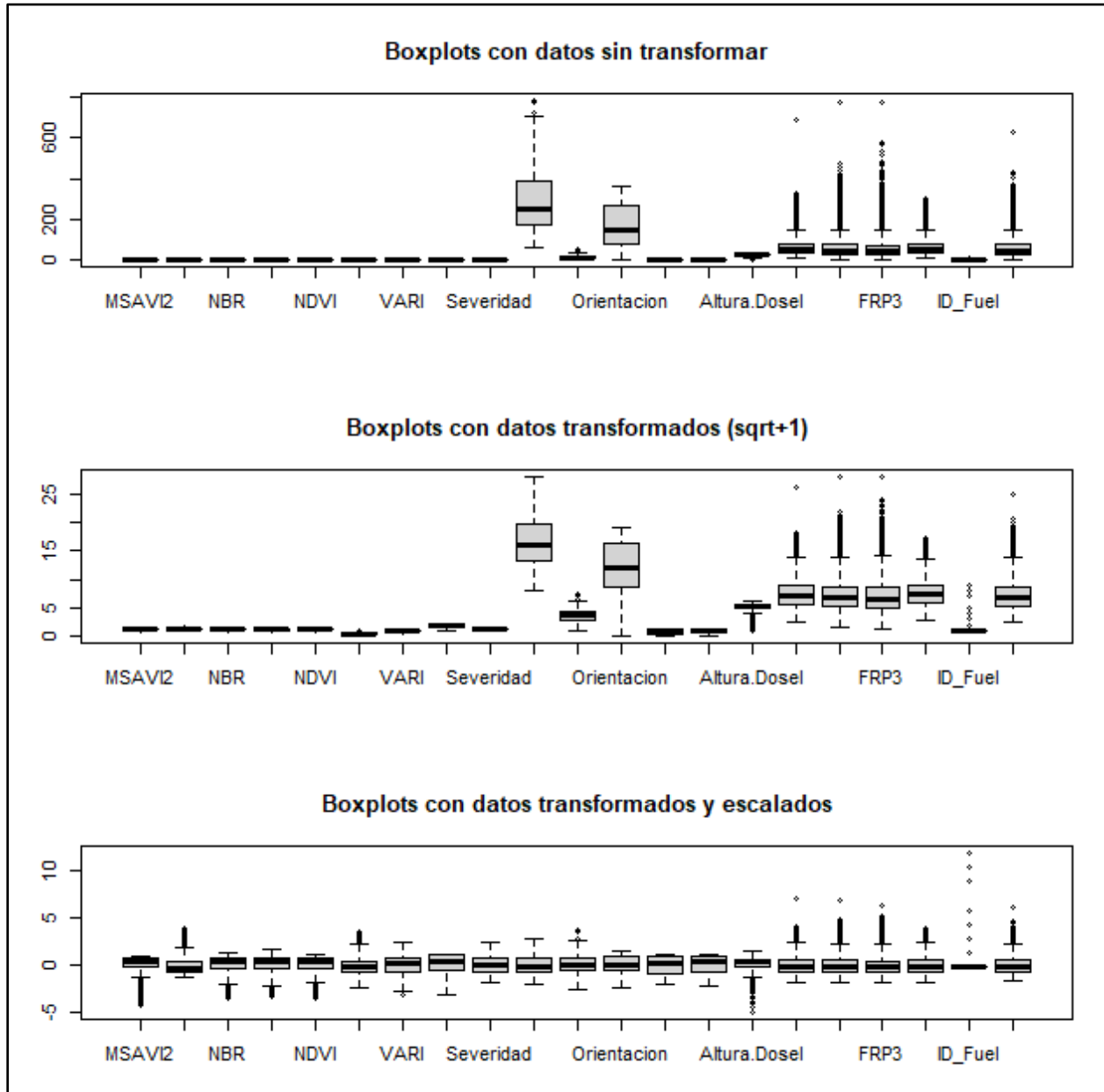
1. Evidencia visual contundente: Los histogramas y *boxplots* mostraron asimetría y *outliers* extremos indicando no-normalidad sin necesidad de tests confirmatorios.
2. Tamaño muestral: Con >1,000 puntos por evento (Santa Ana: 4,582; Santa Gertrudis: 1,000), el K-S es hiper-sensible (Razali & Wah, 2011), detectando desviaciones irrelevantes.
3. EDA independiente: los test ANOVA Welch paramétricos que exigen normalidad se subseleccionarán y se someterán a un EDA independiente al de los datos destinados a correlaciones y PCA

En lugar de ello se procedió a realizar una transformación SQRT+1, La raíz cuadrada reduce el peso de los valores extremos, acercando la distribución a una normal, por su parte el +1 evita problemas con valores negativos o ceros (ej. Valores de IEs entre -1 y 1)

La Figura 10 presenta un análisis comparativo mediante diagramas de caja (*boxplots*) de tres conjuntos de datos derivados de un mismo conjunto inicial: SA2022 (datos Santa Ana); arriba se muestran los datos originales sin modificación, al centro los datos transformados mediante la operación raíz cuadrada con desplazamiento unitario ($\sqrt{x + 1}$), y abajo los datos transformados posteriormente estandarizados mediante la función *scale*. Esta visualización permite evaluar el impacto de cada etapa de preprocesamiento en la distribución de las variables.

Figura 10:

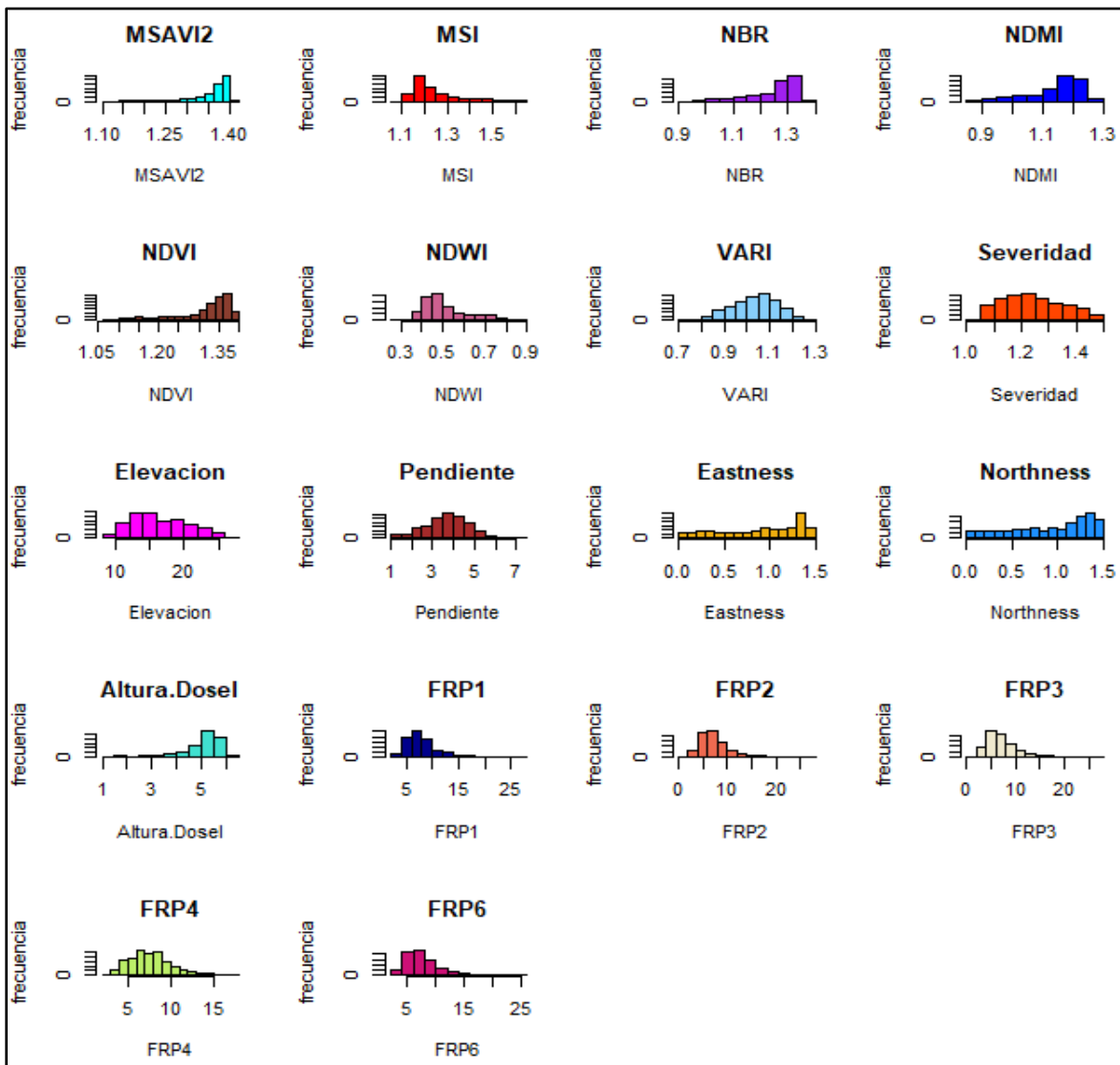
Comparación de distribuciones de datos originales (Santa Ana), transformados y estandarizados



En la siguiente figura (fig.11) se muestra un nuevo conjunto de histogramas, nótese que a diferencia del conjunto anterior (fig. 10) esta vez se notan las distribuciones más cercanas a la normalidad (efecto de la transformación), se excluyó la variable FRP5, que no se pudo transformar, puesto que venía derivada de una interpolación *spline*, que contenía valores muy negativos, mientras que la transformación $\sqrt{x + 1}$ requiere que $x \geq -1$ para evitar raíces cuadradas de números negativos (que generan NaN en R)

Figura 11.

Comparación de distribuciones de datos originales (Santa Ana), transformados y estandarizados



Una vez que se han preparado los datos mediante depuración y la transformación antes mencionada, se procede a generar los correlogramas de Pearson y PCAs mediante los paquetes de R; `corrplot` y `factoextra`, siguiendo las recomendaciones de (Wei & Simko, 2021) y (Castillo Mejía, 2023).

Creación nuevas redes de muestreo para los eventos

Para el análisis de diferencias entre categorías de combustible, se diseñó un muestreo estratificado balanceado que extrajera 1,000 puntos aleatorios por cada tipo de combustible en ambos eventos. Este diseño de muestreo se fundamentó en dos consideraciones metodológicas críticas identificadas durante el desarrollo del estudio:

Primero, las redes de muestreo originales (4,700 puntos en Santa Ana y 1,000 en Santa Gertrudis) presentaban distribuciones extremadamente desiguales entre categorías de combustible. Tras la depuración de *outliers*, en Santa Ana se contabilizaron 2,665 puntos en monocultivos forestales versus apenas 11 puntos en matorrales. Esta desproporción compromete la validez de pruebas de comparaciones múltiples como Tukey HSD, las cuales pierden precisión estadística cuando los tamaños muestrales difieren sustancialmente entre grupos (Field et al., 2012, Cap. 10).

Segundo, los análisis preliminares mediante la prueba de Levene revelaron heterocedasticidad significativa ($p < 0,001$), violando el supuesto de homogeneidad de varianzas requerido por el ANOVA clásico (Fisher, 1934). Esta violación invalidaba el uso de ANOVA tradicional y sus pruebas post-hoc asociadas; los tests de Tukey HSD).

En consecuencia, se implementó una estrategia metodológica alternativa que combinó: (1) muestreo aleatorio estratificado con asignación uniforme (*stratified random sampling with equal allocation*) para garantizar tamaños muestrales equivalentes entre categorías, y (2) el test de Welch (1951), una variante robusta del ANOVA que no asume homocedasticidad, junto con comparaciones post-hoc de Games-Howell (Games & Howell, 1976), apropiadas para diseños con varianzas desiguales.

El muestreo aleatorio estratificado con asignación uniforme contrarresta el sesgo introducido por la dominancia espacial de los monocultivos forestales en el paisaje, asegurando que categorías menos extensas pero ecológicamente relevantes (como matorrales o bosque nativo) tengan representatividad estadística equivalente en el análisis (Stehman, 2012). Este procedimiento se ejecutó para cada evento por separado mediante el script "Remuestreo estratificado" disponible

en el repositorio (<https://github.com/AnibalPardoHerrera/ScriptsTesisMegaincendios>), extrayendo aleatoriamente 1,000 puntos dentro de los polígonos correspondientes a cada categoría de combustible. Posteriormente, se extrajeron los valores de severidad e intensidad desde los rasters correspondientes hacia cada punto muestreado. Este diseño generó datasets balanceados de 5,000 observaciones por evento antes de la limpieza de *outliers*, garantizando poder estadístico equivalente para detectar diferencias entre todas las categorías analizadas.

Durante la extracción, se conservaron únicamente tres campos por observación: Combustible como categoría de tipo de combustible renombrada desde ID_Fuel, Severidad extraída del ráster dNBR correspondiente, e Intensidad calculada como el promedio de las cinco interpolaciones de FRP (IDW1, IDW2, IDW3, Kriging, Spline) a fin de mantener coherencia metodológica en relación a lo realizado anteriormente. Las categorías Estepa, Agua/humedales, Áreas artificiales, Sin vegetación y Nieve/glaciares fueron excluidas del análisis por estar ausentes o severamente subrepresentadas en las áreas de estudio. El análisis se centró en las cinco categorías relevantes desde el punto de vista pirogeográfico y del combustible: Monocultivo Forestal, Agricultura, Praderas, Bosque Nativo y Matorrales.

Verificación de supuestos estadísticos

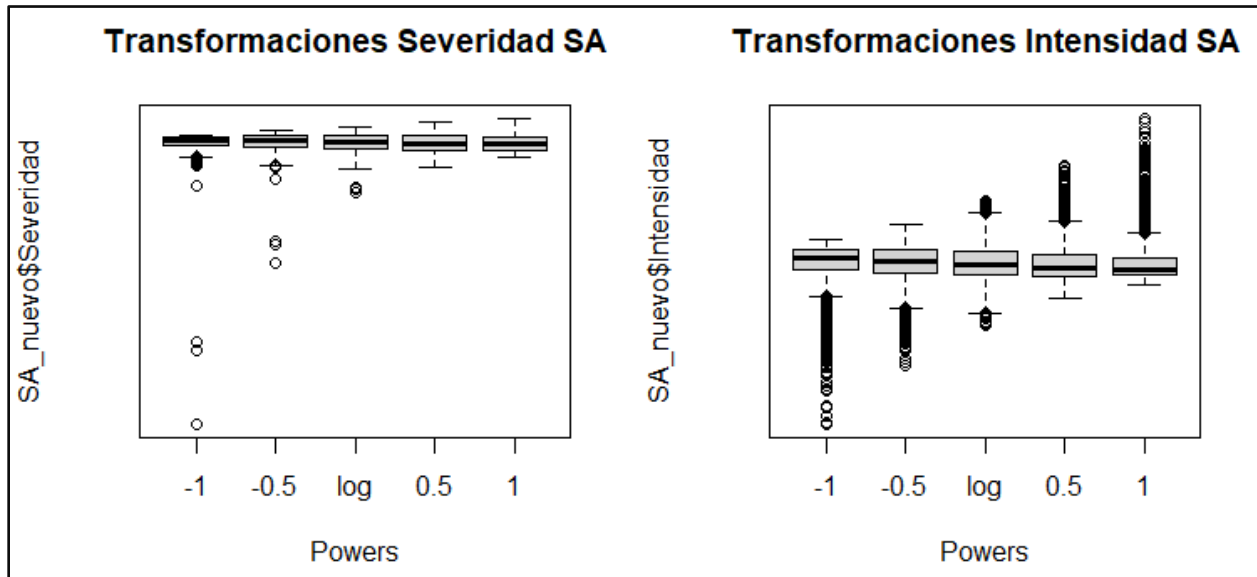
Previo a la aplicación de los tests de Welch, se verificaron los supuestos estadísticos necesarios para análisis paramétricos, siguiendo las recomendaciones de Field et al. (2012, Cap. 10):

Independencia: Las observaciones fueron espacialmente independientes al generarse mediante muestreo aleatorio estratificado, donde cada punto se extrajo de forma aleatoria dentro de su estrato correspondiente sin reemplazo. Este diseño garantiza la ausencia de dependencia estructural entre observaciones dentro de cada categoría, evitando autocorrelación espacial por diseño. La aleatorización espacial completa dentro de los polígonos de cada categoría de combustible, sin uso de grillas regulares o transectos sistemáticos, asegura que las observaciones no están correlacionadas entre sí.

Normalidad: Se evaluó mediante análisis exploratorio visual. El comando *symbox()* del paquete *car* (Fox & Weisberg, 2019) reveló que ambas variables (Severidad e Intensidad) presentaban asimetría positiva y *outliers* extremos en su escala original. Como se puede observar en la Figura 12, donde se ejemplifica el proceso con los datos del evento Santa Ana, los datos originales mostraban distribuciones asimétricas con valores atípicos en ambos extremos.

Figura 12.

análisis symbox aplicado a los datos de Santa Ana Previo Limpieza Outliers

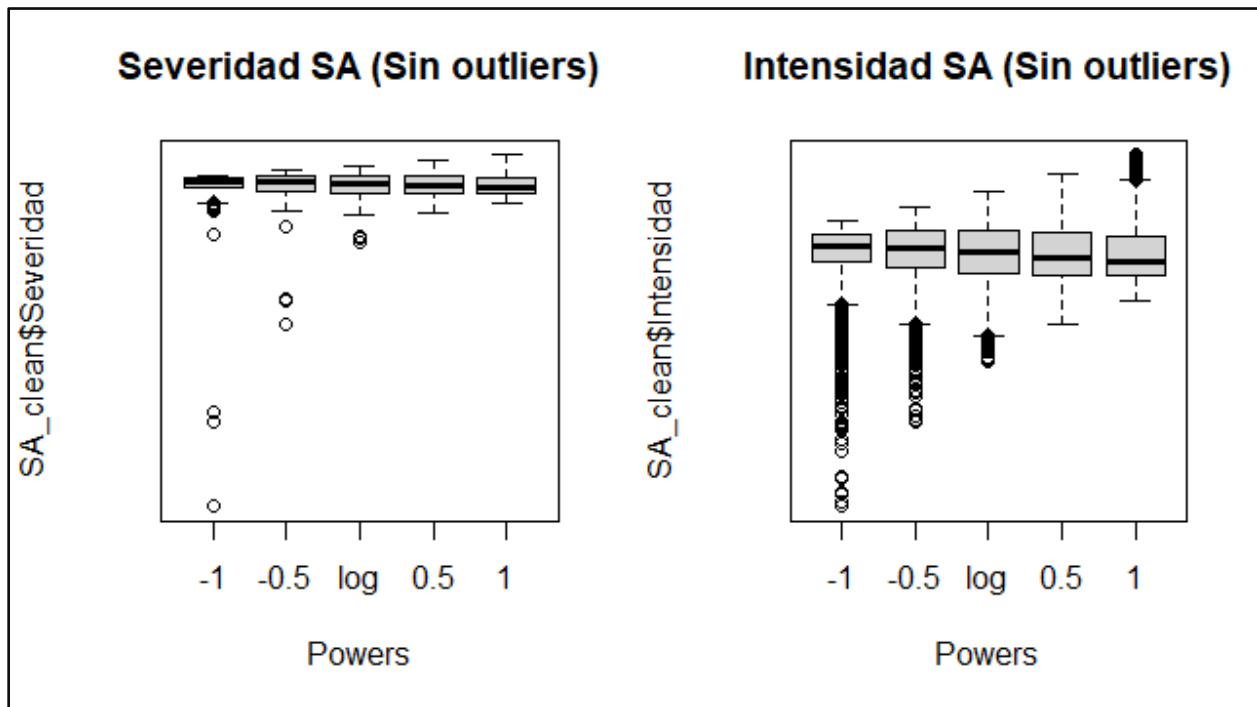


Previo a cualquier transformación, se eliminaron *outliers* mediante el criterio del rango intercuartílico (IQR), donde valores fuera del rango $[Q1 - 1,5 \times IQR, Q3 + 1,5 \times IQR]$ fueron considerados atípicos y excluidos del análisis

Tras la eliminación de *outliers*, se aplicó el análisis *symbox()* nuevamente para evaluar la efectividad de la limpieza. Como se evidencia en la Figura 13, los datos depurados mostraron una mejora sustancial en la simetría de las distribuciones. Posteriormente, se aplicó una transformación de raíz cuadrada (*sqrt*) a ambas variables, seleccionada por producir distribuciones con mayor simetría en los *boxplots* y mejor alineación en los gráficos Q-Q.

