



**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN MEDIOAMBIENTE
INGENIERÍA AMBIENTAL**

**INCORPORACIÓN DE CORTAFUEGOS VERDES EN LA MODELACIÓN
DE INCENDIOS FORESTALES EN PARQUE LA RESERVA**

TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL

AUTOR: CONNY FRANCISCA ESPERGUES VARELA

NATALIA ANDREA TORO-MORENO BARRÍA

PROFESOR GUÍA: DANIEL UNDURRAGA PERALTA

VALPARAÍSO, 2025

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro profundo agradecimiento a nuestro Dream Team, por su apoyo incondicional tanto en lo académico como en nuestra vida personal, convirtiéndose en amistades que marcaron este proceso.

Agradecemos especialmente al profesor Daniel Undurraga, cuya guía y apoyo permanente fueron fundamentales durante todo el desarrollo académico y de este trabajo de título. Extendemos nuestro reconocimiento a CONAF, por entregarnos las directrices iniciales que dieron forma a este trabajo de titulación, y a la Municipalidad de Villa Alemana, por abrirnos sus puertas, confiar en nuestro trabajo y recibirnos siempre con disposición y respeto.

Agradecemos también a Jorge Peña, por su guía y ayuda desinteresada, que se transformaron en un aporte esencial para la concreción de este estudio. De igual manera, agradecemos a los profesores que acompañaron nuestro camino universitario a Lorena Álvarez, Pamela Bonert, Matías Quezada e Iván Jorquera por su dedicación y compromiso con nuestra formación.

Finalmente, expresamos nuestro sincero agradecimiento a nuestra jefatura, Ociel Cofré, María Paz Varela y Joao Cerqueira, por su constante disponibilidad para orientarnos y apoyarnos cada vez que lo necesitamos.

DEDICATORIAS

Agradezco profundamente a todas las personas que me acompañaron a lo largo de este proceso. En primer lugar, a mi abuelita Isabel Zúñiga, por su apoyo incondicional, su amor y la motivación que siempre me entregó para seguir adelante a pesar de las adversidades. A mis padres, Ximena Varela y Javier Espergues, por enseñarme que la educación es el camino para construir un mejor futuro, y a mis hermanos Javiera, Felipe, Josefa y a mi primo Dago por estar siempre a mi lado, acompañando cada etapa de mi vida.

Agradezco también a mi tío Svonimir Espergues, quien fue la persona que me recomendó estudiar esta carrera y cuyo consejo marcó el inicio de este camino.

Extiendo mi gratitud a mis amigos, quienes me motivaron constantemente y me brindaron la confianza que, en ocasiones, me faltaba para creer en mis capacidades: Paula Álvarez, presente en mi vida desde los siete años, así como Natalia Toro-moreno, Xaviera Robert y Pedro Molina, por su apoyo en momentos difíciles y momentos de relajación fundamentales para vivir la vida con todo su esplendor. También a mi pareja y compañero Matías Romo por su motivación y amor.

Finalmente, recuerdo con cariño a quienes formaron parte de mi vida y ya no están: mi tata Jaime Espergues, por sus enseñanzas y valores, y a Ginnely Valdés, quien debía titularse junto a mí, pero la vida no se lo permitió. A ella dedico este trabajo.

Conny Espergues

Quiero comenzar agradeciendo a una de las personas más importante no solo para este proceso si no que para mi vida, quien ha compartido conmigo cada proceso y gracias a quien hoy soy ingeniera ambiental y es mi hermana Javiera Toro-moreno, por su compañía eterna e incondicional. Quiero continuar con agradecerle a mis padres Jorge Toro-Moreno y Sandra Barría por su apoyo constante, por estar para mí cada vez que los necesite y siempre estar dispuestos a acompañarme en cada etapa sin juzgar. Continúo extendiendo mis agradecimientos a mis abuelos Jorge, Angelica, Hugo y Ema quienes siempre me han acompañado con amor y entusiasmo todo este proceso y han celebrado conmigo cada avance.

Extendiendo también mi gratitud a quienes han sido parte fundamental de este proceso universitario y también de mi vida, comenzando por quien estuvo desde el día 1, mi queridísima amiga Xaviera Robert, con quien atravesamos muchísimos procesos algunos más complejos que otros y sin ella tal vez yo no estaría aquí, gracias amiga por tu visión, tu apañe y tu cariño. Continuo con la persona que ha hecho este trabajo de título posible y es mi querida amiga, compañera de tesis y futura colega Conny Espergues, quien me ha mostrado lo que es una amistad genuina, un apoyo incondicional y la magia que sucede cuando dos personas conectan con el mismo propósito, sin ti amiga nada de esto hubiese sido posible. Cerrando con el ultimo integrante del Dream Team, quiero agradecer a Pedro Molina por entregar su visión liviana de las cosas y la vida, que me ha enseñado a vivir menos estresada y a confiar más en mí misma, por su apañe incondicional y todas esas horas de relaxo que siempre son tan importantes para equilibrar la vida.

Agradezco también a todas mis amistades, mi circulo de personas especiales que han hecho de mi vida un lugar ameno, amable y amoroso donde compartir con cada uno de ustedes ha sido un disfrute, donde nos acompañamos en las malas y celebramos en las buenas, con esto hago mención a Andrea, Paulina, Ivonne, Sindride y Katalina.

Quiero continuar agradeciendo a quien me ha mostrado lo bonito que es la vida cuando esta se comparte con personas hermosas que construyen desde el amor, el respeto, desde el interés genuino, quien si bien se ha integrado hace poco a mi vida me ha entregado momentos preciosos que han sido un abrazo al corazón cuando más los necesite, este agradecimiento especial es para Dagoberto Labra.