Figura 13.

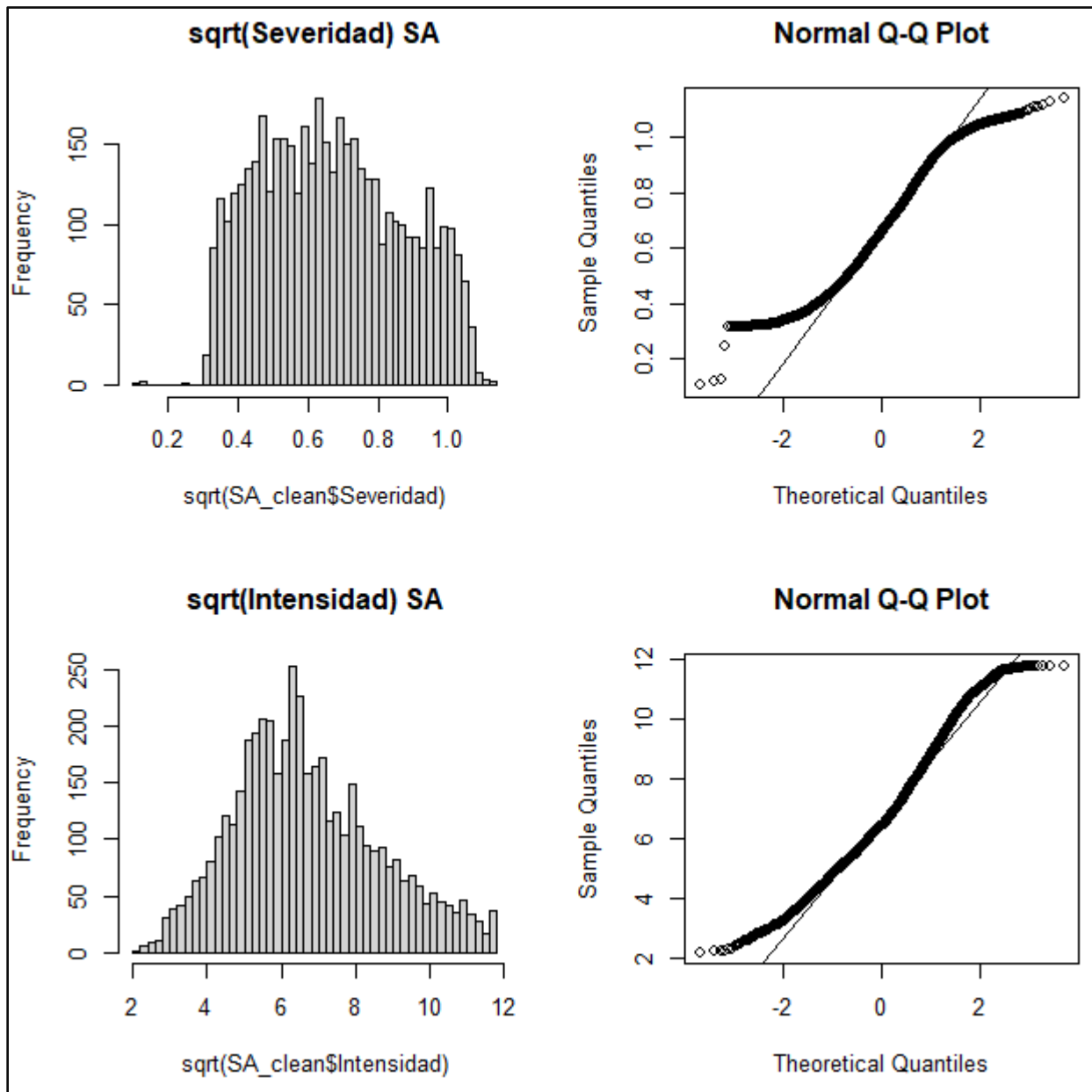
análisis symbox aplicado a los datos de Santa Ana Posterior a limpieza outliers



La normalidad se confirmó visualmente mediante histogramas y gráficos Q-Q. Como se puede observar en la Figura 14, los histogramas de las variables transformadas presentan forma acampanada característica de la distribución normal, y los gráficos Q-Q muestran que los puntos se alinean estrechamente con la línea teórica, indicando concordancia con la distribución normal esperada.

Figura 14.

Histogramas y QQplots de variables transformadas Santa Ana



Adicionalmente, se aplicó el test de Shapiro-Wilk a una muestra estandarizada de 3,907 observaciones para cada evento, tamaño seleccionado por corresponder al evento con menor cantidad de datos después de la limpieza, garantizando así comparabilidad directa entre ambos análisis. Los resultados mostraron valores $W > 0.96$ para todas las variables transformadas, sugiriendo distribuciones aceptablemente normales. Si bien los p-valores resultaron significativos ($p < 0,05$) debido a la alta sensibilidad del test con muestras grandes, los valores W elevados

junto con la inspección visual confirman que las transformaciones sqrt producen distribuciones suficientemente normales para la aplicación de tests paramétricos (Blanca et al., 2017).

Homocedasticidad: La prueba de Levene (Levene, 1960) aplicada mediante `leveneTest()` del paquete `car` confirmó heterocedasticidad significativa ($p < 0,001$) en las cuatro combinaciones analizadas (Severidad-SA, Intensidad-SA, Severidad-SG, Intensidad-SG), justificando plenamente el uso del test de Welch en lugar del ANOVA clásico.

Análisis estadístico: Test de Welch y comparaciones post-hoc de Games-Howell

Se ejecutó el test de Welch para evaluar diferencias entre tipos de combustible en Severidad e Intensidad, para ambos eventos (Santa Ana y Santa Gertrudis), mediante `oneway.test()` con el argumento `var.equal = FALSE`. El tamaño del efecto se cuantificó mediante épsilon cuadrado (ϵ^2), calculado como:

$$\epsilon^2 = F / (F + (n - k))$$

donde F es el estadístico de Welch, n es el tamaño muestral total, y k es el número de grupos. Esta métrica es preferible a eta cuadrado (η^2) en contextos de heterocedasticidad, ya que no asume varianzas iguales. Los tamaños de efecto se interpretaron según Lakens (2013): $\epsilon^2 < 0.01$ (trivial), 0.01-0.06 (pequeño), 0.06-0.14 (mediano), > 0.14 (grande).

Las comparaciones múltiples post-hoc se realizaron mediante el test de Games y Howell (1976), robusto ante varianzas desiguales y tamaños muestrales diferentes, utilizando el método de Welch-Satterthwaite para ajustar los grados de libertad en cada comparación por pares. Se reportan intervalos de confianza al 95% y p-valores ajustados para controlar la tasa de error familiar. El código completo del análisis estadístico está disponible en el repositorio de la tesis.

Los resultados completos de estos análisis, incluyendo estadísticos F de Welch, p-valores, tamaños de efecto (ϵ^2), y las comparaciones pareadas de Games-Howell con sus respectivos intervalos de confianza y p-valores ajustados, se presentan detalladamente en la sección Resultados.

Finalmente, la última variable a analizar fue la de la orientación, ello se debe a que, esta variable constituye un factor importante en el secado diferencial de los combustibles, y aunque se podría teorizar de que en grandes eventos como los estudiados en este trabajo, no tenga esta variable una mayor relevancia, igualmente se incluyó, mediante análisis de *boxplots* para evaluarla visualmente, también se incluyeron en los PCA las variables *eastness* y *northness* (ver resultados)

IV.- Resultados y Discusión

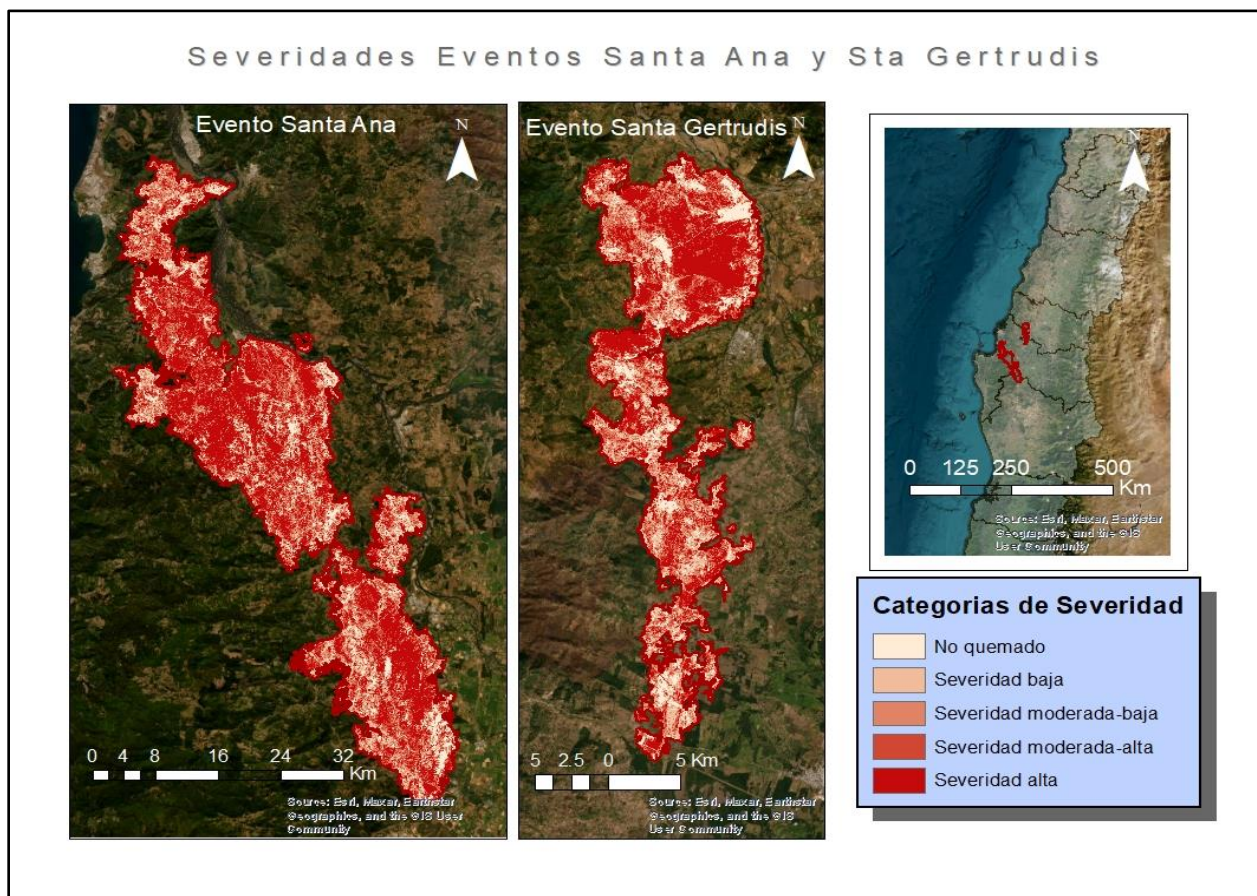
Resultados OE1: Caracterización del daño asociado a los eventos en términos de severidad

Cartografías y tablas de severidad de eventos Santa Ana y Santa Gertrudis:

La Figura 15 presenta la distribución espacial de la severidad del fuego en los eventos Santa Ana y Santa Gertrudis. La cartografía evidencia un predominio generalizado de las categorías de mayor daño (Moderada-Alta y Alta) a lo largo de la extensión de ambos siniestros, reflejando la alta energía liberada durante la propagación.

Figura 15.

cartografía de las Categorías de severidad de quema de los eventos



Nota: Basada en Imágenes satelitales Sentinel2/SIG/TDT

A continuación (Tablas 10 y 11) se presenta la distribución de categorías de severidad por tipo de combustible, basada en los puntos de las redes de muestreo obtenidas en el OE1. Este proceso incluyó la depuración de datos y la eliminación de categorías subrepresentadas, conservando solo las 5 más relevantes para el estudio. Los puntos válidos resultantes fueron 4,499 para Santa Ana y 991 para Santa Gertrudis, correspondientes a las coberturas vegetales con presencia significativa en el área. Como resultado, se observó que el monocultivo forestal concentró las mayores frecuencias absolutas de severidad alta en ambos eventos (1,136 casos en Santa Ana y 187 en Santa Gertrudis), seguido del bosque nativo (257 casos en Santa Ana y 63 en Santa Gertrudis). Si bien los histogramas muestran una mayor cantidad absoluta de registros de alta severidad en monocultivos, este patrón está fuertemente influenciado por la hegemonía territorial de este uso (~70% del paisaje). Por consiguiente, para determinar si el monocultivo es intrínsecamente más propenso a la severidad que otros usos, es imperativo remitirse a los análisis estadísticos normalizados por tamaño muestral que se presentan en el OE4

Tabla 10.

Distribución de categorías de severidad por tipo de combustible en el evento Santa Ana

Tipo de combustible	Baja	Moderada-baja	Moderada-alta	Alta	Total (N puntos)
Monocultivo forestal	538	683	898	1136	3255
Agricultura	91	88	47	26	252
Praderas	35	15	20	9	79
Bosque Nativo	113	108	131	257	609
Matorral	59	63	57	125	304
Total	836	957	1153	1553	4499

Tabla 11.

Distribución de categorías de severidad por tipo de combustible en el evento Santa Gertrudis

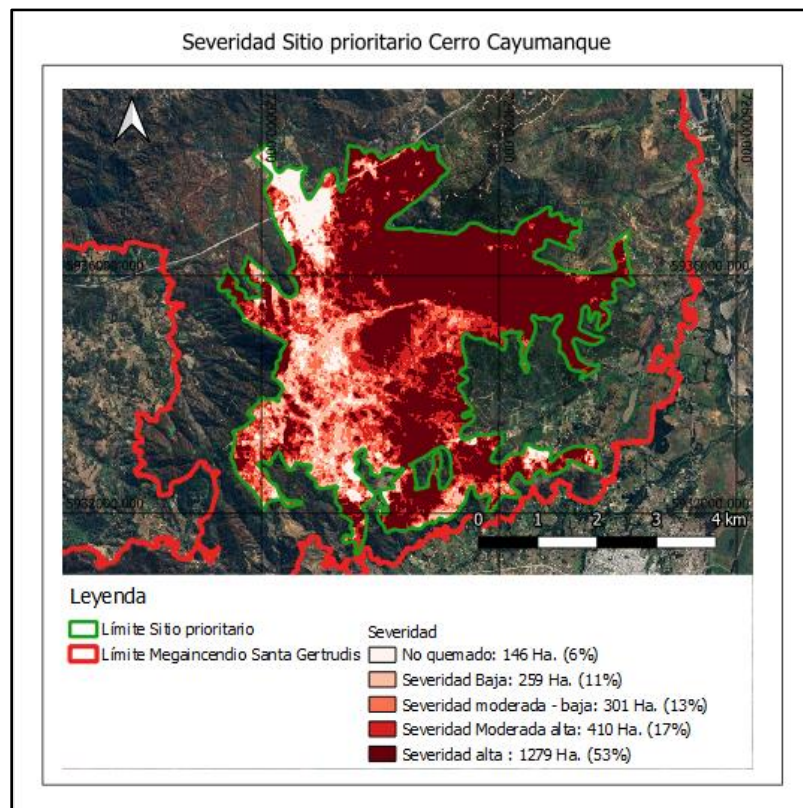
Tipo de combustible	Baja	Moderada-baja	Moderada-alta	Alta	Total (N puntos)
Monocultivo forestal	118	153	125	187	583
Agricultura	61	39	44	25	169
Praderas	7	4	2	2	15
Bosque Nativo	7	13	15	23	58
Matorral	27	37	39	63	166
Total	220	246	225	300	991

Afectación del sitio prioritario Cerro Cayumanque:

la Figura 16 cuantifica el impacto sobre el Sitio Prioritario 'Cerro Cayumanque', evidenciando una severidad alta que compromete su integridad ecológica. Este patrón confirma la vulnerabilidad de activos de conservación carentes de zonas de amortiguamiento (buffer zones) frente a matrices de combustible continuo. Desde una perspectiva de gestión eficiente, Moreira et al. (2020) argumentan que la inversión preventiva en estas discontinuidades resulta económicamente superior a la respuesta reactiva, evitando los costos exponenciales asociados a la pérdida de servicios ecosistémicos y a la compleja restauración post-incendio.

Figura 16.

Cartografía de las categorías de severidad en el Sitio prioritario Cerro Cayumanque



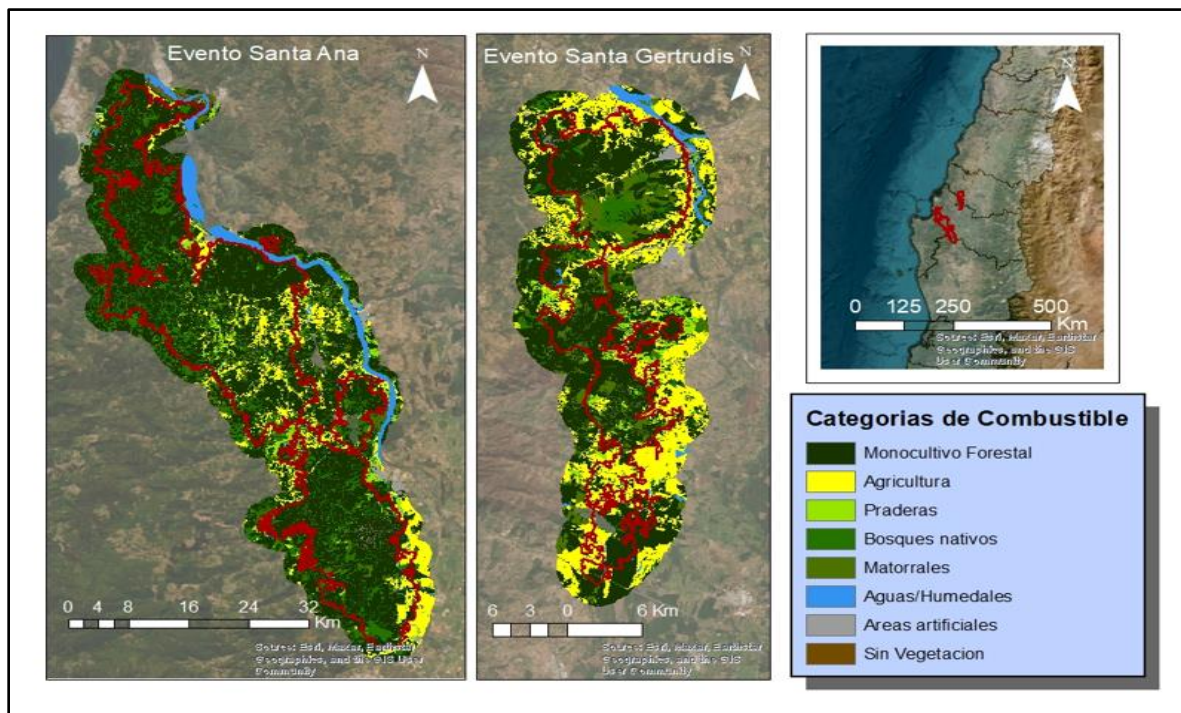
Nota: Basada en Imágenes satelitales Sentinel2/SIG/TDT y polígono del Sitio Prioritario (Ministerio del Medio Ambiente [MMA], s.f.)

Resultados OE2: Caracterización de las condiciones del combustible pre-incendio

A partir de la reclasificación de los usos y coberturas del suelo originales del catastro CONAF, se obtuvo la cartografía de tipologías de combustible para el área de estudio (Figura 17). Este resultado no solo ilustra la ubicación de las coberturas, sino que revela la configuración estructural del paisaje sobre el cual se desarrollaron los eventos.

Figura 17.

cartografía de las categorías de combustible presentes en el área de estudio



Nota: Basada en la transformación del catastro de recursos vegetacionales de CONAF según criterio de expertos.

Al analizar la composición del paisaje (Figura 2), se evidencia que los Monocultivos dominan ambos eventos (70.8% en Santa Ana; 57.5% en Santa Gertrudis), una proporción muy superior a su representatividad nacional (~18%). Mientras Santa Ana se muestra más homogéneo, Santa Gertrudis presenta mayor diversidad (17% agricultura, 16% matorrales). Esta configuración del paisaje es determinante para comprender la disponibilidad de energía, cuya relación estadística específica con los patrones de severidad e intensidad se desglosará detalladamente en la sección de Resultados (OE4).

A continuación, se presentan las superficies afectadas por categoría de combustible calculadas mediante la estadística zonal en ArcGIS (Tablas 13 y 14). Este desglose cuantitativo abarca la totalidad de las coberturas vegetales presentes en el área de estudio, permitiendo dimensionar la matriz de paisaje sobre la que se propagó el fuego.

Tabla 13.

Superficie afectada (ha) y porcentaje del total afectado por tipo de combustible en el Megaincendio Santa Ana (Considerando la envolvente del incendio).

Categoría de Combustible	Área SA (ha)	% del total
Monocultivo forestal	75520.9	70.8
Agricultura	6941.9	6.5
Praderas	1878.2	1.8
Bosques nativos	14741.2	13.8
Matorrales	6833.8	6.4
Agua/humedales	322.7	0.3
Áreas artificiales	55.5	0.1
Sin vegetación	316.3	0.3
Total	106610.4	100.0

Nota: Basada en categorías de combustible y envolvente del evento S.A.

Tabla 14

Superficie afectada (ha) y porcentaje del total afectado por tipo de combustible en el Megaincendio Santa Gertrudis (Considerando la envolvente del incendio).

Categoría de Combustible	Área SG (ha)	% del total
Monocultivo forestal	13659.8	57.54
Agricultura	4069.8	17.14
Praderas	333.1	1.40
Bosques nativos	1395.3	5.88
Matorrales	3889.8	16.39
Agua/humedales	96.3	0.41
Áreas artificiales	229.7	0.97
Sin vegetación	64.0	0.27
Total	23737.88	100

Nota: Basada en categorías de combustible y envolvente del evento S.G.

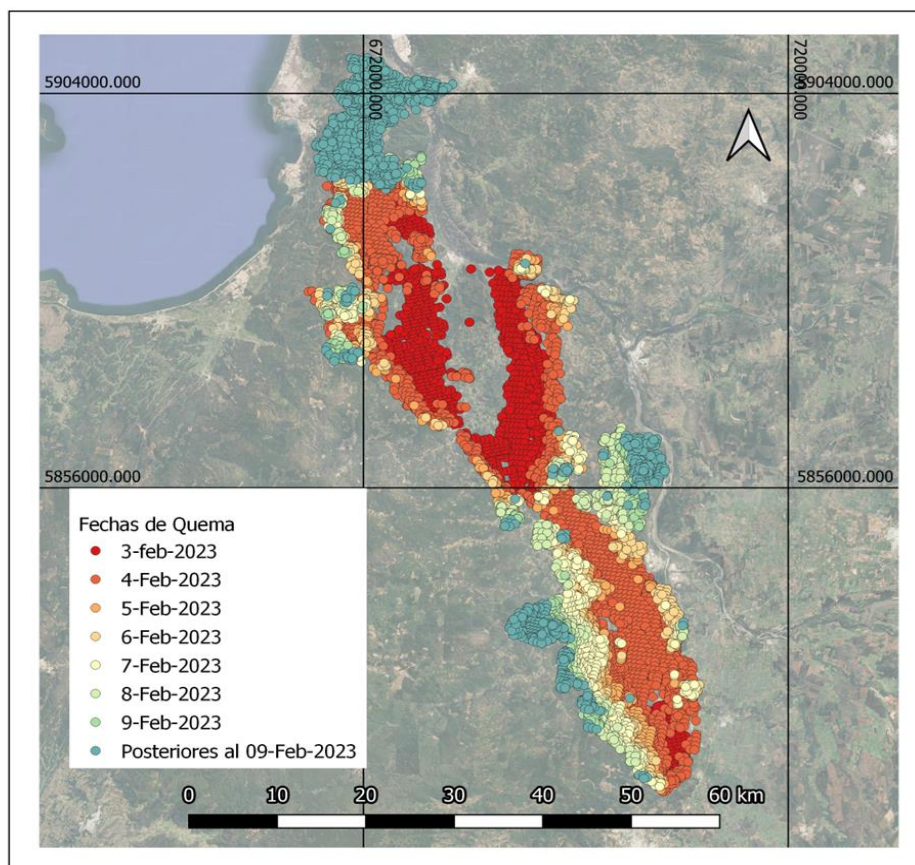
Resultados OE3: Reconocimiento de patrones asociados a la distribución de intensidad

Dinámica espaciotemporal de propagación del frente de fuego

La reconstrucción cronológica de los eventos Santa Ana y Santa Gertrudis, elaborada a partir del procesamiento de anomalías térmicas del sensor VIIRS bajo el criterio de continuidad espaciotemporal de Linley et al. (2022), permite visualizar la progresión diaria de los frentes de fuego (Figuras 18 y 19). Esta caracterización temporal resulta fundamental para comprender la distribución espacial de la intensidad, ya que identifica los momentos de expansión crítica del incendio.

Figura 18.

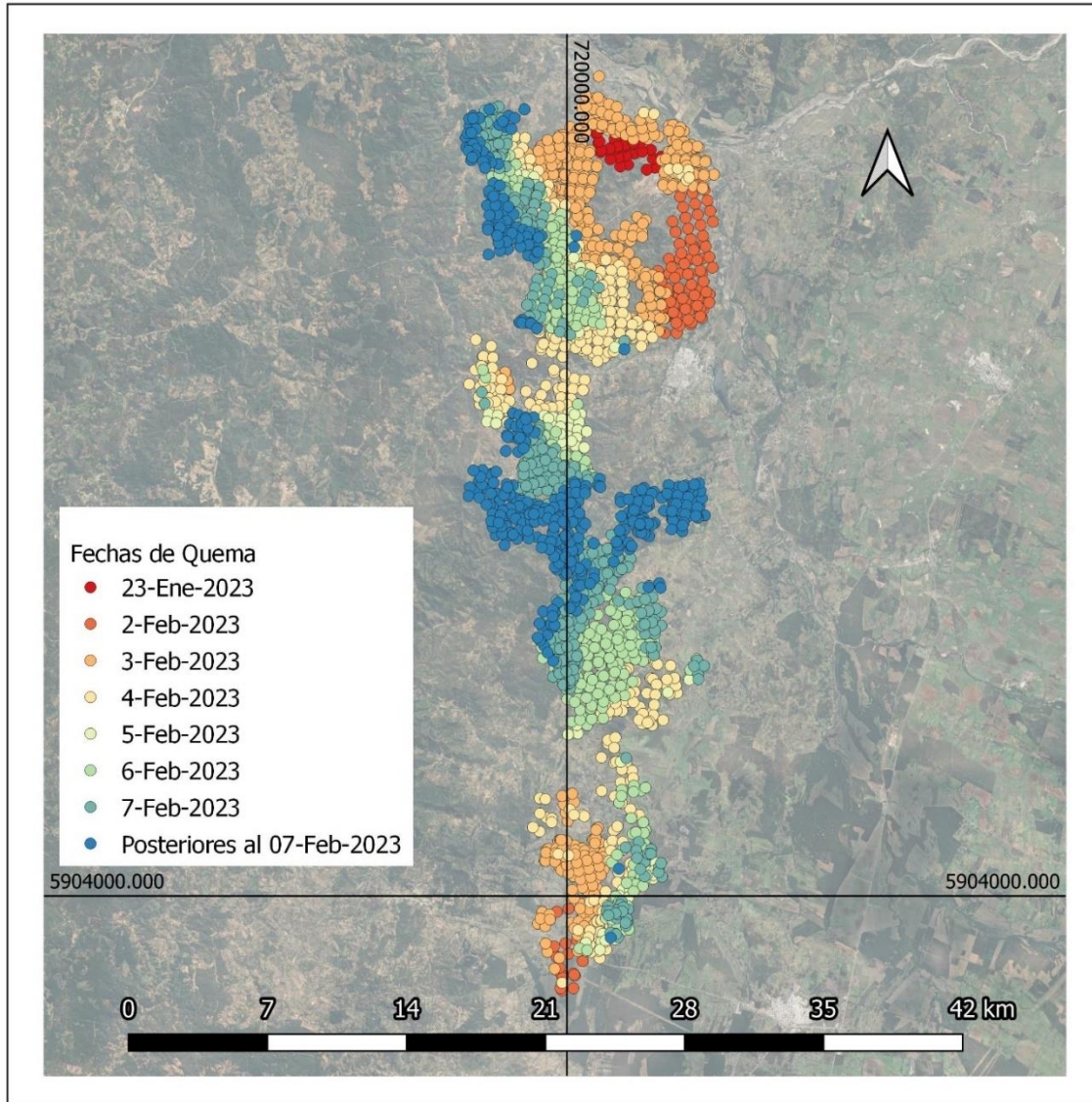
Cartografía de las fechas de quema Evento Santa Ana



Nota: Basada en anomalías térmicas de VIIRS.

Figura 19.

Cartografía de las fechas de quema Evento Gertrudis



Nota: Basada en anomalías térmicas de VIIRS.

El análisis espacial de las cronologías de la Tasa de Energía Radiada (FRP) revela hallazgos significativos sobre el comportamiento extremo de estos eventos.

En el caso de Santa Ana (Figura 18), se observa una discontinuidad o 'vacío de detección' en la zona de inicio del incendio. Este fenómeno ilustra una limitación crítica del monitoreo satelital frente al nuevo escenario de Eventos Extremos de Incendio (EWE): la resolución temporal del

sensor VIIRS (dos pasadas diarias) resultó insuficiente para registrar la fase de expansión explosiva. Tal como se documenta, el incendio Santa Ana superó las capacidades de muestreo del sensor al alcanzar velocidades de propagación excepcionales (avanzando hasta 9 km en 30 minutos). Esta dinámica acelerada se refleja en la Figura 18, donde la mayor parte del área del evento se vio afectada de forma concentrada durante los días 3 y 4 (anomalías en rojo y naranja).

En contraste, la cronología temporal de Santa Gertrudis (Figura 19) presenta un carácter menos extremo. La detección de las anomalías de FRP se encuentra más distribuida a lo largo de los días, sugiriendo una tasa de propagación significativamente menor que no superó la ventana de muestreo del sensor VIIRS.

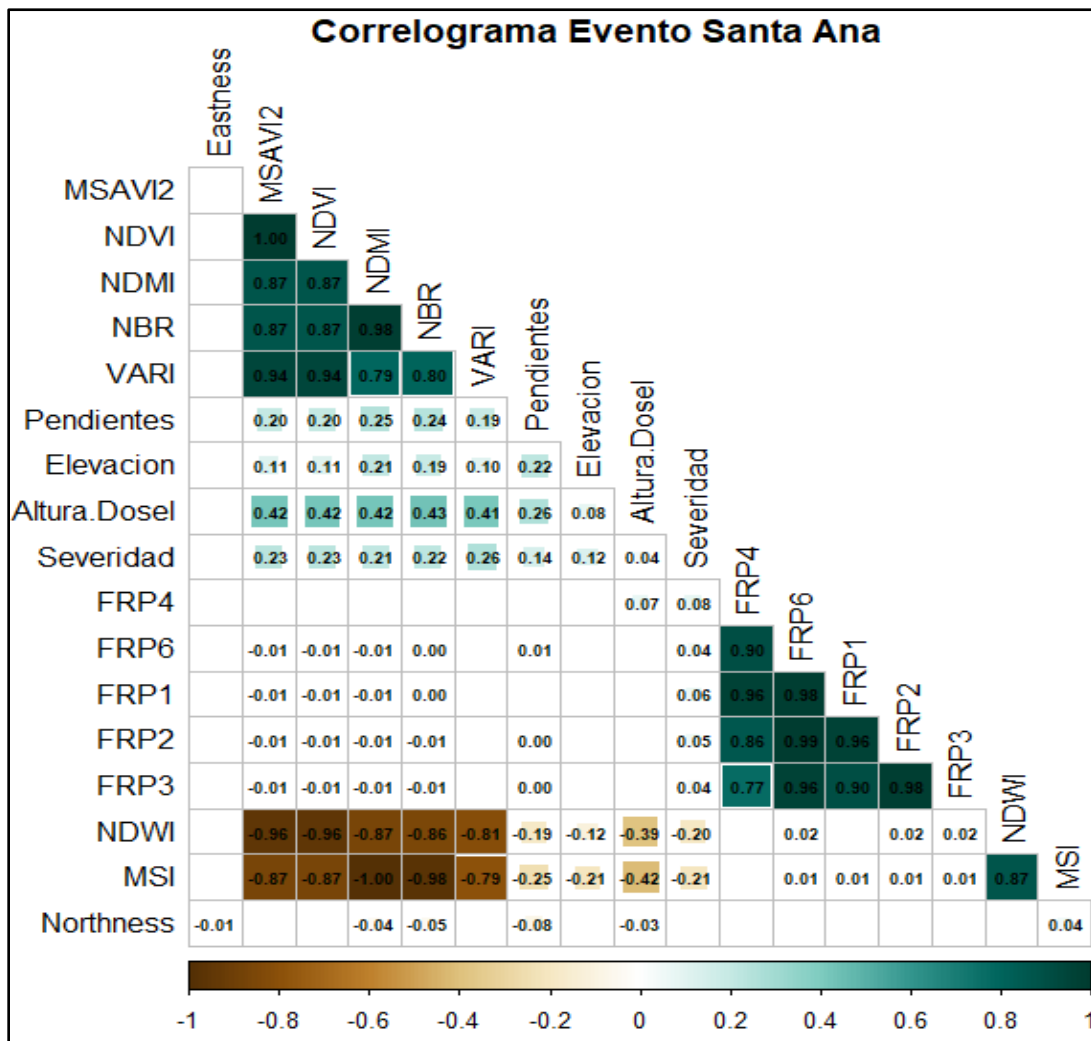
Finalmente, es importante precisar que esta sección se limita a la descripción de los patrones espaciales y temporales de la intensidad y propagación. La evaluación estadística profunda de cómo estos patrones de intensidad se vinculan con las tipologías de combustible y otras variables del paisaje se presentará detalladamente en el siguiente apartado (Resultados OE4), donde se integran los análisis de correlación y pruebas de hipótesis.

Resultados OE4: Relaciones entre índices de severidad, intensidad y condiciones del combustible

PCAs y Correlaciones

Figura 20:

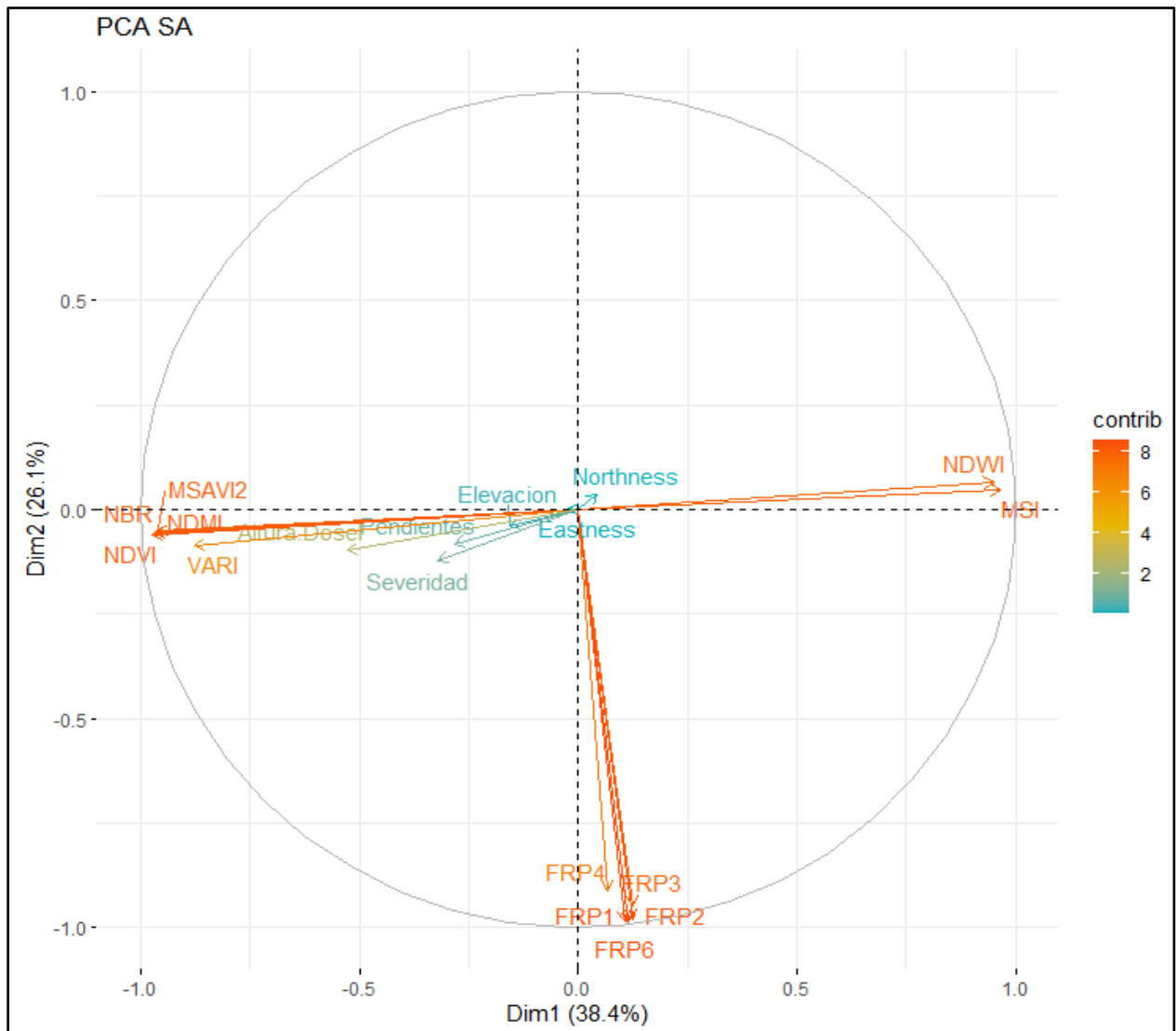
Correlograma de Spearman Evento Santa Ana



Discusión del resultado: En este correlograma de Pearson podemos observar varios grupos de variables que se correlacionan fuerte y positivamente entre sí, particularmente los índices espectrales NDMI, NDVI, NBR, VARI y MSAVI2 los cuales forman un grupo fuertemente cohesionado y completamente inverso a los índices NDWI y MSI, se llega a apreciar cierta tendencia al primer grupo mencionado a correlacionarse con las variables topográficas, la severidad pero sobre todo con la variable Altura del Dosel, aunque dicha correlación no sea tan fuerte ($\rho \sim 0.4$), otra agrupación fuertemente correlacionada es la de los FRPs,

Figura 21.