Para finalizar, quiero extender mi agradecimiento a según mi percepción, los seres más importantes en toda mi vida, quien sin hablar mí mismo idioma han sabido acompañar, contener y sacarme más de una sonrisa cuando lo necesite, por supuesto que hablo de mis queridísimos animales, un abrazo especial al cielo para mi Bacco y Abraxa, que fueron parte fundamental de mi vida y mi apoyo emocional estos últimos años hasta su partida. A quienes aún me acompañan, Solsticio de verano, Nimbus, Lena y Kira, por muchos años más juntos.

Por último, le agradezco profundamente a la vida misma por haberme cruzado con cada personita que hoy me acompaña con tanto amor y a quienes espero poder retribuir todo lo que me entregan día a día.

Natalia Toro-Moreno

RESUMEN

El incremento en la frecuencia e intensidad de los incendios forestales, exacerbado por el cambio climático y factores antrópicos, impone la necesidad urgente de estrategias de mitigación sostenibles. Esta investigación presenta una evaluación rigurosa, mediante simulación en *Software Prometheus*, de la efectividad de los cortafuegos verdes como alternativa innovadora a las técnicas convencionales, con un estudio de caso en el Parque La Reserva (Peñablanca, Chile). Dichos cortafuegos fueron probados como retardantes frente al avance del fuego, considerando las condiciones propias del ecosistema local. Este entorno, caracterizado por una interfaz urbano-forestal de alto valor ecológico y creciente vulnerabilidad, se convierte en un caso de estudio crítico. La propuesta se centra en el diseño de barreras vegetales compuestas por especies nativas piroresistentes, abordando las limitaciones ambientales, tales como la erosión del suelo, la pérdida de biodiversidad y la contaminación química, inherentes a los cortafuegos tradicionales en entornos sensibles.

La investigación se estructuró en cuatro etapas metodológicas: (1) diseño de dos prototipos de cortafuegos verdes (lineal y zigzagueante), fundamentados en criterios técnicos establecidos por la normativa de la Corporación Nacional Forestal (CONAF), propiedades vegetales relevantes (contenido de humedad, baja emisión de compuestos volátiles) y patrones locales de comportamiento del fuego (incendios superficiales y topográficos); (2) selección de especies mediante un algoritmo de significancia multicriterio, que identificó a *Echinopsis chiloensis* (Quisco) como la especie óptima por su alta adaptación bioclimática, resistencia al fuego y bajos requerimientos hídricos; (3) modelación computacional del avance del incendio mediante el software Prometheus, que requirió la adaptación y validación de un modelo de combustible personalizado (basado en el modelo D-1) para simular con precisión el comportamiento ignífugo de la especie seleccionada; y (4) simulación comparativa de escenarios con y sin la implementación de los cortafuegos, evaluando variables determinantes como la eficiencia en la reducción del área quemada, el área sin afectación y el tiempo de retardo del avance del incendio.

Para evaluar la eficiencia de los cortafuegos verdes, se diseñaron dos configuraciones estructurales diferenciadas. El diseño A corresponde a una disposición lineal continua, concebida para representar la forma más convencional de barrera vegetal, mientras que el diseño B adopta una geometría en zigzag, orientada a maximizar la dispersión del calor y reducir la propagación del fuego mediante una mayor heterogeneidad en la disposición del combustible vegetal. Ambos diseños fueron evaluados con anchos de 10 y 20 metros, con el propósito de analizar la influencia del espesor y la geometría en su desempeño frente a la acción del fuego bajo condiciones ambientales determinadas. Los resultados de las 32 simulaciones bajo condiciones meteorológicas (temperatura, humedad, precipitaciones, velocidad y dirección del viento) en periodo estival e invernal demostraron que los cortafuegos verdes actúan como barreras retardantes efectivas, siendo el diseño B con un espesor de 20 metros el más eficiente, al aumentar el tiempo de retardo en 60 minutos respecto al escenario control. Se identificó que el ancho de la franja es el factor más determinante en su desempeño, más que la geometría del diseño. Los parámetros de tiempo de retardo y área no afectada respaldan la viabilidad de los cortafuegos verdes como una solución complementaria y sostenible, capaz de aportar tiempo adicional para las labores de control.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Incendios Forestales la creciente amenaza	1
1.2 Interfaz Urbano Forestal	1
1.3 Principales causas de la generación de incendios forestales.....	2
1.4 Cortafuegos como estrategias para la mitigación de los incendios forestales.....	3
1.5 Cortafuegos verdes la innovadora estrategia para la mitigación de incendios.....	3
1.6 La importancia de la modelación y uso de Software en el estudio de incendios forestales	5
1.7 La necesidad de implementación de cortafuegos verdes en el Parque La Reserva	6
2. PROBLEMA	6
3. OBJETIVOS.....	7
3.1 Objetivo General	7
3.2 Objetivos Específicos.....	7
4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	10
4.1 El impacto de los incendios como desastres socio-ambientales	10
4.2 La gestión del riesgo de desastres (GRD) en relación con incendios forestales	11
4.3 Incendios forestales y sus clasificaciones	12
4.4 Cortafuegos verdes una herramienta de manejo de incendios forestales.....	13
4.4.1 Clasificación por Diseño Estructural.....	14
4.4.2 Clasificación por Composición y Función Específica	14
4.4.3 Clasificación por Ubicación Estratégica	15
4.5 Características clave de las plantas para su desempeño como cortafuegos verdes	16
4.5.1 El Rol del contenido de humedad	16
4.5.2 Influencia de la composición química.....	16
4.5.3 La Etapa de Desarrollo y su Impacto en la Inflamabilidad	17
4.5.4 Capacidad de Regeneración Post-Incendio.....	17
4.5.5 Compatibilidad con el Ecosistema Local	18
4.5.6 Requerimientos de Mantenimiento y Cuidado.....	18
4.6 Simulación de cortafuegos verdes en software de propagación de incendios	18
4.7 Modelo de combustibles para cortafuegos verdes en el software Prometheus.....	19
4.8 Normativa ambiental aplicable	23
4.8.1 Especificaciones para la Creación de Cortafuegos Verdes según la Normativa Vigente	23
4.9 Especificaciones para el diseño de cortafuegos verdes según la literatura	25