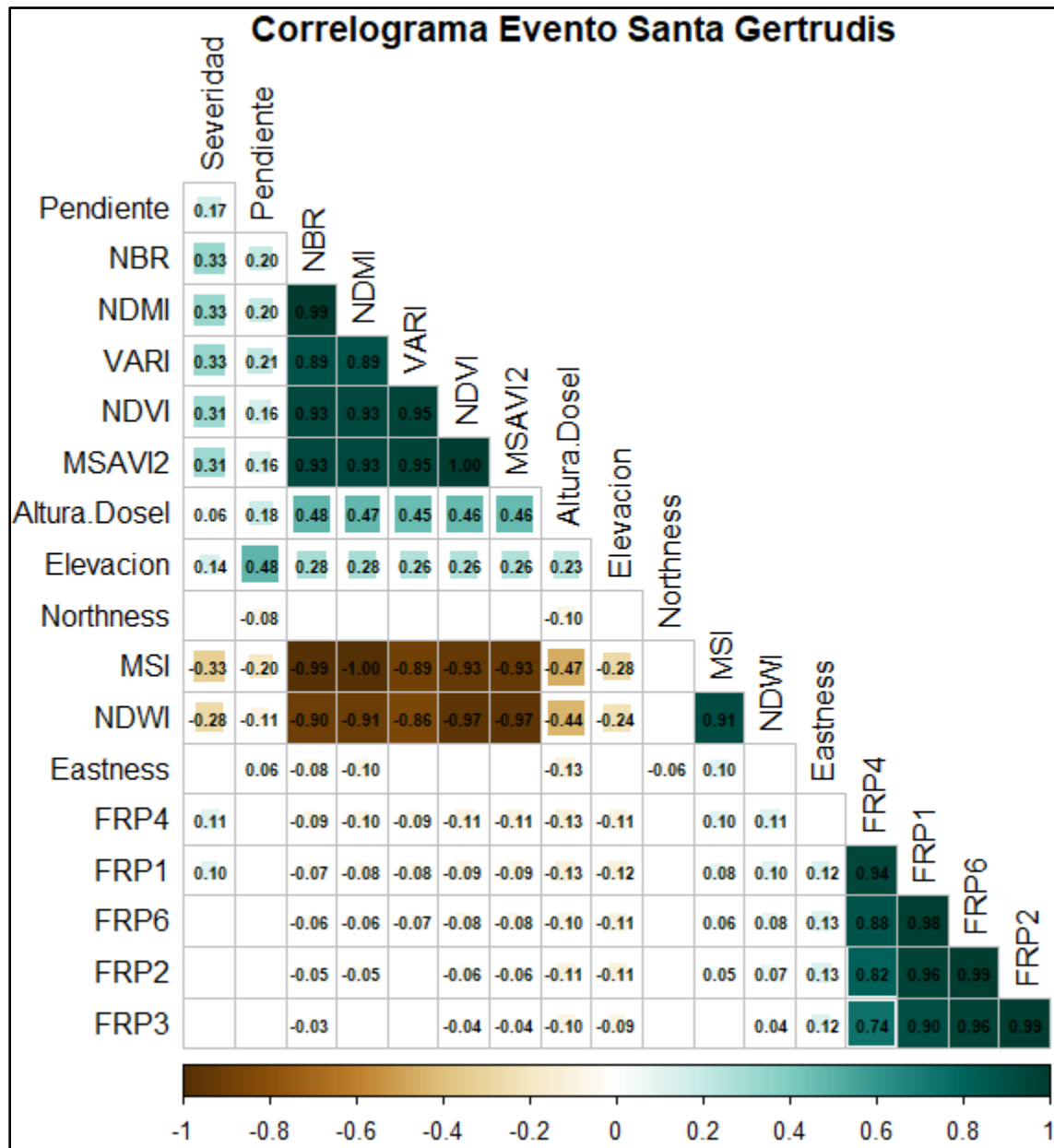
Análisis de componentes principales Evento Santa Ana



Discusión del resultado: En este PCA, vemos un comportamiento de las variables idéntico al referido en el resultado anterior, los principales índices espectrales forman un grupo fuertemente cohesionado, también vinculado con menos fuerza a las variables Altura del dosel, severidad y variables topográficas elevación y pendiente, comportamiento inverso de NDWI y MSI y FRPS fuertemente cohesionados, lo cual da a entender que existe una gran redundancia, se pudo haber considerado solo una de ellas para análisis PCA y correlaciones, las variables derivadas de la orientación Northness y Eastness no muestran un peso muy importante dentro del análisis como podemos apreciar

Figura 22.

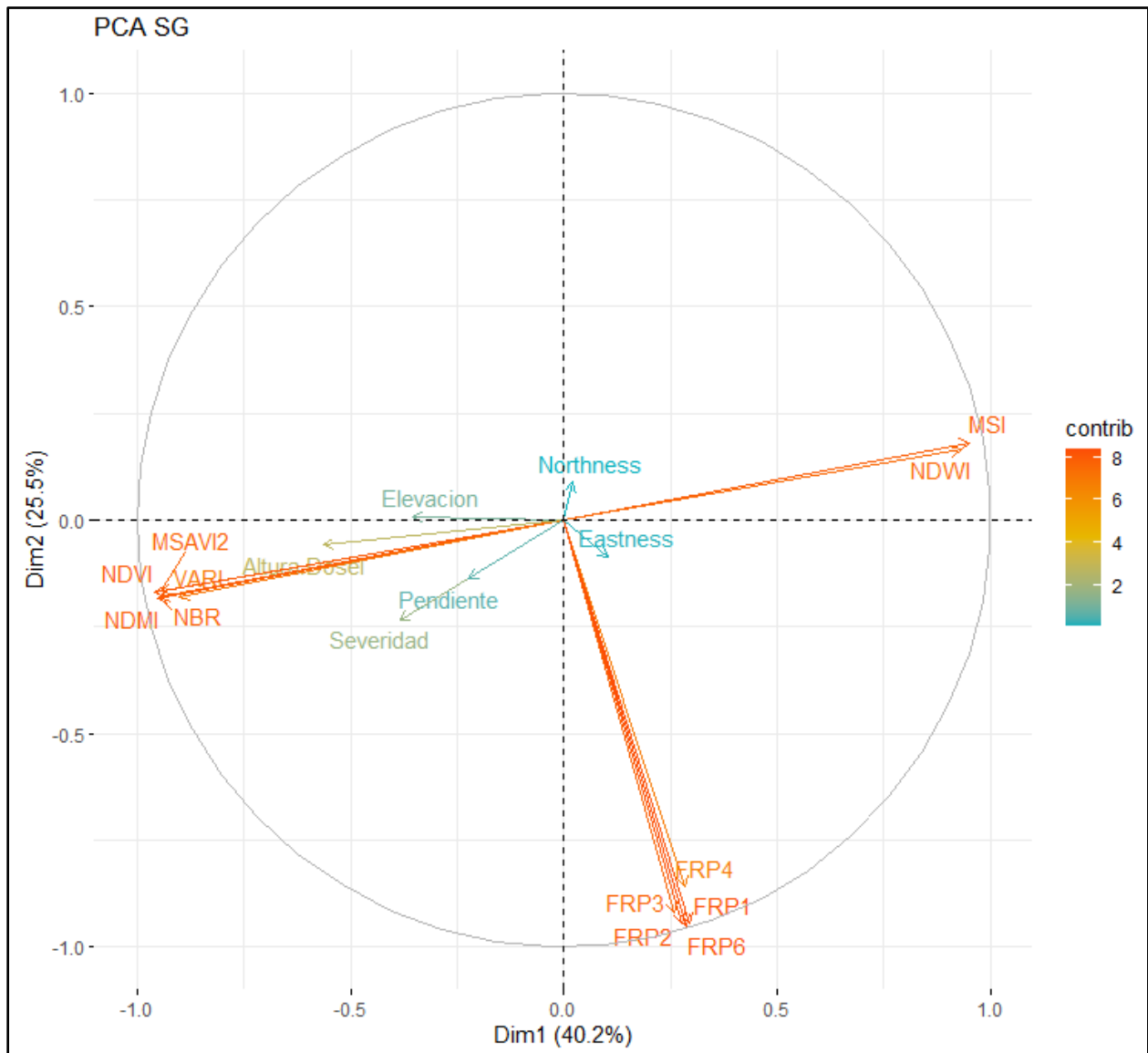
Correlograma de Spearman Evento Santa Gertrudis



Discusión del resultado: Al igual que en Santa Ana vemos patrones similares, Similar patrón de grupos de índices espectrales principales, variables topográficas y Altura del dosel ligeramente correlacionadas con estos, grupo inverso de IEs, grupos de FRPs, y comportamiento similar de todas las variables Las variables Eastness y Northness prácticamente sin correlación alguna con ninguna otra variable

Figura 23.

Análisis de componentes principales Evento Santa Gertrudis



Discusión del resultado: Mismo patrón que el descrito anteriormente, se puede llegar a inferir que las variables medidas en los incendios cuando se correlacionan en un estudio de análisis multivariado son independientes del sitio o evento, aunque habría también que tener en cuenta que no solo las variables son las mismas, sino que también las fuentes de datos y resoluciones son las mismas en ambos eventos

Resultados OE4: Resultados de Anova Welch:

El test de Welch ANOVA evalúa diferencias entre grupos sin asumir varianzas iguales, siendo robusto ante heterocedasticidad. La significancia estadística (p-valor) indica la probabilidad de observar diferencias tan extremas si no existieran diferencias reales entre grupos; valores $p < 0,05$ se consideran estadísticamente significativos. El tamaño del efecto épsilon cuadrado (ϵ^2) cuantifica la magnitud práctica de las diferencias, interpretándose según Lakens (2013) como: trivial (< 0.01), pequeño (0.01-0.06), mediano (0.06-0.14) o grande (> 0.14). Este parámetro es crucial porque diferencias estadísticamente significativas pueden tener escasa relevancia práctica si el tamaño del efecto es trivial.

Tabla 15.

Resultados del test de Anova de Welch para diferencias entre tipos de combustible

Evento	Variable	F	p-valor	ϵ^2	Interpretación
Santa Ana	Severidad	130,46	$< 0,001$	0,0276	Pequeño
Santa Ana	Intensidad	2,76	0,026	0,0006	Trivial
Santa Gertrudis	Severidad	242,58	$< 0,001$	0,0483	Pequeño
Santa Gertrudis	Intensidad	56,74	$< 0,001$	0,0117	Pequeño

Discusión del resultado: Los resultados revelan un patrón consistente pero matizado. La severidad mostró diferencias estadísticamente significativas en ambos eventos ($p < 0,001$), confirmando que el tipo de combustible influye en el daño. Sin embargo, los tamaños de efecto pequeños ($\epsilon^2 = 0,028$ SA; 0,048 SG) indican que el tipo de combustible explica solo 2,8% y 4,8% de la variabilidad total en severidad, respectivamente. Esto implica que más del 95% de la variación observada se debe a otros factores no evaluados en este análisis, tales como condiciones meteorológicas locales o de manejo, u interacciones complejas entre variables.

En intensidad, los tamaños de efecto resultaron despreciables para Santa Ana ($\epsilon^2 = 0,0006$) y mínimos para Santa Gertrudis ($\epsilon^2 = 0,012$). Estas cifras confirman que, pese a

la significancia estadística, el tipo de combustible carece de relevancia práctica para explicar la potencia del fuego en estos eventos.

Estos hallazgos relativizan al combustible como regulador primario. Bajo las condiciones extremas documentadas (110.000 kW/m y vientos >100 km/h), la virulencia del incendio homogeneiza el daño sobre la vegetación. Este resultado es consistente con Gómez-González et al. (2019) y Cordero et al. (2024), quienes proponen que sequías extremas superan umbrales donde diferencias entre tipos de combustible se minimizan. No obstante, la significancia estadística persistente sugiere que el combustible mantiene cierta influencia aunque secundaria frente a factores meteorológicos.

Resultados OE4: Comparaciones múltiples

A continuación, se presentan los contrastes pareados obtenidos mediante la prueba post-hoc de Games-Howell, seleccionada por su robustez ante la violación de los supuestos de homocedasticidad y el desbalance muestral inherente al diseño del estudio. El análisis se efectuó sobre los datos transformados (raíz cuadrada) para estabilizar la varianza. Se reportan la diferencia de medias, el error estándar y el intervalo de confianza al 95% (IC 95%) para estimar la precisión de las diferencias. La significancia estadística se indica siguiendo la convención estándar: ns (no significativo), * ($p < 0,05$), ** ($p < 0,01$) y *** ($p < 0,001$).

TABLA 16.*Comparaciones post-hoc de Games-Howell - Severidad Santa Ana*

Comparación	Diferencia	IC 95%	p-valor	Sig.
Agri - B.N.	0,122	[0,098, 0,147]	< 0,001	***
Agri - M.F.	0,130	[0,107, 0,153]	< 0,001	***
Agri - Mat	0,131	[0,108, 0,155]	< 0,001	***
Agri - Pra	0,001	[-0,021, 0,023]	1,000	ns
B.N. - M.F.	0,008	[-0,019, 0,034]	0,978	ns
B.N. - Mat	0,009	[-0,018, 0,036]	0,955	ns
B.N. - Pra	-0,121	[-0,147, -0,096]	< 0,001	***
M.F. - Mat	0,001	[-0,024, 0,027]	1,000	ns
M.F. - Pra	-0,129	[-0,153, -0,105]	< 0,001	***
Mat - Pra	-0,130	[-0,154, -0,106]	< 0,001	***

TABLA 17.*Comparaciones post-hoc de Games-Howell - Intensidad Santa Ana*

Comparación	Diferencia	IC 95%	p-valor	Sig.
Agri - B.N.	0,249	[-0,017, 0,515]	0,079	ns
Agri - M.F.	0,063	[-0,194, 0,319]	0,963	ns
Agri - Mat	0,245	[-0,006, 0,495]	0,059	ns
Agri - Pra	0,166	[-0,071, 0,403]	0,311	ns
B.N. - M.F.	-0,186	[-0,452, 0,080]	0,313	ns
B.N. - Mat	-0,004	[-0,265, 0,256]	1,000	ns
B.N. - Pra	-0,083	[-0,330, 0,164]	0,890	ns
M.F. - Mat	0,182	[-0,070, 0,433]	0,279	ns
M.F. - Pra	0,103	[-0,135, 0,340]	0,761	ns
Mat - Pra	-0,079	[-0,310, 0,152]	0,885	ns

TABLA 18.*Comparaciones post-hoc de Games-Howell - Severidad Santa Gertrudis*

Comparación	Diferencia	IC 95%	p-valor	Sig.
Agri - B.N.	0,174	[0,151, 0,196]	< 0,001	***
Agri - M.F.	0,105	[0,082, 0,127]	< 0,001	***
Agri - Mat	0,174	[0,151, 0,198]	< 0,001	***
Agri - Pra	-0,010	[-0,029, 0,010]	0,679	ns
B.N. - M.F.	-0,069	[-0,094, -0,044]	< 0,001	***
B.N. - Mat	0,001	[-0,025, 0,026]	1,000	ns
B.N. - Pra	-0,183	[-0,206, -0,161]	< 0,001	***
M.F. - Mat	0,070	[0,044, 0,096]	< 0,001	***
M.F. - Pra	-0,114	[-0,137, -0,092]	< 0,001	***
Mat - Pra	-0,184	[-0,207, -0,161]	< 0,001	***

TABLA 19.*Comparaciones post-hoc de Games-Howell - Intensidad Santa Gertrudis*

Comparación	Diferencia	IC 95%	p-valor	Sig.
Agri - B.N.	-0,122	[-0,465, 0,221]	0,938	ns
Agri - M.F.	0,755	[0,388, 1,122]	< 0,001	***
Agri - Mat	0,524	[0,151, 0,897]	0,001	**
Agri - Pra	1,450	[1,110, 1,790]	< 0,001	***
B.N. - M.F.	0,877	[0,526, 1,228]	< 0,001	***
B.N. - Mat	0,646	[0,289, 1,003]	< 0,001	***
B.N. - Pra	1,572	[1,250, 1,894]	< 0,001	***
M.F. - Mat	-0,231	[-0,611, 0,149]	0,485	ns
M.F. - Pra	0,696	[0,352, 1,040]	< 0,001	***
Mat - Pra	0,927	[0,577, 1,277]	< 0,001	***

Resultados OE4: Comparaciones significativas que involucran al monocultivo forestal

A fin de poder evaluar la hipótesis principal de este trabajo de investigación; **El monocultivo forestal presenta mayores niveles de severidad e intensidad que otros tipos de combustible**, se seleccionaron de entre las comparaciones múltiples, solo aquellas que siendo estadísticamente significativas ($p < 0,05$) involucraron al monocultivo forestal.

TABLA 20.

Comparaciones Significativas que involucran al monocultivo forestal

Megaincendio	Variable	Comparación	Diferencia de Medias	Interpretación	MF es más/menos
Santa Ana	Severidad	Agri vs M.F.	+0,130	Agrícola > MF	MENOS severo
Santa Ana	Severidad	M.F. vs Pra	-0,129	Pradera > MF	MENOS severo
Santa Ana	Intensidad	-	-	Sin diferencias significativas	-
Santa Gertrudis	Severidad	Agri vs M.F.	+0,105	Agrícola > MF	MENOS severo
Santa Gertrudis	Severidad	B.N. vs M.F.	-0,0692	MF > Bosque Nativo	MÁS severo
Santa Gertrudis	Severidad	M.F. vs Mat	+0,0698	MF > Matorral	MÁS severo
Santa Gertrudis	Severidad	M.F. vs Pra	-0,114	Pradera > MF	MENOS severo
Santa Gertrudis	Intensidad	Agri vs M.F.	+0,755	Agrícola > MF	MENOS intenso
Santa Gertrudis	Intensidad	B.N. vs M.F.	+0.877	Bosque Nativo > MF	MENOS intenso
Santa Gertrudis	Intensidad	M.F. vs Pra	+0.696	MF > Pradera	MÁS intenso

Discusión del resultado:

Discusión del resultado: Los resultados de las comparaciones muestran resultados tanto intuitivos como contraintuitivos; primeramente tenemos que en ambos eventos la severidad de quema del monocultivo forestal fue menor que en praderas y cultivos agrícolas, esto es entendible, pues en estas últimas coberturas los incendios de alta intensidad consumen el 100% de la biomasa, versus el monocultivo forestal, donde debido a la rápida propagación solo se consumen los doseles, manteniéndose sin quemar estructuras leñosas (troncos, ramas gruesas) así como el sotobosque si lo hay y los combustibles del suelo.