5. METODOLOGÍA	26
5.1 Metodología general.....	26
5.2 Materiales	26
5.3 Métodos.....	27
5.3.1 Metodología objetivo específico 1: Diseñar dos tipos de cortafuegos verdes para la protección del Parque la Reserva ubicado en Peñablanca	28
5.3.2 Metodología objetivo específico 2: Configurar en el software de simulación los parámetros y características de los cortafuegos verdes diseñados	34
5.3.3 Metodología objetivo específico 3: Simular escenarios de propagación de incendios incorporando cortafuegos verdes.....	37
5.3.4 Metodología objetivo específico 4: Determinar la efectividad de los cortafuegos verdes como retardantes del avance de los incendios forestales.....	39
6. RESULTADOS	43
6.1 Diseño de dos tipos de cortafuegos verdes para la protección del Parque la Reserva	43
6.1.1 Descripción de características de las especies para utilizar como cortafuegos verdes.....	43
6.1.2 Selección de especies para prueba	44
6.1.3 Revisión bibliográfica de características y clasificaciones de los cortafuegos verdes	48
6.1.4 Definición de criterios de diseño para los cortafuegos verdes	50
6.2 Configuración de parámetros y características de los cortafuegos verdes diseñados en el software de simulación	53
6.2.1 Determinación de los parámetros requeridos por el software para la creación de modelos de combustible.....	54
6.2.2 Incorporación de los parámetros experimentales en el software.....	55
6.2.3 Validación de los modelos creados mediante simulaciones.....	56
6.3 Simulación de escenarios de propagación de incendios incorporando cortafuegos verdes.....	68
6.3.1 Definir elementos de los escenarios de prueba (topografía, vegetación, clima, etc).	68
6.3.2 Establecer la configuración de los cortafuegos para la modelación.....	71
6.3.3 Determinación de incendios para la modelación	73
6.3.4 Ejecución de las simulaciones en el Software para los diferentes escenarios	75
6.4 Determinar la efectividad de los cortafuegos verdes como retardantes del avance de los incendios forestales	87
6.4.1 Determinar área inicial quemada sin la presencia de cortafuegos.....	87
6.4.2 Determinar área quemada de las modelaciones con cortafuegos	87
6.4.3 Cálculo de variables determinantes para evaluar la efectividad de los cortafuegos	89
6.4.4 Comprobar la efectividad de los cortafuegos verdes como retardantes	90

7. Discusión	91
8. Conclusiones	94
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
8. ANEXOS	105
8.1 ANEXO 1: Especies Vegetales.....	105
8.2 ANEXO 2: Algoritmo de Significancia	105
8.3 ANEXO 3: Índice F1-Score	106
8.4 ANEXO 4: Capa Vegetacional	107
8.5 ANEXO 5: Datos Meteorológicos	107
8.6 ANEXO 6: Simulaciones	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Causas de incendios forestales en Chile según las estadísticas de CONAF del año 2022 (elaboración propia).....	2
Figura 4.1: Tipos de incendios forestales (Ocampo M, 2009).....	12
Figura 4.2: Lista de modelos de combustibles disponibles en Prometheus (Software Prometheus, 2025).....	20
Figura 5.1: Esquema metodológico de los objetivos y actividades.	28
Figura 6.1: Cartografía del histórico de incendios del Parque la Reserva Villa Alemana.....	50
Figura 6.2: Polígono del incendio registrado por CONAF en Parque la Reserva.....	57
Figura 6.3: Imagen de la simulación del modelo D-2 ajustado.	58
Figura 6.4: Acercamiento de la simulación del modelo D-2 ajustado.	59
Figura 6.5: Polígono de la simulación del modelo D-2 ajustado y del incendio real.	59
Figura 6.6: Imagen de la simulación del modelo D-1 ajustado.	61
Figura 6.7: Acercamiento de la simulación del modelo D-1 ajustado.	61
Figura 6.8: Polígono de la simulación del modelo D-1 ajustado y del incendio real.	62
Figura 6.9: Imagen de la simulación del modelo D-2 ajustado con 2 focos integrados.	64
Figura 6.10: Acercamiento de la simulación del modelo D-2 ajustado con 2 focos integrados.	64
Figura 6.11: Polígono de la simulación del modelo D-2 ajustado con 2 focos y del incendio real.	65
Figura 6.12: Imagen de la simulación del modelo D-1 ajustado con 2 focos integrados.	66
Figura 6.13: Acercamiento de la simulación del modelo D-1 ajustado con 2 focos integrados.	67
Figura 6.14: Polígono de la simulación del modelo D-1 ajustado con 2 focos y del incendio real.	67
Figura 6.15: Cartografía con la ubicación inicial de los prototipos de cortafuegos verde en el Parque la Reserva.....	71
Figura 6.16: Disposición espacial de los diseños de cortafuegos a evaluar en las simulaciones.	72
Figura 6.17: Zona seleccionada para la configuración de los puntos de ignición.	73
Figura 6.18: Ubicación de los puntos de ignición y zona de cortafuegos verdes.	74
Figura 6.19: Incendio control de los cuatro focos seleccionados.	76
Figura 6.20: Simulaciones del cortafuego Diseño A de 10 metros de espesor.....	77
Figura 6.21: Simulaciones del cortafuego Diseño A de 20 metros de espesor.....	78

Figura 6.22: Simulaciones del cortafuego Diseño B de 10 metros de espesor.....	79
Figura 6.23: Simulaciones del cortafuego Diseño B de 20 metros de espesor.....	80
Figura 6.24: Incendio control de los cuatro focos seleccionados.	82
Figura 6.25: Simulaciones del cortafuego Diseño A de 10 metros de espesor.....	83
Figura 6.26: Simulaciones del cortafuego Diseño A de 20 metros de espesor.....	84
Figura 6.27: Simulaciones del cortafuego Diseño B de 10 metros de espesor.....	85
Figura 6.28: Simulaciones del cortafuego Diseño B de 20 metros de espesor.....	86
Figura 8.1: Anexo 1 - Análisis preliminar de la selección de especies para evaluar en el modelo de significancia.....	105
Figura 8.2: Anexo 2 - Ponderación y relevancia de los criterios por característica del modelo de significancia.....	105
Figura 8.3: Anexo 2- Fórmula del modelo de significancia con sus máximos y mínimos alcanzables.....	106
Figura 8.4: Anexo 2 – Resultados de la aplicación del algoritmo de significancia para la selección de especies.....	106
Figura 8.5: Anexo 3 – Resultados de la aplicación del índice F1 – Score para la validación del modelo de combustible en las diferentes pruebas.....	106
Figura 8.6: Anexo 4 – Extracto de la integración de datos a un formato legible para el Software Prometheus.....	107
Figura 8.7: Anexo 5 - Extracto de los conjuntos de datos meteorológicos para los diferentes escenarios de prueba, incluyendo la validación del modelo y las pruebas para la evaluación de los cortafuegos verdes en época de verano e invierno.	107
Figura 8.8: Anexo 6 – Resultados de las simulaciones de los Diseños A y B para 10 metros y 20 metros del escenario estival.	108
Figura 8.9: Anexo 6 – Resultados de las simulaciones de los Diseños A y B para 10 metros y 20 metros del escenario Invernal.	108
Figura 8.10: Anexo 6 – Resultados de eficiencia de los Diseños A y B para 10 metros y 20 metros considerando ambos escenarios (estival e invernal).	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Ubicación Parque la Reserva, Villa Alemana.	7
Tabla 4.1: Tipos de cortafuegos verdes.	14
Tabla 4.2: Resumen de especificaciones relevantes para la construcción de cortafuegos o cortacombustibles.....	24
Tabla 5.1: Criterios y ponderaciones del contenido de humedad.	29
Tabla 5.2: Criterios y ponderaciones de la composición química interna de las hojas y corteza.	30
Tabla 5.3: Criterios y ponderaciones del tiempo de desarrollo.	30
Tabla 5.4: Criterios y ponderaciones de la capacidad de regeneración post-incendio.	30
Tabla 5.5: Criterios y ponderaciones de la compatibilidad con el ecosistema.	31
Tabla 5.6: Criterios y ponderaciones del requerimiento hídrico.	31
Tabla 5.7: Simbología para la fórmula de significancia.	31
Tabla 5.8: Ponderación de la relevancia del algoritmo de significancia de las características para la aplicabilidad de las especies vegetales como cortafuegos verdes.	32
Tabla 5.9: Resumen de la simbología para el algoritmo de significancia, relevancia y ponderación.	32
Tabla 5.10: Clasificación de rangos de eficiencia.	41
Tabla 6.1: Resumen de la descripción de características de las especies para ser cortafuegos verdes.....	43
Tabla 6.2: Características de las especies potenciales para ser evaluadas en el modelo de significancia.....	44
Tabla 6.3: Información recopilada de las características por especies.....	45
Tabla 6.4: Resultado de la aplicación del algoritmo de significancia.....	47
Tabla 6.5: Descripción de <i>Echinopsis chiloensis</i> y su uso como cortafuego.	48
Tabla 6.6: Resumen de la revisión bibliográfica de cortafuegos verdes.....	49
Tabla 6.7: Características claves de los diseños de cortafuegos verdes para el Parque la Reserva.....	51
Tabla 6.8: Descripción diseños A y B.....	51
Tabla 6.9: Vista vertical del Diseño A de cortafuego verde.	52
Tabla 6.10: Vista vertical del Diseño B de cortafuego verde.	53
Tabla 6.11: Parámetros para el modelo de combustible personalizado.	55
Tabla 6.12: Información del incendio para la validación del modelo de combustible.	57

Tabla 6.13: Resultado del índice F1-Socre (F1), positivos verdaderos (TP), falsos positivos (FP) y falsos negativos (FN) para el modelo de combustible D-2 ajustado.....	60
Tabla 6.14: Resultado del índice F1-Socre (F1), positivos verdaderos (TP), falsos positivos (FP) y falsos negativos (FN) para el modelo de combustible D-1 ajustado.....	62
Tabla 6.15: Puntos de ignición para la simulación con factores externos de contención del incendio.....	63
Tabla 6.16: Resultado del índice F1-Socre (F1), positivos verdaderos (TP), falsos positivos (FP) y falsos negativos (FN) para el modelo de combustible D-2 ajustado con 2 focos.	65
Tabla 6.17: Resultado del índice F1-Socre (F1), positivos verdaderos (TP), falsos positivos (FP) y falsos negativos (FN) para el modelo de combustible D-1 ajustado con 2 focos.	68
Tabla 6.18: Asignación de combustibles para las formaciones vegetaciones del Parque la Reserva.....	70
Tabla 6.19: Valores climáticos a modelar en época estival.	75
Tabla 6.20: Valores climáticos a modelar en época invernal.....	81
Tabla 6.21: Área inicial quemada.....	87
Tabla 6.22: Área quemada de las modelaciones con cortafuegos.	88
Tabla 6.23: Calculo de la eficiencia de los diseños de cortafuegos.	89
Tabla 6.24: Área sin afectación con el uso de cortafuegos.....	89
Tabla 6.25: Tiempo de retardo de los diseños de cortafuegos verdes.....	89