En Santa Gertrudis el monocultivo forestal exhibió una mayor severidad que el bosque nativo y los matorrales, estos resultados van en el sentido de lo que expresaron McWethy et al. (2018), de que existe una selectividad del fuego hacia las plantaciones por sobre otros usos como bosques nativos. No obstante, es necesario distinguir que estos autores evaluaron selectividad (preferencia de propagación) y no severidad (nivel de daño), por lo que una mayor frecuencia de fuego en plantaciones no implica necesariamente una mayor destrucción de biomasa en cada evento, aunque en este caso ambos fenómenos coincidieron. Además, cabe señalar que lo hicieron a una escala mucho mayor (incluyendo varias regiones, mientras que en este estudio se acotó el análisis a solo dos megaincendios). Adicionalmente, el tamaño de efecto pequeño ($R^2 = 0.048$) indica que estas diferencias explican solo 4,8% de variabilidad total, consistente con hallazgos de Gómez-González et al. (2019) y Cordero et al. (2024) donde condiciones meteorológicas extremas minimizan diferencias atribuibles al tipo de combustible, por lo cual, la interpretación de estos patrones requiere cautela.

En cuanto a la intensidad en el evento Santa Gertrudis nos encontramos con que el monocultivo forestal presentó mayor intensidad que las praderas, esto es intuitivo dado que el monocultivo presenta una mucho mayor carga de combustible con lo que necesariamente arde con mayor intensidad. También nos encontramos con que el monocultivo ardió con menor intensidad que el bosque nativo, lo cual resulta ligeramente contraintuitivo puesto que el monocultivo presentó una mayor severidad en el mismo evento. Finalmente, el resultado más inesperado fue que el monocultivo forestal presentó una menor intensidad de quema que el uso agrícola, lo cual no tiene sentido ya que el monocultivo forestal, al presentar definitivamente una mucho mayor carga de combustible que el uso agrícola, debió generar una mayor intensidad, al igual que ocurrió en Santa Ana y al igual que ocurrió versus las praderas.

Estos resultados reflejan una de las mayores limitaciones del presente estudio: la variable intensidad. La caracterización de intensidad mediante FRP-VIIRS resultó problemática. La resolución espacial de VIIRS es de 375m, significativamente más baja que Sentinel-2 (20m), lo cual dificulta establecer una correspondencia espacial directa píxel a píxel con la variable severidad. La resolución temporal (2 pasadas/día) de VIIRS resulta insuficiente para capturar dinámica horaria del fuego, como evidencian los vacíos de detección en Santa Ana donde el rápido avance superó la capacidad de muestreo del sensor. Adicionalmente, el promedio de cinco métodos de interpolación, si bien reduce ruido espacial, suaviza valores extremos de intensidad.

En consecuencia, las investigaciones venideras deberán tener un mayor cuidado al diseñar metodologías para la medición de esta variable. Como se mencionó en la sección de antecedentes, alternativas satelitales como GOES, Himawari-8/9 y Sentinel-3 SLSTR ofrecen diferentes balances entre resolución espacial y frecuencia de observación que podrían complementar las limitaciones de VIIRS. Por ejemplo, sensores geoestacionarios como GOES proporcionan mayor frecuencia temporal (datos cada 5-15 minutos) que permitirían capturar la dinámica horaria de los frentes de fuego, aunque a costa de menor resolución espacial. En última instancia, la caracterización robusta de intensidad en megaincendios podría requerir enfoques que integren múltiples fuentes de datos con diferentes fortalezas temporales y espaciales, o la consideración de métricas alternativas como la tasa de propagación del frente de fuego, derivada de análisis secuenciales de perímetros de incendio, metodología que ya fue implementada por CONAF (2023) en el análisis técnico oficial de la temporada de incendios 2022-2023.

Resultados OE4: Boxplots de severidad según categorías de orientación

Figura 24:

Distribución de Severidades por categoría de orientación en evento Santa Ana

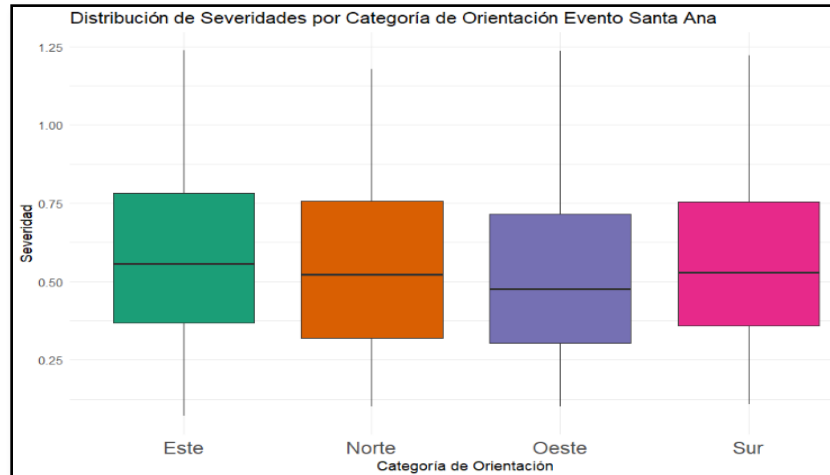
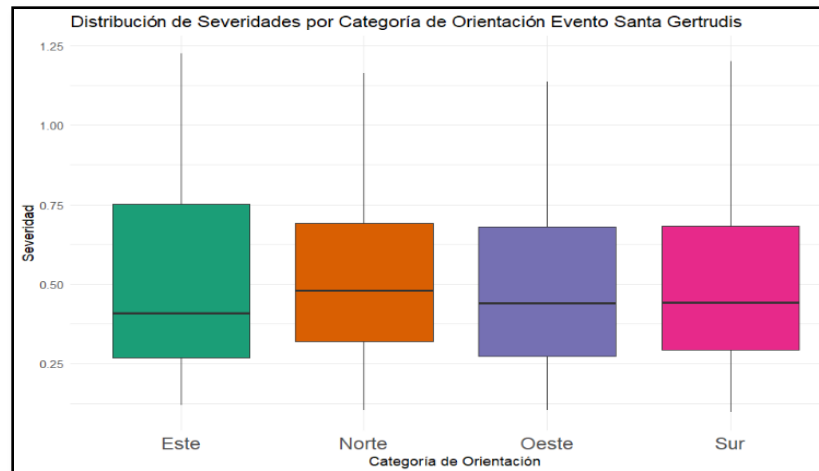


Figura 25.

Distribución de Severidades por categoría de orientación en evento Santa Gertrudis



Discusión del resultado: Aparentemente no existe una diferencia entre las distribuciones de categorías de orientación, quizá se podría considerar una menor severidad en laderas oeste en Santa Ana y una mayor severidad en laderas norte en Santa Gertrudis, no obstante estas no son diferencias notorias sino muy sutiles a simple vista, aparentemente el efecto de la variable orientación en el contexto de los megaincendios no es relevante, aunque tampoco se realizó un test estadístico para verificarlo.

V.- Conclusiones

La presente investigación, pretende introducir al conocimiento de los fenómenos de la naturaleza que son los incendios forestales. Se presenta un marco teórico en torno a la ciencia de los incendios, abarcándolos desde su origen. Enseguida y a lo largo de todo el trabajo se profundiza en la problemática de los devastadores fenómenos denominados Extreme Wildfire Events (EWE) y Megaincendios tanto en el mundo como en nuestro país, abordándolos tanto desde sus definiciones y caracterización teóricas como desde el punto de vista de la problemática ambiental que representan.

El trabajo indaga en la pregunta de cómo dos de los eventos más catastróficos de la historia de nuestro país, Santa Ana (100.723 ha) y Santa Gertrudis (21.913 ha), ocurridos en 2023, se desarrollaron y cómo se vinculan sus variables intrínsecas. Para ello se profundizó en conceptos, variables, metodologías, indicadores y herramientas utilizadas en su análisis, con el propósito de aportar al conocimiento de estos fenómenos, sirviendo de antecedente para futuras investigaciones.

A nivel técnico, esta investigación caracterizó primero la severidad de la quema de ambos eventos revelando que ambos eventos produjeron mayoritariamente áreas de severidad moderada-alta y alta ($dNBR > 0.44$). Destaca la afectación crítica del Sitio Prioritario Cerro Cayumanque, donde la alta severidad evidenció la vulnerabilidad de dicha área de conservación carente de zonas de amortiguamiento frente a matrices de combustible forestal continuo, recalcando la necesidad de invertir en discontinuidades preventivas para proteger la integridad ecológica de este tipo de sitios prioritarios para la conservación.

La caracterización del combustible mediante la estadística zonal confirmó la dominancia territorial del monocultivo forestal: en Santa Ana, las plantaciones ocuparon 75.520 hectáreas (70.8% del área total), mientras que en Santa Gertrudis representaron 13.660 hectáreas (57.5%). Esta dominancia explicó las mayores frecuencias absolutas de severidad alta observadas en los monocultivos y evidenció la necesidad de los análisis estadísticos controlados por el tamaño muestral para evaluar las diferencias significativas entre los tipos de combustible.

El análisis integró la energía liberada (intensidad) mediante FRP para caracterizar la dinámica de propagación y reconstruir la cronología de los frentes de fuego. Santa Ana evidenció una fase explosiva (9 km en 30 min, y la mayor parte del área quemada solo en los primeros dos días) que superó el muestreo satelital generando vacíos de detección, a diferencia de la progresión más lenta y distribuida de Santa Gertrudis.

Los análisis exploratorios mediante los componentes principales y correlaciones de Spearman demostraron patrones similares entre ambos eventos, señalando que las relaciones entre las variables son independientes del sitio específico cuando se utilizan las mismas fuentes de datos y resoluciones espaciales. Los índices espectrales relacionados con el vigor vegetacional y el contenido hídrico de la vegetación formaron grupos fuertemente cohesionados, correlacionados positivamente con la altura del dosel y las variables topográficas (elevación y pendiente), y presentando un comportamiento inverso respecto a los índices de estrés hídrico (NDWI, MSI). Esta similitud entre los eventos sugiere que los patrones observados reflejan las propiedades intrínsecas de las variables más que las características específicas de cada incendio. Las variables derivadas de la orientación (Northness, Eastness) no mostraron correlaciones significativas con la severidad ni con otras variables, y los análisis gráficos confirmaron la ausencia de diferencias notorias en la distribución de la severidad entre las categorías de orientación, sugiriendo que el efecto de la orientación no es relevante en el contexto de los megaincendios bajo las condiciones meteorológicas extremas que homogeneizan el comportamiento del fuego.

Los análisis estadísticos mediante el test de Welch ANOVA demostraron que el tipo de combustible ejerce una influencia estadísticamente significativa pero de magnitud práctica limitada sobre la severidad y la intensidad del fuego en los contextos de megaincendios. Los resultados revelaron las diferencias significativas entre los tipos de combustible ($p < 0,001$) en ambos eventos para la variable severidad, sin embargo, los tamaños de efecto pequeños ($\epsilon^2 = 0.028$ en Santa Ana; 0.048 en Santa Gertrudis) indican que el tipo de combustible explica únicamente entre un 2,8% y un 4,8% de la variabilidad total observada. Este hallazgo implica que más del 95% de la variación en la severidad se debe a otros factores no evaluados directamente en este estudio, particularmente las condiciones meteorológicas extremas documentadas durante ambos eventos (vientos superiores a 100 km/h, temperaturas extremas, humedad relativa crítica).

Para la variable intensidad, los tamaños de efecto fueron aún menores ($\epsilon^2 = 0.0006$ en Santa Ana; 0.012 en Santa Gertrudis), confirmando que bajo las condiciones meteorológicas extremas, las diferencias intrínsecas entre los tipos de combustible son eclipsadas por factores no considerados en dicho análisis, ya sean variables climáticas, topográficas, o interacciones complejas entre variables. No obstante, los resultados de la intensidad deben interpretarse con extrema cautela debido a importantes limitaciones metodológicas: la resolución espacial de VIIRS (375 m) resultó significativamente más gruesa que la de *Sentinel-2* (20 m) utilizado para

la severidad, y su frecuencia temporal (2 pasadas/día) fue insuficiente para capturar la dinámica horaria del fuego, como evidencian los vacíos de detección en Santa Ana donde el rápido avance superó la capacidad de muestreo del sensor. Adicionalmente, el proceso de interpolación espacial basado en el promedio de cinco métodos, si bien permite mitigar la incertidumbre inherente a cada método individual para generar una superficie continua, tuvo como efecto colateral el suavizado de los valores extremos (picos de intensidad), atenuando artificialmente las diferencias reales entre las categorías. Estos hallazgos son acordes con lo reportado por Gómez-González et al. (2019) y Cordero et al. (2024), quienes proponen que las sequías extremas superan unos umbrales donde las diferencias entre los tipos de combustible se minimizan.

En relación a la hipótesis planteada; "El monocultivo forestal presenta mayores niveles de severidad e intensidad que otros tipos de combustible", los resultados conducen a su rechazo parcial. Ante este rechazo, se formula la siguiente hipótesis alternativa: En eventos extremos (EWE), las condiciones extremas en las que los eventos se producen, el tipo de vegetación resulta un factor poco relevante. Las comparaciones múltiples mediante el test de Games-Howell mostraron que en ambos eventos, el monocultivo forestal presentó una menor severidad que las praderas y los cultivos agrícolas, resultado explicable por la combustión heterogénea característica de las estructuras forestales donde permanecen sin quemar las estructuras leñosas (truncos, ramas gruesas) así como el sotobosque si lo hay y los combustibles del suelo, generando valores moderados de dNBR. En contraste, en las praderas y los cultivos agrícolas la combustión consume prácticamente el 100% de la biomasa herbácea, generando un alto contraste espectral reflejado en los valores elevados de dNBR.

En Santa Gertrudis, el monocultivo exhibió una mayor severidad que el bosque nativo y los matorrales. Si bien este hallazgo parece converger con la selectividad del fuego hacia plantaciones exóticas reportada por McWethy et al. (2018), es fundamental distinguir que dicha selectividad refiere a la probabilidad de propagación y no necesariamente al nivel de daño ecológico (severidad). Aunque en este evento ambos fenómenos coincidieron, el tamaño de efecto pequeño ($\epsilon^2 = 0.048$) revela que el tipo de cobertura explica apenas un 4.8% de la variabilidad total. Esto confirma que, aun cuando existen diferencias estadísticas, la influencia del combustible es poco relevante bajo condiciones meteorológicas extremas, requiriendo cautela al extrapolar una relación causal directa y única.

Los hallazgos de esta investigación aportan elementos para reflexionar sobre la gestión de los incendios forestales. Los tamaños de efecto pequeños observados (ϵ^2 entre 0.028 y 0.048)

indican que el tipo de combustible explica solo entre un 2,8% y un 4,8% de la variabilidad en la severidad bajo las condiciones de estos dos megaincendios. Este resultado sugiere que otros factores no evaluados en este estudio ejercen una influencia considerablemente mayor. Un aspecto crucial no evaluado en este trabajo es el efecto del manejo de las plantaciones forestales, ya en su momento Fernandes et al. (2019), en su estudio sobre plantaciones de eucalipto en Portugal, reconoce que las diferencias en el manejo (abandono vs. manejo activo, edad de las plantaciones, presencia de sotobosque) pueden influir significativamente en el comportamiento del fuego en los monocultivos, lo que representa una limitación importante en la interpretación de los resultados obtenidos. Las investigaciones futuras podrían ampliar el alcance de este estudio explorando múltiples eventos en diferentes regiones y condiciones meteorológicas, lo que permitiría evaluar si los patrones observados son generalizables o específicos del contexto de estos dos megaincendios. Para la caracterización de la intensidad, se recomienda explorar los enfoques que integren los datos de múltiples sensores con diferentes fortalezas temporales y espaciales (GOES, Himawari-8, Sentinel-3 SLSTR), o considerar las métricas alternativas como la tasa de propagación del frente de fuego derivada de los análisis secuenciales de los perímetros. Particularmente importante sería la incorporación de información detallada sobre el manejo de las plantaciones forestales (densidad, edad, manejo activo vs. abandono, composición de sotobosque), lo que permitiría distinguir entre los efectos atribuibles al tipo de combustible per se versus los efectos atribuibles a las prácticas de manejo forestal.

En síntesis, esta investigación confirma que el tipo de combustible ejerce una influencia secundaria en la severidad de la quema durante megaincendios bajo condiciones meteorológicas extremas, sugiriendo que otros factores no evaluados directamente ejercen una influencia considerablemente mayor. Este hallazgo subraya la complejidad de los megaincendios como fenómenos donde múltiples factores interactúan, y señala la necesidad de continuar investigando para comprender mejor los mecanismos que determinan el comportamiento del fuego en condiciones extremas. A este respecto, la implementación de plataformas como Google Earth Engine (GEE) demostró ser una herramienta esencial: la capacidad de procesar terabytes de imágenes satelitales de forma eficiente mediante la computación en la nube y el acceso a datos y software gratuitos no solo superó las barreras del procesamiento local, sino que estableció un precedente metodológico que permite que la ingeniería ambiental se posicione en la vanguardia de la teledetección operativa. Esta capacidad técnica potencia la interpretación ambiental de los siniestros y abre nuevas posibilidades de gestión del riesgo, facilitando el desarrollo de modelos predictivos y de gestión de riesgo a la escala de los Eventos de Clima Extremo (ECE), un requisito ineludible para la adaptación al nuevo régimen de incendios en el Centro-Sur del país.

VI.- Contribución a los ODS

En particular, este trabajo de tesis tributa a las siguientes metas de los ODS:

13.1 Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países.

15.1 Para 2020, velar por la conservación, el restablecimiento y el uso sostenible de los ecosistemas terrestres y los ecosistemas interiores de agua dulce y los servicios que proporcionan, en particular los bosques, los humedales, las montañas y las zonas áridas, en consonancia con las obligaciones contraídas en virtud de acuerdos internacionales.

3.d Reforzar la capacidad de todos los países, en particular los países en desarrollo, en materia de alerta temprana, reducción de riesgos y gestión de los riesgos para la salud nacional y mundial.

Fuente: Organización de las Naciones Unidas. (s.f.)