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Incendios Forestales la creciente amenaza

La creciente amenaza de los incendios forestales representa una preocupación global de gran magnitud. Durante el año 2020, la superficie quemada a nivel mundial superó los 9,3 millones de hectáreas, marcando un incremento significativo en comparación con años precedentes. Eventos devastadores como los incendios denominados "Black Summer Fires" en Australia (2019-2020), que afectaron una extensión de más de 18,6 millones de hectáreas (Australian Institute for Disaster Resilience, 2021), evidencian la magnitud de esta problemática y la urgente necesidad de implementar estrategias preventivas más eficaces. Estos incendios no solo causan inmensos daños ecológicos, destruyendo ecosistemas valiosos y amenazando la biodiversidad, sino que también generan pérdidas económicas significativas y graves impactos sociales en las comunidades afectadas, especialmente en las zonas de interfaz urbano-forestal (IUF) donde el riesgo es amplificado. En el contexto chileno, la situación no es menos alarmante. Se ha observado un aumento preocupante de los incendios forestales en las últimas décadas, una tendencia que se ha visto intensificada por los efectos del cambio climático y las actividades de origen humano. La Corporación Nacional Forestal (CONAF) informa que el país registra un promedio anual de 5.000 incendios forestales, con consecuencias que impactan miles de hectáreas de vegetación nativa, plantaciones forestales y zonas habitadas. La comuna de Valparaíso se presenta como un área particularmente crítica, contabilizando 1.207 incendios forestales entre los años 2011 y 2020, con un máximo de 174 incendios registrados durante los años 2014-2015 (CONAF, 2024). El mega incendio ocurrido en Valparaíso en 2024, que devastó más de 10.000 hectáreas, incluyendo bosques nativos, áreas residenciales y poblaciones completas, subraya dramáticamente la vulnerabilidad de esta zona. Catalogado como uno de los desastres más destructivos en la historia de la región, este evento ocasionó la pérdida de vidas humanas y el desplazamiento de miles de personas, enfatizando la urgencia de implementar medidas preventivas más efectivas, especialmente en las zonas de interfaz urbano-forestal.

1.2 Interfaz Urbano Forestal

La interfaz se define como "la conexión física y funcional entre dos sistemas independientes" (CONAF, 2017). Las áreas de interfaz se distinguen y se definen basándose en el tamaño y la composición de los elementos presentes en el paisaje. La idea de Interfaz Urbano Forestal se refiere a la zona de transición donde las plantaciones forestales se encuentran con áreas urbanizadas (Sánchez, 2024).

La interfaz urbano-forestal (IUF) según la Administración de incendios de EE. UU. se define como "la zona donde las estructuras humanas y el desarrollo se encuentran o se entremezclan con la vegetación silvestre no desarrollada o los combustibles vegetales" (USFA/FEMA, s.f.). Esta área es un punto crítico debido a la interacción de combustibles vegetales y edificaciones, lo que aumenta significativamente el riesgo y la complejidad de los incendios forestales. Galiana (2012) explica que el concepto de la interfaz urbano-forestal surgió en California durante la década de 1970 debido a que Butler (1976) lo acuñó para referirse a la zona específica donde se frecuentaba un tipo incendio.

En resumen, la interfaz urbano-forestal corresponde a la zona de transición entre áreas naturales con vegetación y zonas urbanizadas, la cual presenta un alto riesgo de incendios forestales debido a la presencia de material combustible en el entorno natural y la influencia de factores antrópicos, que constituyen una de las principales causas de estos siniestros.

1.3 Principales causas de la generación de incendios forestales

CONAF por medio de las UAD (Unidades de Análisis y Diagnóstico) regionales, realiza la investigación de incendios forestales para la determinación de las causas probables de estos, con el fin de proveer información certera que permita reorientar las decisiones en cuanto a planificación y gestiones preventivas de incendios forestales en el territorio. Estas unidades surgen de la necesidad de conocer el por qué, cómo, quién y dónde se producen los incendios forestales. (CONAF, 2025).

En Chile, existen 4 grupos de causas de incendios forestales: incendios accidentales, intencionales, naturales y causa desconocida. De estos 4 grandes grupos, se desprenden 13 causas generales y a su vez de estas 13, se desprenden 95 causas específicas de incendios forestales. En la Figura 1.1 se presenta un diagrama resumen con los 4 grupos de causas junto con las 13 causas generales.

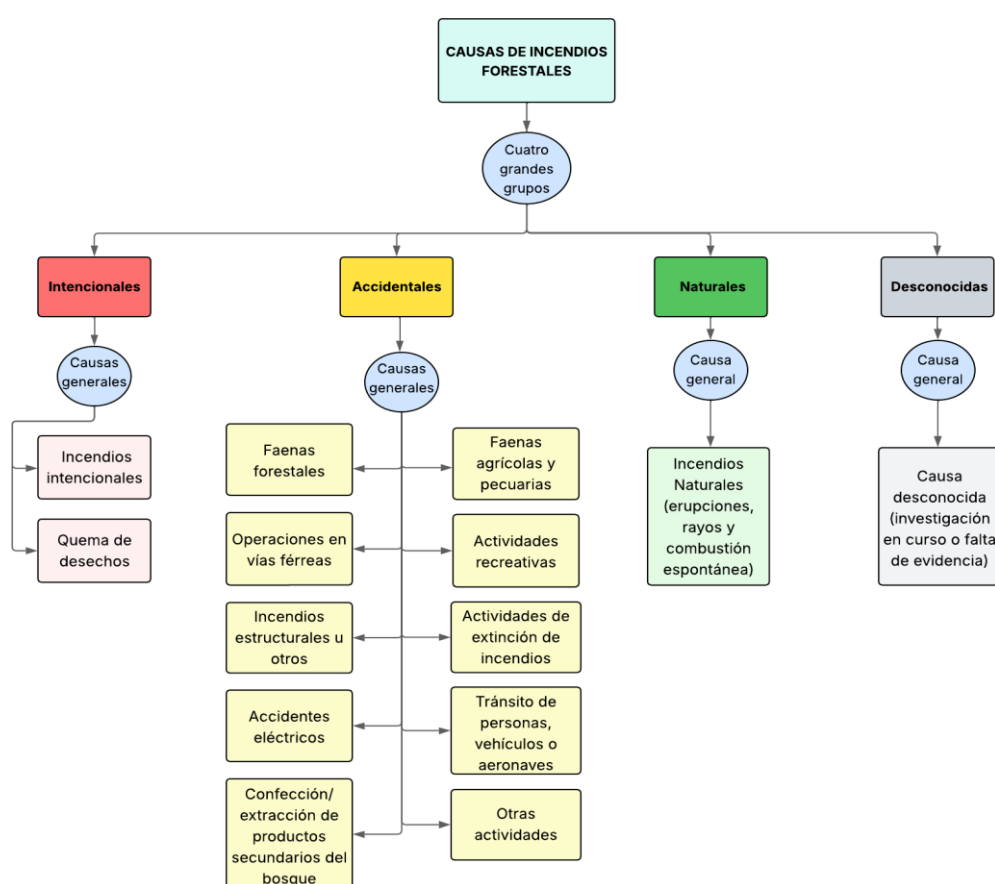


Figura 1.1: Causas de incendios forestales en Chile según las estadísticas de CONAF del año 2022 (elaboración propia).

Según las estadísticas publicadas por la Biblioteca del Congreso Nacional en el año 2023, se menciona que el porcentaje de superficie quemada -según la causa- indica que los incendios intencionales quemaron el 37,3% (355.838 ha) y el tránsito de personas, vehículos o aeronaves del 11,8% (112.106 ha) en los años comprendidos entre el 1977 y 2022 (BCN, 2023, p.4). En esta línea, se observa la relación de la generación de incendios forestales con los efectos antrópicos, reforzando la idea del riesgo presente en las zonas de interfaz urbano-forestal mencionadas con anterioridad.

1.4 Cortafuegos como estrategias para la mitigación de los incendios forestales

Una estrategia crucial para mitigar el impacto de los incendios forestales es la implementación de cortafuegos. Estos se clasifican en tres categorías: cortafuegos químicos, cortafuegos convencionales (o físicos) y barreras verdes.

Los cortafuegos químicos corresponden a la faja de combustible tratada con retardantes para constituir una barrera que dificulta la propagación del fuego (Lucuey & Carrera, 2011). Composición Química: Los retardantes de fuego comúnmente utilizados en la contención de incendios forestales suelen estar compuestos por sales de amonio, como el polifosfato de amonio, sulfatos y cloruro de sodio (sal). Además, incorporan aditivos para mejorar su estabilidad y visibilidad (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2020).

Los componentes químicos de los cortafuegos de este tipo pueden alterar drásticamente la composición del suelo. Esto afecta negativamente a la microbiota (los microorganismos beneficiosos del suelo), la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas y la capacidad de germinación de semillas y estos efectos pueden persistir durante varios años, impactando la recuperación del ecosistema post-incendio (De Luis et al., 2015). Por otro lado, la escorrentía superficial de áreas tratadas con estos químicos puede transportarlos a ríos, arroyos y otros cuerpos de agua. Esto representa una amenaza directa para la vida acuática, incluyendo peces, anfibios y algas, y compromete la calidad general del agua. Una preocupación frecuente es la proliferación de algas nocivas debido al aporte de nutrientes como el fósforo y el nitrógeno presentes en los retardantes (Earl & Bladon, 2017; Gerson & Cooper, 2010). También, en el caso particular de los PFAS, existe una preocupación considerable por su capacidad de bioacumularse en los tejidos de los organismos y biomagnificarse a lo largo de la cadena alimentaria. Esto implica que sus concentraciones pueden aumentar en niveles tróficos superiores, afectando no solo a la fauna silvestre, sino que potencialmente llegando a los seres humanos a través del consumo de alimentos contaminados (Kwiatkowski et al., 2020; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022).

Por otra parte, los cortafuegos convencionales se definen como franjas de terreno desprovistas de vegetación que cumplen la función esencial de limitar la propagación del fuego y facilitar las labores de extinción (Martínez et al., 2020). No obstante, los cortafuegos convencionales, si bien son efectivos en muchos casos, pueden presentar limitaciones en términos de costo de mantenimiento e impacto ambiental.