VII.- Referencias

1. Papers

Andela, N., Morton, D. C., Giglio, L., Chen, Y., van der Werf, G. R., Kasibhatla, P. S., DeFries, R. S., Collatz, G. J., Hantson, S., Kloster, S., Bachelet, D., Forrest, M., Lasslop, G., Li, F., Mangeon, S., Melton, J. R., Yue, C., & Randerson, J. T. (2019). The Global Fire Atlas of individual fire size, duration, speed and direction. *Earth System Science Data*, 11(2), 529-552. <https://doi.org/10.5194/essd-11-529-2019>

Arroyo, L. A., Pascual, C., & Manzanera, J. A. (2008). Fire models and methods to map fuel types: The role of remote sensing. *Forest Ecology and Management*, 256(6), 1239-1252. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.06.048>

Blanca, M. J., Alarcón, R., Arnau, J., Bono, R., & Bendayan, R. (2017). Non-normal data: Is ANOVA still a valid option? *Psicothema*, 29(4), 552-557. <https://doi.org/10.7334/psicothema2016.383>

Bowman, D. M. J. S., Balch, J. K., Artaxo, P., Bond, W. J., Carlson, J. M., Cochrane, M. A., D'Antonio, C. M., DeFries, R. S., Doyle, J. C., Harrison, S. P., Johnston, F. H., Keeley, J. E., Krawchuk, M. A., Kull, C. A., Marston, J. B., Moritz, M. A., Prentice, I. C., Roos, C. I., Scott, A. C., ... Pyne, S. J. (2011). The human dimension of fire regimes on Earth. *Journal of Biogeography*, 38(12), 2223-2236. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2011.02595.x>

Bowman, D. M. J. S., O'Brien, J. A., & Goldammer, J. G. (2013). Pyrogeography and the Global Quest for Sustainable Fire Management. *Annual review of environment and resources*, 38, 57-80. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-082212-134049>

Bowman, D. M. J. S., Moreira-Muñoz, A., Kolden, C. A., Chávez, R. O., Muñoz, A. A., Salinas, F., González-Reyes, Á., Rocco, R., de la Barrera, F., Williamson, G. J., Borchers, N., Cifuentes, L. A., Abatzoglou, J. T., & Johnston, F. H. (2018). Human-environmental drivers and impacts of the globally extreme 2017 Chilean fires. *Ambio*, 48(1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s13280-018-1084-1>

Castillo, M., & Garfias, R. (2010). Estudio del comportamiento del fuego mediante simulación de incendios forestales en Chile. *Geographicalia*, 58, 45-60. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/169068>

Castillo, M. E., Molina, J. R., Rodríguez y Silva, F., García-Chevesich, P., & Garfias, R. (2017). A system to evaluate fire impacts from simulated fire behavior in Mediterranean areas of Central Chile. *Science of the Total Environment*, 601-602*, 1679-1688. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.139>

Castillo Soto, M. E., Saavedra S., J., & Brull B., J. (2019). Fire severity in mega wildfires in Chile in 2017: Actions to improve the protection system. *Cadernos de Geografía*, 26(1), 1-12. https://doi.org/10.14195/1647-7723_26-1_1

Ciocca, I., Fernández, A., Jaque, E., Justino, F., Schumacher, V., Silva, A. S., Muñoz, A., & de la Barrera, F. (2023). Increased wildfire hazard along South-Central Chile under the RCP8.5

- scenario as revealed by high-resolution modeling. *Environmental Research Letters*, 18(3), Article 034023. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acba33>
- Cordero, R. R., Feron, S., Damiani, A., Carrasco, J., Karas, C., Wang, C., Kraamwinkel, C. T., & Beaulieu, A. (2024). Extreme fire weather in Chile driven by climate change and El Niño-Southern Oscillation (ENSO). *Scientific Reports*, 14(1), Article 1234. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52481-x>
- de la Barrera, F., Barraza, F., Favier, P., Ruiz, V., & Quense, J. (2018). Megafires in Chile 2017: Monitoring multiscale environmental impacts of burned ecosystems. *Science of the Total Environment*, 637–638, 1526–1536. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.119>
- Duane, A., Castellnou, M., & Brotons, L. (2021). Towards a comprehensive look at global drivers of novel extreme wildfire events. *Climatic Change*, 165(1), Article 43. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03066-4>
- Dowdy, A. J., Ye, H., Pepler, A., Thatcher, M., Osbrough, S. L., Evans, J. P., Di Virgilio, G., & McCarthy, N. (2019). Future changes in extreme weather and pyroconvection risk factors for Australian wildfires. *Scientific Reports*, 9, Article 10073. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46362-x>
- Dubayah, R., Blair, J. B., Goetz, S., Fatoyinbo, L., Hansen, M., Healey, S., Hofton, M., Hurtt, G., Kellner, J., Luthcke, S., Armston, J., Tang, H., Duncanson, L., Hancock, S., Jantz, P., Marselis, S., Patterson, P. L., Qi, W., & Silva, C. (2022). The global ecosystem dynamics investigation: high-resolution laser ranging of the earth's forests and topography. *Science of Remote Sensing*, 5, Article 100002. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2021.100002>
- Fernandes, P. M., Guiomar, N., & Rossa, C. G. (2019). Analysing eucalypt expansion in Portugal as a fire-regime modifier. *Science of the Total Environment*, 666, 79-88. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.237>
- Fernandes, P. M. (2019). Variation in the Canadian Fire Weather Index thresholds for increasingly larger fires in Portugal. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(7), 1457-1467. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-1457-2019>
- Fromm, M., Tupper, A., Rosenfeld, D., Servranckx, R., & McRae, R. (2006). Violent pyroconvective storm devastates Australia's capital and pollutes the stratosphere. *Geophysical Research Letters*, 33(5), L05815. <https://doi.org/10.1029/2005GL025161>
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. (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>
- Games, P. A., & Howell, J. F. (1976). Pairwise multiple comparison procedures with unequal N's and/or variances: A Monte Carlo study. *Journal of Educational Statistics*, 1(2), 113-125. <https://doi.org/10.2307/1164979>
- Gaines, S. D., & Denny, M. W. (1993). The largest, smallest, highest, lowest, longest, and shortest: Extremes in ecology. *Ecology*, 74(6), 1677-1692. <https://doi.org/10.2307/1939926>

- Giglio, L., Schroeder, W., & Justice, C. O. (2016). The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. *Remote Sensing of Environment*, 178, 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.054>
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Stark, R., & Rundquist, D. (2002). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 76-87. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00289-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00289-9)
- Gao, X. (1996). NDMI—A New Index for Delineating Burned Areas in Forest Ecosystems. En J. J. S. (Ed.), *Proceedings of the 16th Biennial Workshop on Color Photography and Videography for Resource Assessment* (pp. 52–60). American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Gao, B. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257-266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Gómez González, S., Ojeda, F., & Fernandes, P. M. (2018). Portugal and Chile: Longing for sustainable forestry while rising from the ashes. *Environmental Science and Policy*, 81, 104-112. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.11.006>
- Gómez-González, S., González, M. E., Paula, S., Díaz-Hormazábal, I., Lara, A., & Delgado-Baquerizo, M. (2019). Temperature and agriculture are largely associated with fire activity in Central Chile across different temporal periods. *Forest Ecology and Management*, 453, 117-126. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.12.027>
- González, M., Lara, A., & Bosnich, J. (2010). Cambio climático y su impacto potencial en la ocurrencia de incendios forestales en la zona centro-sur de Chile (33°-42°S). *Bosque*, 31(3), 239-248. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002010000300002>
- González, M. E., Lara, A., Urrutia-Jalabert, R., & Bosnich, J. (2018). Climate change and the megadrought in Central Chile: Impacts on vegetation flammability and wildfire risk. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123(5), 1725-1742. <https://doi.org/10.1002/2017JG004320>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Hunt, E. R., & Rock, B. N. (1989). Detection of changes in leaf water content using near- and middle-infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment*, 30(1), 43-54. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90046-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90046-1)
- Jain, P., Coogan, S. C. P., Subramanian, S. G., Crowley, M., Taylor, S., & Flannigan, M. D. (2020). A review of machine learning applications in wildfire science and management. *Environmental Reviews*, 28(4), 478-505. <https://doi.org/10.1139/er-2020-0019>
- Johnston, J. M., Wooste, M. J., Paugam, R., Wang, X., Lynham, T. J., & Johnston, L. M. (2017). Direct estimation of Byram's fire intensity from infrared remote sensing imagery. *International Journal of Wildland Fire*, 26(8), 668-684. <https://doi.org/10.1071/WF16165>

- Kane, V. R., Lutz, J. A., Roberts, S. L., Smith, D. F., McGaughey, R. J., Povak, N. A., & Brooks, M. L. (2010). Landscape-scale effects of fire severity on mixed-conifer and red fir forest structure in Yosemite National Park. *Forest Ecology and Management*, 287(1), 17-31. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.08.044>
- Katz, R. W., Brush, G. S., & Parlange, M. B. (2005). Statistics of extremes: Modeling ecological disturbances. *Ecology*, 86(5), 1124-1134. <https://doi.org/10.1890/04-0606>
- Keeley, J. E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), 116-126. <https://doi.org/10.1071/WF07049>
- Krawchuk, M. A., Moritz, M. A., Parisien, M.-A., Van Dorn, J., & Hayhoe, K. (2009). Global pyrogeography: The current and future distribution of wildfire. *PLoS ONE*, 4(4), e5102. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0005102>
- Kremens, R. L., Smith, A. M. S., & Dickinson, M. B. (2012). Fire metrology: Current and future directions in physics-based measurements. *Fire Ecology*, 8(1), 57-77. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0801057>
- Lakens, D. (2013). Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science: A practical primer for t-tests and ANOVAs. *Frontiers in Psychology*, 4, Article 863. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00863>
- Lang, N., Jetz, W., Schindler, K., & Wegner, J. D. (2022). A high-resolution canopy height model of the Earth. *Nature Ecology & Evolution*, 6(7), 940-952. <https://doi.org/10.1038/s41559-022-01714-1>
- Linley, G. D., Jolly, C. J., Doherty, T. S., Nimmo, D. G., & Bowman, D. M. J. S. (2022). What do you mean, 'megafire'? *Global Ecology and Biogeography*, 31(10), 1906-1922. <https://doi.org/10.1111/geb.13499>
- Matus, F. J., Duarte, E., Rojas, C., Smith-Ramírez, C., Merino, C., Aburto, F., ... & Morales, L. (2023). *Forest wildfires in Chile: Effects on soil degradation and damage mitigation* [Preprint]. <https://doi.org/10.20944/preprints202306.1802.v1>
- McWethy, D., Pauchard, A., García, R., Holz, A., González, M., Veblen, T., Stahl, J., & Currey, B. (2018). Landscape drivers of recent fire activity (2001-2017) in south-central Chile. *PLOS ONE*, 12(10), Article e0205287. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205287>
- McWethy, D. B., Garreaud, R. D., Holz, A., & Pederson, G. T. (2021). Broad-scale surface and atmospheric conditions during large fires in south-central Chile. *Fire*, 4(2), Article 28. <https://doi.org/10.3390/fire4020028>
- Miranda, A., Mentler, R., Moletto-Lobos, I., Alfaro, G., Aliaga, L., Balbontín, D., Barraza, M., Baumbach, S., Calderón, P., Cárdenas, F., Castillo, I., Contreras, G., de la Barra, F., Galleguillos, M., González, M. E., Hormazábal, C., Lara, A., Mancilla, I., Muñoz, F., Oyarce, C., Pantoja, F., Ramírez, R., & Urrutia, V. (2022). *The Landscape Fire Scars Database: Mapping historical burned area and fire severity in Chile*. *Earth System Science Data Discussions* [Preprint]. <https://doi.org/10.5194/essd-2021-467>
- Moody, J. A., & Ebel, B. A. (2012). Hyper-dry conditions provide new insights into the cause of extreme floods after wildfire. *Catena*, 93, 58-63. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.01.004>

- Moreira, F., Ascoli, D., Safford, H., Adams, M. A., Moreno, J. M., Pereira, J. M. C., Catry, F. X., Armesto, J., Bond, W., González, M. E., Curt, T., Koutsias, N., McCaw, L., Price, O., Pausas, J. G., Rigolot, E., Stephens, S., Tavsanoglu, C., Vallejo, V. R., ... Fernandes, P. M. (2020). Wildfire management in Mediterranean-type regions: paradigm change needed. *Environmental Research Letters*, 15(1), 011001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab541e>
- Pausas, J. G., & Keeley, J. E. (2009). A burning story: The role of fire in the history of life. *Bioscience*, 59(7), 593-601. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.7.10>
- Pearson, K. (1901). On Lines and Planes of Closest Fit to Systems of Points in Space. *Philosophical Magazine*, 2(11), 559–572. <https://doi.org/10.1080/14786440109462720>
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., & Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48(2), 119-126. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1)
- Razali, N. M., & Wah, Y. B. (2011). Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 3(1), 21–33. <https://doi.org/10.5539/jmr.v3n1p21>
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS (NASA SP-351). NASA. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>
- Sarricolea, P., Serrano-Notivoli, R., Fuentealba, M., Hernández-Mora, M., de la Barrera, F., Smith, P., & Meseguer-Ruiz, Ó. (2019). Recent wildfires in Central Chile: Detecting links between burned areas and population exposure in the wildland urban interface. *Science of the Total Environment*, 693, 133-145. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.317>
- Schroeder, W., Oliva, P., Giglio, L., & Csiszar, I. A. (2014). The New VIIRS 375 m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment. *Remote Sensing of Environment*, 143, 85-96. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.12.008>
- Spearman, C. (1904). The Proof and Measurement of Association between Two Things. *American Journal of Psychology*, 15(1), 72–101. <https://doi.org/10.2307/1412159>
- Stehman, S. V. (2012). Impact of sample size allocation when using stratified random sampling to estimate accuracy and area of land-cover change. *Remote Sensing Letters*, 3(2), 111-120. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.541950>
- Tanase, M. A., Gonzalez Nova, J. P., Marino, E., Aponte, C., Tomé, J. L., Yáñez, L., Madrigal, J., Guijarro, M., & Hernando, C. (2022). Characterizing live fuel moisture content from active and passive sensors in a Mediterranean environment. *Forests*, 13(11), Article 1846. <https://doi.org/10.3390/f13111846>
- Tedim, F., Leone, V., Amraoui, M., Bouillon, C., Coughlan, M. R., Delogu, G. M., Fernandes, P. M., Ferreira, C., McCaffrey, S., McGee, T. K., Parente, J., Paton, D., Pereira, M. G., Ribeiro, L. M., Viegas, D. X., & Xanthopoulos, G. (2018). Defining extreme wildfire events: Difficulties, challenges, and impacts. *Fire*, 1(1), Article 9. <https://doi.org/10.3390/fire1010009>
- Tukey, J. W. (1949). Comparing individual means in the analysis of variance. *Biometrics*, 5(2), 99-114. <https://doi.org/10.2307/3001913>

Urrutia-Jalabert, R., González, M. E., González-Reyes, Á., Lara, A., Garreaud, R., & Rojas, M. (2018). Climate variability and forest fires in central and south-central Chile. *Ecosphere*, 9(4), Article e02171. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2171>

Welch, B. L. (1951). On the comparison of several mean values: An alternative approach. *Biometrika*, 38(3/4), 330-336. <https://doi.org/10.2307/2332579>

Zhao, Y., Feng, D., Yu, L., Wang, X., Chen, Y., Bai, Y., Hernández, H. J., Galleguillos, M., Estades, C., Biging, G. S., Radke, J. D., & Gong, P. (2016). Detailed dynamic land cover mapping of Chile: Accuracy improvement by integrating multi-temporal data. *Remote Sensing of Environment*, 183, 170-185. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.05.022>

2. Libros:

Castro Rego, F., Morgan, P., Fernandes, P., & Hoffman, C. (2021). Fire regimes, landscape dynamics, and landscape management. In F. Castro Rego, P. Morgan, P. Fernandes, & C. Hoffman, *Fire science* (pp. 287-314). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69815-7_12

Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio* (3ª ed.). Ariel. ISBN: 978-84-344-8073-3

Field, A., Miles, J., & Field, Z. (2012). *Discovering statistics using R*. Sage Publications. <https://uk.sagepub.com/en-gb/eur/discovering-statistics-using-r/book236067>

Fisher, R. A. (1934). *Statistical methods for research workers* (5th ed.). Oliver and Boyd. Indian Institute of Science, Bangalore. <https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.205971>

Kane, J. M., & Prat-Guitart, N. (2018). Fuel moisture. En S. L. Manzello (Ed.), *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8_115-1

Krebs, C. J. (1999). *Ecological methodology* (2nd ed.). Benjamin Cummings. ISBN-13: 978-0321021731.

Levene, H. (1960). Robust tests for equality of variances. En I. Olkin (Ed.), *Contributions to probability and statistics: Essays in honor of Harold Hotelling* (pp. 278-292). Stanford University Press. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2488563>

Pyne, S. J., Andrews, P. L., & Laven, R. D. (1996). *Introduction to wildland fire* (2nd ed.). John Wiley & Sons. ISBN-13: 978-0471549130.

Rein, G. (2016). Smouldering Combustion. En M. J. Hurley (Ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (5ª ed., pp. 581–603). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0_19

Resco de Dios, V. (2020). *Plant-fire interactions: Applying ecophysiology to wildfire management*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-41192-3>

Tedim, F., Leone, V., Coughlan, M., Bouillon, C., Xanthopoulos, G., Royé, D., Correia, F. J. M., & Ferreira, C. (2020). Extreme wildfire events: The definition. En F. Tedim, V. Leone, & C. Ferreira (Eds.), *Extreme Wildfire Events and Disasters* (pp. 1-20). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815721-3.00001-1>

Vosselman, G., & Maas, H.-G. (2010). *Airborne and terrestrial laser scanning*. Whittles Publishing. <https://doi.org/10.1080/17538947.2011.553487>

3. Informes

Ariza, A., & Grupo Interno de Trabajo en Percepción Remota y Aplicaciones Geográficas. (2013). *Descripción y corrección de productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission)* (Versión 1.0). Centro de Investigación y Desarrollo del Instituto Geográfico Agustín Codazzi de Bogotá, Colombia. <https://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>

Castellnou, M., Almodóvar, J., Álvarez, R., Silva, F. M., Mayoral, P. C., Alfonso, L., & Basile, G. (2017). *Situación de incendios forestales en Chile entre enero-febrero 2017*. Mecanismo de Protección Civil de la Unión Europea.

CIGIDEN. (2024). *Incendios 02 y 03 de febrero de 2024, Viña del Mar (Región de Valparaíso)*. <https://www.cigiden.cl/informe-de-danos-evento-incendios-02-y-03-de-febrero-de-2024-vina-del-mar-region-de-valparaiso/>

Corporación Nacional Forestal. (2017). *Análisis de la afectación y severidad de los incendios forestales ocurridos en enero y febrero de 2017 entre las regiones de Coquimbo y La Araucanía de Chile*. <https://www.conaf.cl/incendios-forestales/tormenta-de-fuego-en-chile/>

Corporación Nacional Forestal. (2023). *Análisis de las condiciones de peligrosidad a corto y mediano plazo para el periodo de alta ocurrencia de incendios forestales 2023-2024* (Documento solicitado por Ley de Transparencia).

De la Barrera, F., & Ruiz, V. (2017). *Evaluación del impacto de los incendios de Chile centro-sur ocurridos en el verano del año 2017 - primera entrega*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32916.91528>

Dirección Meteorológica de Chile. (2022). Manual de Agrometeorología. Dirección Meteorológica de Chile. https://climatologia.meteochile.gob.cl/publicaciones/documentosGenerales/Manual_Agrometeorologia_2022.pdf

Galilea, S. (2018). *La Tormenta de Fuego y la Nueva Santa Olga*. Instituto de Asuntos Públicos, Universidad de Chile.