En relación con los impactos ambientales que generan los cortafuegos convencionales se encuentra la remoción de la capa vegetal, erosión del suelo, disminución de la calidad del suelo, disminución de hábitat para especies silvestres e impactos paisajísticos, entre otros.

1.5 Cortafuegos verdes la innovadora estrategia para la mitigación de incendios

En este contexto, marcado por los impactos ambientales de los cortafuegos convencionales, emergen los cortafuegos verdes como una alternativa o complemento prometedor. Los cortafuegos verdes consisten en barreras vegetales estratégicamente compuestas por especies con características de resistencia al fuego, como un alto contenido de humedad y baja inflamabilidad. Estas barreras no solo tienen el potencial de retardar el avance de las llamas al reducir la disponibilidad de combustible (sin utilizar compuestos químicos perjudiciales o removiendo materia vegetal) y modificar las condiciones micro-climáticas, sino que también pueden aportar beneficios ecológicos adicionales, como la mejora

del hábitat para la fauna local y la reducción de la erosión del suelo. A nivel internacional, la utilización de cortafuegos verdes se ha investigado como una estrategia innovadora para la mitigación de incendios forestales, mostrando resultados preliminares alentadores (Batista, 2012).

La investigación en cortafuegos verdes se enfoca primordialmente en identificar las especies vegetales más adecuadas y eficientes para esta función. Para ello, se realizan pruebas prácticas, ya sea en campo o en laboratorio, donde se miden variables cruciales como la combustibilidad, ignición, inflamabilidad y humedad de las especies. Si bien se ha avanzado considerablemente en la investigación sobre las propiedades de las especies, aún existe una brecha en la medición de la efectividad real de los cortafuegos verdes frente a incendios forestales. Actualmente, la Universidad Técnica Federico Santa María está llevando a cabo estudios de inflamabilidad sobre especies nativas (Arancibia, 2021). Sin embargo, es importante señalar que esta investigación se encuentra en sus etapas iniciales, por lo que no se dispone de información detallada ni de resultados concluyentes específicos sobre especies nativas chilenas en este ámbito.

En la cuenca mediterránea (España, Italia) se han reportado casos donde plantaciones densas de cipreses (*Cupressus sempervirens*) han mostrado una notable resistencia al fuego y han ayudado a proteger infraestructuras o limitar la propagación. Investigaciones posteriores han corroborado que los cipreses, debido a su alto contenido de humedad, bajo contenido de aceites volátiles y una copa densa que evita la entrada de viento, son menos inflamables que otras especies forestales comunes en la región. Aunque no siempre diseñados explícitamente como "cortafuegos verdes" en el pasado, su comportamiento en incendios reales ha llevado a su estudio y recomendación para este propósito (Agencia SINC, 2019).

Para abordar la medición de la efectividad de estos cortafuegos, se pueden emplear dos enfoques principales: la vía práctica, que implica la realización de experimentos controlados en terreno, y la simulación, utilizando software especializado en la propagación de incendios.

La manera práctica para la medición de la efectividad de los cortafuegos verdes consiste en la evaluación de propiedades clave de las especies vegetales que contribuyen a su resistencia al fuego. Se han recomendado cortafuegos verdes para su uso en todo el mundo, incluyendo América, Europa, Asia, África y Australia. Sin embargo, a pesar de este respaldo generalizado, existen poca prueba empírica de los cortafuegos verdes, especialmente con experimentos de campo (Zhou, Yao, & Huang, 2018). Los métodos empíricos se basan principalmente en pruebas de inflamabilidad en laboratorio donde se analizan muestras de especies vegetales bajo condiciones controladas para medir variables como la combustibilidad (facilidad con la que un material se quema), ignición (temperatura o energía necesaria para iniciar la combustión), inflamabilidad (facilidad con la que un material arde una vez encendido) y contenido de humedad, este último siendo un factor crítico, ya que la vegetación con mayor humedad tiende a ser menos inflamable (Forest Service, s.f.a; Agencia SINC, 2015).

Por otra parte, la simulación para la medición de la efectividad de los cortafuegos verdes se relaciona con la creación de modelos de combustibles que se ingresan al software a utilizar (de propagación de incendios) para crear un espacio por el cual el fuego se propaga simulando la presencia del cortafuego verde, también conocido como barrera vegetal. Los softwares por lo general entregan información sobre la velocidad de propagación, área total quemada, tiempo total de avance del incendio, entre otras variables. Esta información posteriormente es analizada para medir la eficiencia dependiendo de la variación en estas variables en relación con la ausencia del polígono que representa el cortafuego.

Estos estudios se han realizado en lugares como en Costa de Marfil para proteger la Sabana (Brou, 2022) o en el Volcán Ilaló, Quito-Ecuador donde se realizó la simulación de un incendio frente a una barrera vegetal (Trujillo et al, 2021), entre otros casos.

1.6 La importancia de la modelación y uso de Software en el estudio de incendios forestales

Los modelos de propagación de incendios -desde los empíricos hasta aquellos basados en principios físicos- constituyen herramientas esenciales para anticipar el comportamiento del fuego, delimitar áreas vulnerables y proyectar su posible extensión (Romanovsky, s.f.). Estas capacidades predictivas resultan cruciales para diseñar estrategias efectivas de contención en tiempo real y para implementar medidas que salvaguarden los ecosistemas y su biodiversidad (Céspedes & Moreno, 2018). La simulación computacional ha demostrado ser particularmente valiosa para identificar puntos críticos, evaluar la eficacia de sistemas de protección como cortafuegos, y optimizar la logística en emergencias, incluyendo la distribución de recursos y planes de evacuación (HAZFIRE, s.f.; Weintraub Pohorille, 2022). Un aspecto fundamental de estos modelos es su capacidad para procesar e integrar vastos conjuntos de datos provenientes de múltiples fuentes, como imágenes satelitales, redes de sensores y registros topográficos, permitiendo analizar factores como la composición vegetal, las condiciones atmosféricas (especialmente parámetros como velocidad del viento y humedad relativa) y las características del terreno que influyen en la dinámica del incendio (Alai Secure, s.f.; Universidad de Chile, 2023; IACC, 2024).