González, M. E., Sapiains, R., Gómez-González, S., Garreaud, R., Miranda, A., Galleguillos, M., Jacques, M., Pauchard, A., Hoyos, J., Cordero, L., Vásquez, F., Lara, A., Aldunce, P., Delgado, V., Arriagada, U., Ugarte, A. M., Sepúlveda, A., Farías, L., García, R., Rondanelli, R. J., Ponce, R. V., Vargas, F., Rojas, M., Boisier, J. P., Carrasco, C., Little, C., Osses, M., Zamorano, C., Díaz-Hormazábal, I., Ceballos, A., Guerra, E., Moncada, M., & Castillo, I. (2020). *Incendios forestales en Chile: causas, impactos y resiliencia*. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)². <https://www.cr2.cl/incendios/>

IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 2225-2226). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

IPCC. (2023). *AR6 synthesis report: Climate change 2023*. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>

Key, C. H., & Benson, N. C. (2006). *Landscape assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index; and Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio*. En *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System* (Capítulo RMRS-GTR-164-CD, pp. LA-1-LA-51). U.S. Department of Agriculture, Forest Service. https://www.fs.usda.gov/rm/pubs/rmrs_qtr164.html

Rothermel, R. C. (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels* (Research Paper INT-115). USDA Forest Service.

SENAPRED. (2023, 19 de febrero). *Consolidado de incendios forestales relevantes* [Informe técnico]. Gobierno de Chile. <https://web.senapred.cl/46379-2/>

Subsecretaría del Interior. (2017). *Informe incendios forestales: Chile y la Tormenta de fuego 2017*. Gobierno de Chile.

4. Literatura gris, conferencias y otros

Blanco, J. (2016). *Elaboración de un mapa de modelos de combustible y de un inventario forestal regional en Castilla-La Mancha* [Conferencia]. REE 2016: Nuevas tecnologías en la gestión del fenómeno de los incendios forestales, Castilla-La Mancha. <https://www.youtube.com/watch?v=p4q9jA1Bx0U>

Dirección de Gestión de Riesgos de Córdoba. (2021). *Aplicación y alcance del Índice Meteorológico de Peligro de Incendios (FWI) y sus componentes* [Informe técnico]. Observatorio Hidro-meteorológico de la Provincia de Córdoba.

European Space Agency. (2015). *Sentinel-2 user handbook* (Standard Operating Procedure No. S2-PDGS-MPC-L2A-SUM-V2.9). Copernicus. https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook

Félez-Bernal, J. (2023). *Fundamentos de teledetección ambiental: Monitoreo de incendios forestales mediante herramientas basadas en teledetección multiespectral y computación en la nube* [Presentación de PowerPoint]. Universidad de Concepción.

Julio, G., Castillo, E., & Pedernera, P. (s.f.). *Modelación de combustibles* [Manuscrito no publicado]. Laboratorio de Incendios Forestales, Universidad de Chile.

Julio, G., Pedernera, P., & Castillo, E. (s.f.). *Diseño funcional de simulador de incendios forestales* [Manuscrito no publicado]. Laboratorio de Incendios Forestales, Universidad de Chile.

Montealegre, A. L., et al. (2023). *Plataformas y sensores LiDAR* [Material docente no publicado]. Universidad de Zaragoza.

Montealegre, A. L., et al. (2023). *Principios básicos de la tecnología LIDAR* [Material docente no publicado]. Universidad de Zaragoza.

Montealegre, A. L., Lamelas, M. T., Hoffrén, R., de la Riva, J., & Domingo, D. (2023). *Principales metodologías para la construcción de modelos de combustible* [Material docente no publicado]. Curso LIDAR, Universidad de Zaragoza.

Northwest Fire Science Consortium. (2017). *What is topography? The relief features or surface configuration of an area* [Afiche informativo]. Oregon State University Extension. <https://www.nwfirescience.org>

San-Miguel-Ayanz, J. (2020). *Super Case Study 4: Forest fires in Portugal in 2017*. https://drmkc.jrc.ec.europa.eu/portals/0/Knowledge/ScienceforDRM2020/Files/supercasestudy_04.pdf

Saavedra Saldías, J. (2023, diciembre). *Eventos extremos de incendios forestales: Experiencias chilenas* [Presentación PowerPoint]. Corporación Nacional Forestal. <https://acuerdochilecanada.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2024/12/2.-PPT-Jorge-Saavedra-CONAF.pdf>

5. Sitios web

BBC News Mundo. (2019, 3 de diciembre). *Qué son las "tormentas de fuego" que cada vez son más frecuentes y por qué son tan difíciles de combatir*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-50588121>

British Columbia Wildfire Service. (2022). *Understanding forest fuels* [Página web informativa]. <https://blog.gov.bc.ca/bcwildfire/understanding-forest-fuels/>

Castillo Mejía, A. (2023, 28 de mayo). Principal Component Analysis (Capítulo 3) [Tutorial en línea]. RPubS. https://rpubs.com/AlithC/Entrega4_Cap3-PCA

Corporación Nacional Forestal [CONAF]. (2023). *Plantaciones forestales*. <https://www.conaf.cl/manejo-de-ecosistemas/gestion-forestal-suelos-y-agua/plantaciones-forestales/>

Diario Usach. (2023). Incendio forestal en Santa Juana es el segundo mayor en los registros de la Conaf. <https://www.diariousach.cl/incendio-forestal-en-santa-juana-es-el-segundo-mayor-en-los-registros>

Equipo Multimedia Emol. (2023, 14 de febrero). Los peores incendios forestales que ha registrado la Conaf: Cinco de los diez más destructivos son de la actual temporada. Emol. <https://www.emol.com/noticias/Nacional/2023/02/14/1086704/incendios-forestales-peores-chile-conaf.html>

Fox, J., & Weisberg, S. (2019). *symbol: Symbolic boxplots for transformations* [Documentación de función en el paquete car]. RDocumentation. <https://www.rdocumentation.org/packages/car/versions/3.1-3/topics/symbol>

Garraud, R., Jacques, M., & Pauchard, A. (2023). *Análisis (CR)2 | Megaincendios forestales en un clima cambiante*. <https://www.cr2.cl/analisis-cr2-megaincendios-forestales-en-un-clima-cambiante/>

Mondaca, G. (2023, 30 de junio). *De los incendios a las inundaciones: el doble drama que se vive en Santa Juana y Chillán*. La Tercera. <https://www.latercera.com/la-tercera-sabado/noticia/de-los-incendios-a-las-inundaciones-el-doble-drama-que-se-vive-en-santa-juana-y-chillan/JTP5IZDZVFCLXP2BS42RGNTXG4/>

NASA FIRMS. (s.f.). FIRMS VIIRS Fire Hotspots Description. NASA Earthdata. https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/descriptions/FIRMS_VIIRS_Firehotspots.html

National Wildfire Coordinating Group. (s.f.). *Canadian Forest Fire Danger Rating System (CFFDRS): Fire Weather Index System*. <https://www.nwcg.gov/publications/pms437/cffdrs/fire-weather-index-system>

Organización de las Naciones Unidas. (s.f.). Objetivos del desarrollo sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/health/>

Radio UdeC. (2023, 23 de agosto). *COGRID: Lluvias dejan más de 700 viviendas con daños y autoridades llaman a completar fichas FIBE*. <https://www.radioudec.cl/cogrid-lluvias-dejan-mas-de-700-viviendas-con-danos-y-autoridades-llaman-a-completar-fichas-fibe/>

Wei, T., & Simko, V. (2021). corrplot: Visualization of a correlation matrix (Version 0.92) [Software]. Comprehensive R Archive Network (CRAN). <https://cran.r-project.org/web/packages/corrplot/vignettes/corrplot-intro.html>

6. Otros recursos digitales

Pardo Herrera, A. (2025). *ScriptsTesisMegaincendios* [Repositorio público de usuario en Github]. GitHub. <https://github.com/AnibalPardoHerrera/ScriptsTesisMegaincendios>

Biblioteca del Congreso Nacional [BCN]. (2023). *División comunal: polígonos de las comunas de Chile* [Shapefile]. https://www.bcn.cl/siit/mapas_vectoriales

Corporación Nacional Forestal. (s.f.-a). Catastro de Recursos Vegetacionales de Chile [Conjunto de datos shapefile]. Sistema de Información Territorial. <https://sit.conaf.cl/>

Corporación Nacional Forestal. (s.f.-b). Hectáreas por incendio nacional de incendios forestales por región, 1977 - 2024 [Tabla estadística]. <https://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/estadisticas-historicas/>

Corporación Nacional Forestal (CONAF). (2025). *Datos geoespaciales de incendios forestales mayores a 50 Ha temporada 2022-2023* [Archivo shapefile; datos solicitados vía Ley N°20.285 de Transparencia]. Ministerio de Agricultura, Chile.

Environmental Systems Research Institute. (2015). ArcGIS Desktop (Versión 10.4.1) [Software de computación]. <https://www.esri.com>

Félez Bernal, J. (2023). Cálculo de severidad [Código adaptado de fuente no documentada]. Google Earth Engine. <https://code.earthengine.google.com/fa3cc3cce98172b6e58468527cfdcdfd>

Félez Bernal, J. (2023). Extracción de índices espectrales [Código adaptado de fuente no documentada]. Google Earth Engine. <https://code.earthengine.google.com/e072623b843211a5c5da9a241e62d366>

Félez Bernal, J. (2023). Script para extracción de altura del dosel forestal mediante LiDAR GEDI [Código de Google Earth Engine]. Universidad de Concepción. <https://code.earthengine.google.com/45cb279f57f85d9acc22af0f14ede246>

Fire Information for Resource Management System. (s.f.). *Archive download* (Descarga de anomalías térmicas puntuales). <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>

Google Earth Engine. (s.f.). *Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A (Harmonized)* [Conjunto de datos]. Google. Consultado entre enero y julio de 2024, en https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR_HARMONIZED

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). (2021). ALOS PALSAR 12.5m Digital Elevation Model (Version 3.2) [Dataset]. Alaska Satellite Facility. <https://search.asf.alaska.edu/>

Ministerio del Medio Ambiente [MMA]. (s.f.). *Sistema de Información y Monitoreo de la Biodiversidad (SIMBIO)* [Base de datos]. <https://simbio.mma.gob.cl>

QGIS Development Team. (2021). Point Selection (Version 1.2) [QGIS plugin]. QGIS Python Plugins Repository. https://plugins.qgis.org/plugins/point_selection/

QGIS Development Team. (2023). QGIS Geographic Information System (Versión 3.28.5) [Software de código abierto]. Open Source Geospatial Foundation. <https://qgis.org>

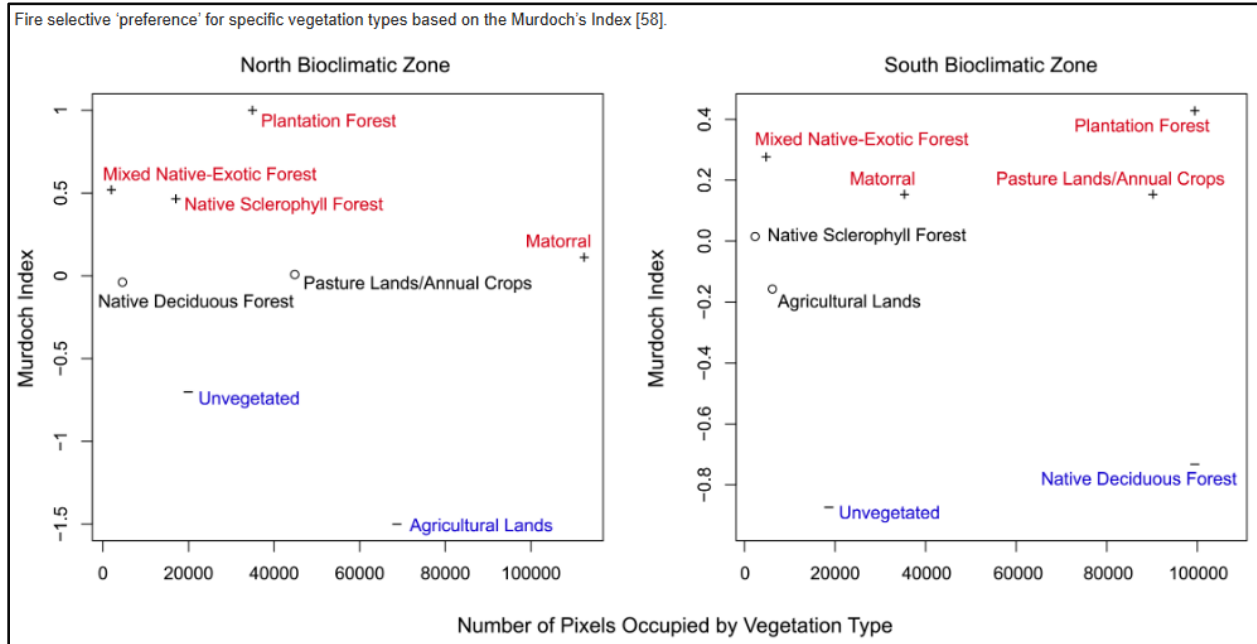
R Core Team. (2023). R: A language and environment for statistical computing (Version 4.3.1) [Computer software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>

Sistema de Información Territorial CONAF. (s.f.). *Información de forestales enero-febrero 2017*. <https://sit.conaf.cl/>

VIII.- Anexos

Anexo 1.

Preferencia selectiva del fuego por tipo de vegetación según el índice de Murdoch. Fuente: Elaboración propia basada en la metodología de Krebs (1999) y su aplicación en McWethy et al. (2018).



Fuente: McWethy et al. (2018).

Anexo 2.

Resultados del Análisis de Varianza (ANOVA) mostrando las diferencias estadísticas entre tipos de bosque. Los resultados muestran grados de libertad (DF), estadístico F y valor p asociado (Prob>F). Agrupación 1 = Bosques Nativos. Agrupación 2 = Plantaciones. Agrupación 3 = Otras tierras (no clasificadas).

Fuente	GL	Suma de Cuadrados ($\times 10^3$)	Cuadrado Medio ($\times 10^3$)	Estadístico F	valor p
Modelo	2	15,3	7,6	1,9	0,16
Error	27	107,8	4,0	—	—
Total	29	123,2	—	—	—

Fuente: Cordero et al. (2024).

Anexo 3.

Resultados del test de diferencia de medias (MDT) mostrando comparaciones pareadas entre métricas de fuego (área quemada) en agrupaciones formadas según el tipo de bosque. Los bosques naturales y las plantaciones forestales no son significativamente diferentes entre sí. Agrupación 1 = Bosques nativos. Agrupación 2 = Plantaciones. Agrupación 3 = Otras tierras (no clasificadas).

Grupo	Grupo de comparación	Diferencia	Estadístico	valor p
Área quemada (×1000 ha):				
1	3	17,1	0,5	0,31
3	2	-36,9	-1,4	0,09
3	1	-54,1	-2,4	0,02

Fuente: Cordero et al. (2024).

Anexo 4.

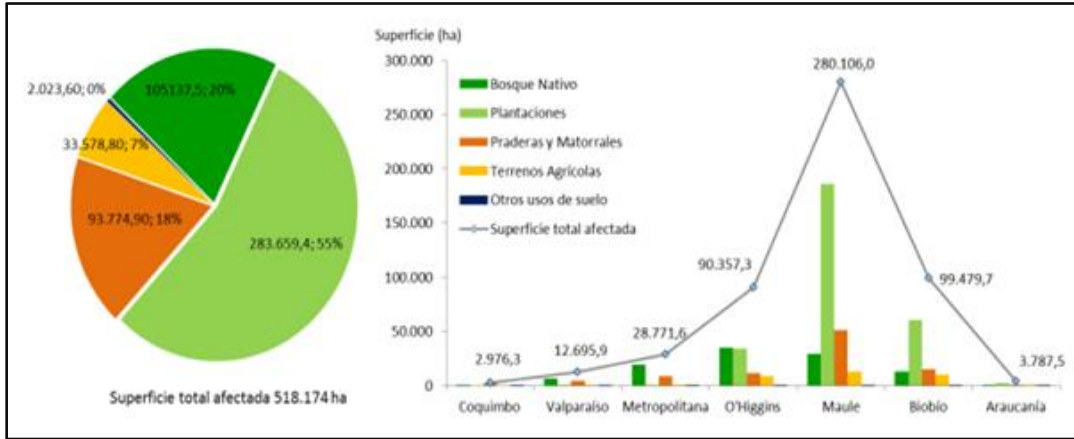
Coefficientes de correlación (R) y valores p entre el área quemada (por tipo de bosque y especie) y variables relevantes. Se analizaron datos del período 2000-2022. Las correlaciones consideradas significativas ($p < 0,05$) se destacan en negrita.

	Temperatura máxima del aire (°C)		TSM ENSO 1+2 (°C)		TSM ENSO 3.4 (°C)		(FWI)	
	R	p	R	p	R	p	R	p
Área quemada (ha.)								
Total	+0,5	0,01	+0,5	0,01	+0,1	0,81	+0,3	0,11
Plantaciones								
Pino	+0,5	0,02	+0,6	0,01	+0,0	0,84	+0,3	0,16
Eucalipto	+0,6	0,00	+0,5	0,02	+0,1	0,72	+0,5	0,01
Total Bosque	+0,6	0,00	+0,5	0,01	+0,1	0,58	+0,4	0,04
Nativo								
Árboles	+0,6	0,00	+0,5	0,01	+0,1	0,59	+0,4	0,04
Pradera	+0,5	0,01	+0,4	0,05	+0,2	0,35	+0,3	0,11
Matorral	+0,6	0,00	+0,5	0,02	+0,1	0,71	+0,4	0,04
Otras tierras	+0,7	0,00	+0,5	0,03	+0,1	0,60	+0,6	0,00

Fuente: Cordero et al. (2024).

Anexo 5.

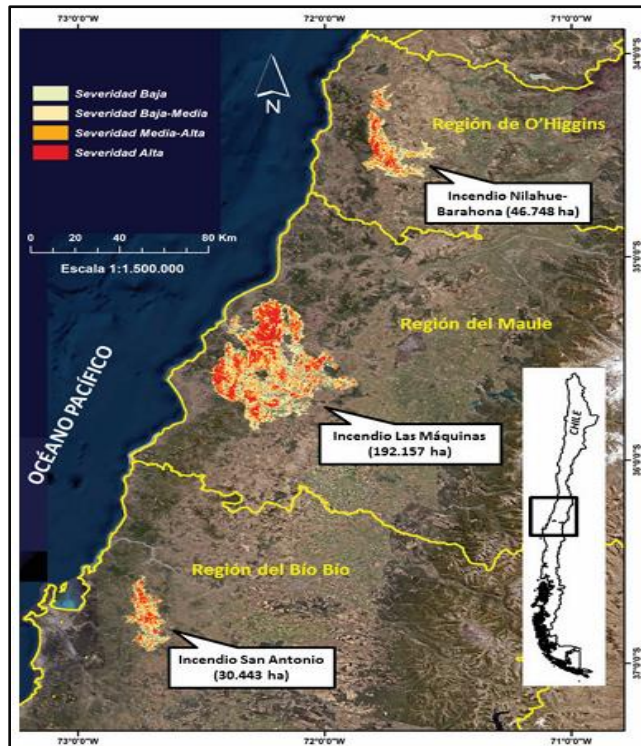
Superficie afectada según vegetación y otros usos de suelo por incendios forestales entre las regiones de Coquimbo y La Araucanía durante la temporada del 2017



Fuente: (CONAF, 2017)

Anexo 6.

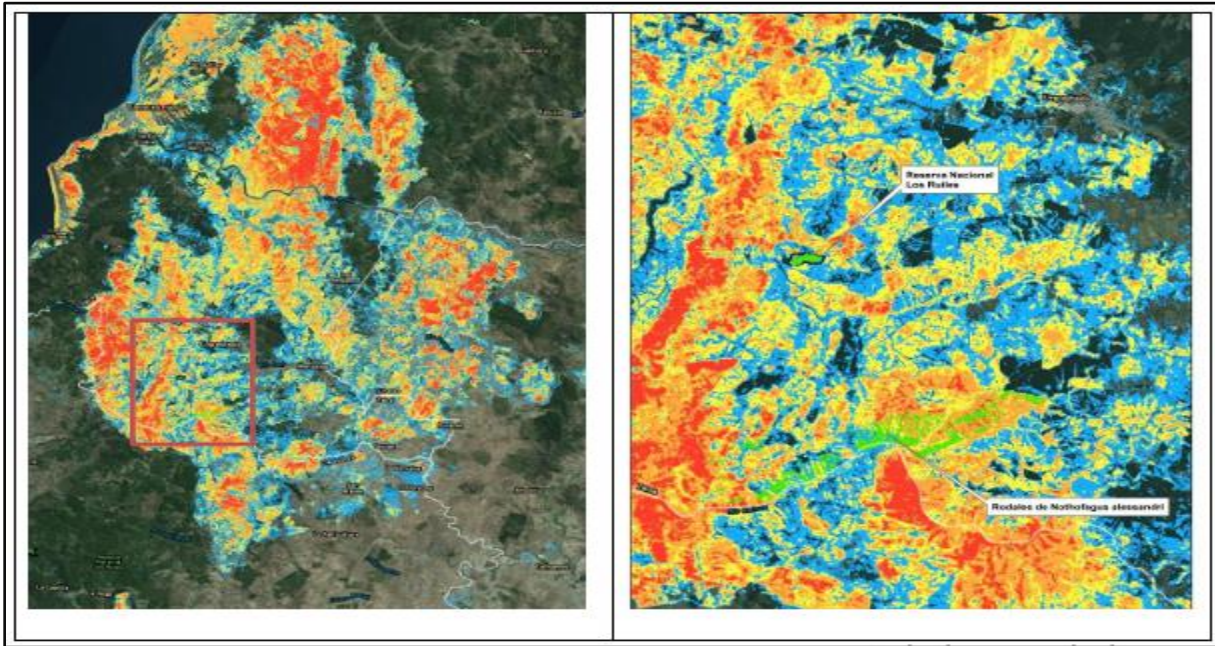
Detalle de los tres grandes incendios forestales que afectaron a Chile en la temporada 2017



Fuente: (Castillo Soto et al., 2019)

Anexo 7.

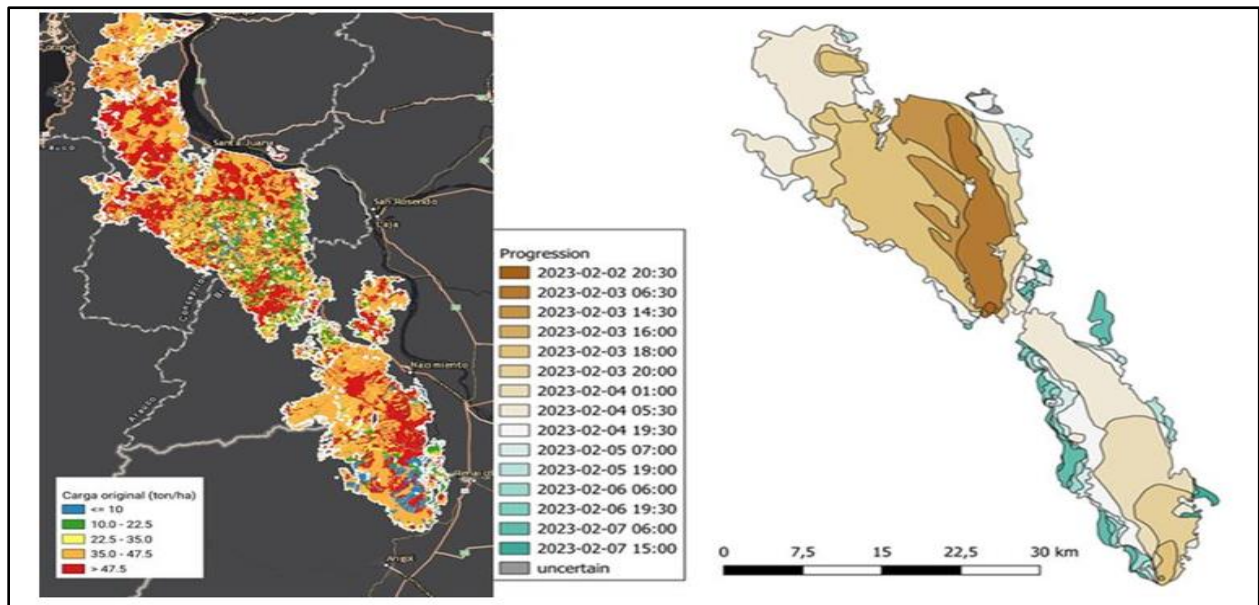
Cartografía de Severidad de incendio Las Máquinas



Fuente: (CONAF, 2017)

Anexo 8.

Mapas de progresos de los incendios de Santa Ana -Butaco 3/Quillota y Mapa de cargas para determinar valores de comportamiento del fuego



Fuente: (CONAF, 2024)

Anexo 9.

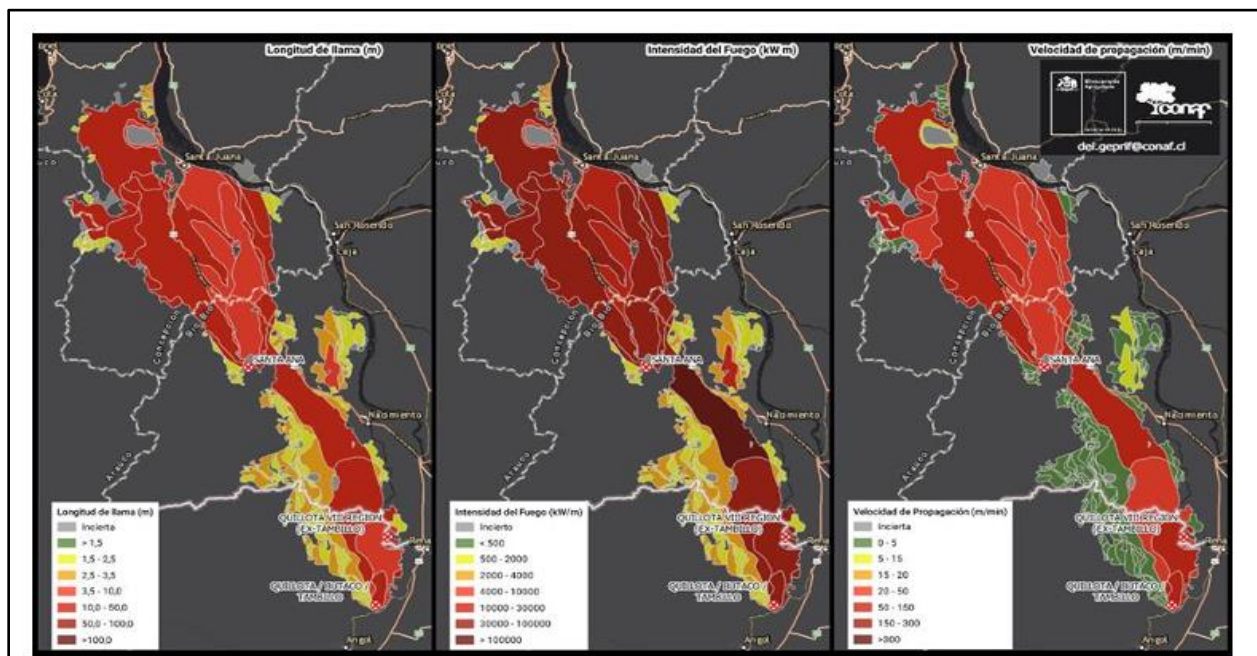
Progresión de las isócronas elaboradas en base a observaciones satelitales de los incendios de Santa Ana -Butaco 3/Quillota

FECHA HORA	FUENTE	INCENDIOS	INTENSIDAD DEL FUEGO (Kw/m)	LONGITUD DE LLAMA (m)	VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN (m/min)	TIPO DE FUEGO / CAPACIDAD DE CONTROL
02-02-2023 17:20	GOES16	SANTA ANA INICIO	INICIO ACTIVIDAD SANTA ANA			Incendio altamente turbulento dominado por la columna de convección, propagación caótica e impredecible, focos secundarios a larga distancia / Imposible de controlar
03-02-2023 3:00	LANDSAT, VIIRS	SANTA ANA	38.147	10	45	Incendio de copa, focos secundarios, propagación caótica e impredecible / Virtualmente imposible de controlar
03-02-2023 11:30	LANDSAT, GOES16	SANTA ANA	27.310	8	29	
03-02-2023 13:30	GOES16	BUTACO 3 / QUILLOTA INICIO	INICIO ACTIVIDAD BUTACO 3			Incendio altamente turbulento dominado por la columna de convección, propagación caótica e impredecible, focos secundarios a larga distancia / Imposible de controlar
03-02-2023 15:00	SENTINEL, VIIRS, MODIS	BUTACO 3 / QUILLOTA	40.318	10	52	
03-02-2023 15:00	SENTINEL, VIIRS, MODIS	SANTA ANA	POSIBLE FOCO SECUNDARIO SANTA ANA			Incendio altamente turbulento dominado por la columna de convección, propagación caótica e impredecible, focos secundarios a larga distancia / Imposible de controlar
03-02-2023 15:00	SENTINEL, VIIRS, MODIS	SANTA ANA	46.296	11	58	
03-02-2023 17:00	SENTINEL, VIIRS	BUTACO 3 / QUILLOTA	35.117	9	63	Incendio superficial, probable antorchas / Extremadamente difícil de controlar
03-02-2023 17:00	SENTINEL, VIIRS	SANTA ANA	7.529	5	7	
03-02-2023 17:00	SENTINEL, VIIRS	SANTA ANA	43.940	10	40	Incendio altamente turbulento dominado por la columna de convección, propagación caótica e impredecible, focos secundarios a larga distancia / Imposible de controlar
03-02-2023 21:00	SENTINEL, VIIRS	SANTA ANA	POSIBLE FOCO SECUNDARIO SANTA ANA			
03-02-2023 21:00	SENTINEL, VIIRS, GOES16	SANTA ANA	53.836	11	52	Incendio altamente turbulento dominado por la columna de convección, desarrollo de tormentas de fuego, frente de llama errático debido a la turbulencia y vorticalidad, focos secundarios masivos a larga distancia / Imposible de controlar
03-02-2023 21:00	SENTINEL, VIIRS, GOES16	BUTACO 3 / QUILLOTA	43.676	10	40	
03-02-2023 23:00	SENTINEL, VIIRS, GOES16	BUTACO 3 / QUILLOTA (BIOBIO EX TAMBILLO INICIO)	117.758	16	144	Fuego de superficie, posible antorchas / Muy difícil de controlar
04-02-2023 16:30	SENTINEL, VIIRS	BUTACO 3 / QUILLOTA / EX TAMBILLO	3.209	3	4	
04-02-2023 16:30	SENTINEL, VIIRS	SANTA ANA	1.643	2	2	Fuego de superficie / Moderadamente difícil de controlar
05-02-2023 2:00	SENTINEL, VIIRS	BUTACO 3 / QUILLOTA / EX TAMBILLO	1.232	2	1	
05-02-2023 2:00	SENTINEL, VIIRS	SANTA ANA	1.899	2	3	Fuego de superficie / Moderadamente difícil de controlar
05-02-2023 2:00	SENTINEL, VIIRS	BUTACO 3 / QUILLOTA / EX TAMBILLO	699	2	1	
05-02-2023 16:00	SENTINEL, VIIRS	SANTA ANA	1.487	2	1	Fuego de superficie / Moderadamente difícil de controlar
06-02-2023 3:00	SENTINEL, VIIRS	SANTA ANA	1.314	2	1	
06-02-2023 3:00	SENTINEL, VIIRS	BUTACO 3 / QUILLOTA / EX TAMBILLO	1.314	2	1	Fuego de superficie / Moderadamente difícil de controlar
06-02-2023 16:30	SENTINEL, VIIRS	SANTA ANA	802	2	1	
06-02-2023 16:30	SENTINEL, VIIRS	BUTACO 3 / QUILLOTA / EX TAMBILLO	763	2	1	Fuego de superficie / Moderadamente difícil de controlar
07-02-2023 1:00	SENTINEL, VIIRS, MODIS	BUTACO 3 / QUILLOTA / EX TAMBILLO	3.152	3	3	
07-02-2023 1:00	SENTINEL, VIIRS	SANTA ANA	2.364	3	2	Fuego de superficie, posible antorchas / Muy difícil de controlar
07-02-2023 1:00	SENTINEL, VIIRS	BUTACO 3 / QUILLOTA / EX TAMBILLO	32.730	6	12	

Fuente: (CONAF, 2024)

Anexo 10.

Comportamiento del fuego en las isócronas de avance generadas con los sensores VIIRS, LANDSAT, GOES16 y SENTINEL.



Fuente: (CONAF, 2024)

Anexo 11.

Bandas del sensor multiespectral MSI de sentinel 2

Nombre	Tamaño de los píxeles	Longitud de onda	Descripción
B1	60 m	443.9 nm (S2A) y 442.3 nm (S2B)	Aerosoles
B2	10 m	496.6 nm (S2A) / 492.1 nm (S2B)	Azul
B3	10 m	560 nm (S2A) / 559 nm (S2B)	Verde
B4	10 m	664.5 nm (S2A) / 665 nm (S2B)	Rojo
B5	20 m	703.9 nm (S2A) / 703.8 nm (S2B)	Borde rojo 1
B6	20 m	740.2 nm (S2A) / 739.1 nm (S2B)	Borde rojo 2
B7	20 m	782.5 nm (S2A) y 779.7 nm (S2B)	Borde rojo 3
B8	10 m	835.1 nm (S2A) y 833 nm (S2B)	NIR
B8A	20 m	864.8 nm (S2A) y 864 nm (S2B)	Borde rojo 4
B9	60 m	945 nm (S2A) / 943.2 nm (S2B)	Vapor de agua
B11	20 m	1613.7 nm (S2A) / 1610.4 nm (S2B)	SWIR 1
B12	20 m	2202.4 nm (S2A) / 2185.7 nm (S2B)	SWIR 2

Fuente: adaptado de Google Earth Engine. (s.f.)

Anexo 12.

Correspondencia entre las categorías originales del Catastro CONAF y la reclasificación en tipologías de combustible

SUSO_CONAF	USO	ID_LUL C	FUEL	ID_FUE L
Rotación Cultivo-Pradera	Agropecuario	1	Agricultural	2
Terrenos de Uso Agrícola	Agropecuario	1	Agricultural	2
Bosque Nativo con Exóticas	Bosque mixto		Forest	
Asilvestradas Abierto	(exóticas)	2	monoculture	1
Bosque Nativo con Exóticas	Bosque mixto		Forest	
Asilvestradas Denso	(exóticas)	2	monoculture	1
Bosque Nativo con Exóticas	Bosque mixto		Forest	
Asilvestradas Semidenso	(exóticas)	2	monoculture	1

Bosque Nativo-Plantación Abierto	Bosque mixto (exóticas)	2	Forest monoculture	1
Bosque Nativo-Plantación Denso	Bosque mixto (exóticas)	2	Forest monoculture	1
Bosque Nativo-Plantación Semidenso	Bosque mixto (exóticas)	2	Forest monoculture	1
Bosque Nativo Adulto Abierto	Bosque nativo (adulto)	3	Native forest	4
Bosque Nativo Adulto Denso	Bosque nativo (adulto)	3	Native forest	4
Bosque Nativo Adulto Semidenso	Bosque nativo (adulto)	3	Native forest	4
Bosque Nativo Achaparrado Abierto	Bosque nativo (en altura)	4	Native forest	4
Bosque Nativo Achaparrado Denso	Bosque nativo (en altura)	4	Native forest	4
Bosque Nativo Achaparrado Semidenso	Bosque nativo (en altura)	4	Native forest	4
Bosque Nativo Adulto-Renoval Abierto	Bosque nativo (renoval)	5	Native forest	4
Bosque Nativo Adulto-Renoval Denso	Bosque nativo (renoval)	5	Native forest	4
Bosque Nativo Adulto-Renoval Semidenso	Bosque nativo (renoval)	5	Native forest	4
Bosque Nativo Renoval Abierto	Bosque nativo (renoval)	5	Native forest	4
Bosque Nativo Renoval Denso	Bosque nativo (renoval)	5	Native forest	4
Bosque Nativo Renoval Semidenso	Bosque nativo (renoval)	5	Native forest	4
Cajas de Rios	Cuerpos de agua	6	Water/Wetland	7
Lagos,Lagunas,Embalses,Tranques	Cuerpos de agua	6	Water/Wetland	7
Ríos	Cuerpos de agua	6	Water/Wetland	7
Ciudades,Pueblos,Zonas Industriales	Urbanizado	7	Artificial Área	8
Estepa Andina Central	Estepa andina	8	Steppe	6
Matorral Abierto	Matorral	9	Shrublands	5
Matorral Denso	Matorral	9	Shrublands	5
Matorral Semidenso	Matorral	9	Shrublands	5
Matorral Pradera Abierto	Matorral (pradera)	10	Shrublands	5
Matorral Pradera Denso	Matorral (pradera)	10	Shrublands	5
Matorral Pradera Semidenso	Matorral (pradera)	10	Shrublands	5
Matorral Arborescen. Semidenso	Matorral (arborescente)	11	Shrublands	5
Matorral Arborescente Abierto	Matorral (arborescente)	11	Shrublands	5
Matorral Arborescente Denso	Matorral (arborescente)	11	Shrublands	5

Matorral Arborescente Semidenso	Matorral (arborescente)	11	Shrublands	5
Mineria Industrial	Mineria	12	Artificial Área Forest	8
Bosques Exoticas Asilvestradas	Monocultivo forestal	13	monoculture Forest	1
Plantación Adulta	Monocultivo forestal	13	monoculture Forest	1
Plantación con Exóticas Asilvestradas	Monocultivo forestal	13	monoculture Forest	1
Plantación Joven o Recién Cosechada	Monocultivo forestal	13	monoculture Forest	1
Nieves	Nieves	14	Snow/Glaciers	10
Praderas Anuales	Praderas	15	Grasslands	3
Praderas Perennes	Praderas	15	Grasslands	3
Afloramientos Rocosos	Sin vegetación	16	No vegetation	9
Corridas de Lava y Escoriales	Sin vegetación	16	No vegetation	9
Derrumbes Sin Vegetacion	Sin vegetación	16	No vegetation	9
Otros Terrenos Sin Vegetacion	Sin vegetación	16	No vegetation	9
Playas y Dunas	Sin vegetación	16	No vegetation	9
Terreno sobre el Limite Altitudinal de la Vegetación	Sin vegetación	16	No vegetation	9
Otros Terrenos Humedos	Terrenos húmedos	17	Water/Wetland	7
Vegas	Terrenos húmedos	17	Water/Wetland	7

Fuente: Adaptado de: [Jorge Félez Bernal], 2023 (comunicación personal) y Catastro de Recursos Vegetacionales (CONAF, 2023)