Más allá de su aplicación operativa, estos sistemas de modelación representan una plataforma invaluable para la investigación científica, permitiendo explorar escenarios complejos, validar hipótesis y desarrollar nuevas metodologías de manejo del fuego sin necesidad de recurrir a experimentos a escala real que podrían resultar peligrosos o ambientalmente costosos (CYPE, s.f.; IPICYT, s.f.). Su utilidad se extiende además al ámbito formativo, donde se han convertido en instrumentos pedagógicos esenciales para la capacitación de profesionales forestales y equipos de emergencia. La evolución constante de estas herramientas computacionales ha transformado radicalmente el paradigma de gestión de incendios forestales, estableciendo un enfoque integral que combina precisión analítica con capacidad de respuesta estratégica, desde las fases preventivas hasta las de recuperación post-incendio.

Un aspecto clave en el funcionamiento de estos modelos es la distinción entre las variables que determinan el comportamiento del fuego. Entre las más relevantes se encuentran la velocidad y dirección del viento, la humedad relativa, la pendiente del terreno, la carga y el tipo de combustible vegetal. Mientras el software integra parámetros estructurales predefinidos (como las ecuaciones físicas de propagación y coeficientes propios del modelo), requiere que el usuario ingrese condiciones locales específicas, tales como las variables meteorológicas del escenario, la humedad y composición de la vegetación y la topografía del área de estudio. La interacción entre estos parámetros es la que finalmente determina la dinámica del incendio en cada simulación.

A pesar de los avances en la modelación de incendios forestales, una limitación significativa en el contexto chileno radica en la ausencia de modelos de combustibles específicos que simulen las especies vegetales presentes en su territorio (Morales & Peña, 2024; Santelices et al., 2011). Esta

carencia dificulta la predicción precisa del comportamiento del fuego, ya que las propiedades de combustión varían sustancialmente entre las distintas formaciones vegetacionales endémicas y nativas. En el marco de esta investigación, se utilizará el *software Prometheus*, un simulador de propagación de incendios forestales desarrollado por el Servicio Forestal de Canadá (Consejo de Defensa de los Recursos Naturales, s.f.). La elección de *Prometheus* se fundamenta en los hallazgos de un estudio reciente realizado por J, Peña (2024), donde, tras una evaluación comparativa de diversos programas de modelación de incendios, se determinó que *Prometheus* ofrecía la mayor similitud con el comportamiento real del fuego en escenarios controlados, lo que lo convierte en una herramienta idónea para abordar esta problemática.

1.7 La necesidad de implementación de cortafuegos verdes en el Parque La Reserva

El Parque “La Reserva Villa Alemana” constituye un área de conservación ambiental de 45 hectáreas, ubicada en la comuna de Villa Alemana, Región de Valparaíso, Chile (en la Tabla 1.1 se presenta la ubicación del parque la Reserva). Este espacio natural se emplaza entre los 200 y 265 metros sobre el nivel del mar, presentando laderas con exposición sur-poniente, lo que condiciona su interfaz urbano-rural y favorece la presencia de vegetación nativa en zonas húmedas de quebrada (Estudio Actualización Plan Regulador Comunal de Villa Alemana, 2021).

El terreno del parque está caracterizado por la presencia de quebradas interiores, las cuales albergan formaciones vegetacionales de tipo bosque esclerófilo mediterráneo costero, dominadas por especies como *Lithraea caustica* (Litre) y *Peumus boldus* (Boldo), acompañadas por *Cryptocarya alba* (Peumo), *Quillaja saponaria* (Quillay) y *Schinus latifolius* (Molle) en el estrato arbóreo. En el estrato arbustivo destacan *Colliguaja odorifera* (Colliguay), *Tevo* y *Azara celastrina* (Lilén), mientras que en el estrato herbáceo sobresale *Eupatorium salivum* (Salvia Macho) (Catastro de Plantas Leñosas Parque “La Reserva Villa Alemana”, 2025, p.16).

Se han catastrado 27 especies leñosas, de las cuales el 96% son nativas o endémicas, y pertenecen a 20 familias botánicas. La diversidad florística se distribuye principalmente en los estratos arbóreo (41%) y arbustivo (37%), con un menor porcentaje de especies herbáceas, suculentas y parásitas. La vegetación se encuentra inserta en una matriz de matorral espinoso dominado por *Vachellia caven* (Espino) (Catastro de Plantas Leñosas Parque “La Reserva Villa Alemana”, 2025, p.12).

Sin embargo, su localización dentro de una zona de interfaz urbano-forestal lo expone a un riesgo significativo de incendios forestales, especialmente ante el avance urbano, el aumento de temperaturas producto del cambio climático y la actividad humana. La presencia de visitantes, actividades recreativas y el uso público del parque incrementan la posibilidad de ocurrencia de focos ígneos, intencionados o accidentales. Además, la alta inflamabilidad del bosque esclerófilo en temporada seca y la topografía del terreno pueden facilitar la rápida propagación del fuego.

Tabla 1.1: Ubicación Parque la Reserva, Villa Alemana.

Parque la Reserva			
Ubicación: Peñablanca comuna de Villa Alemana.		Área Total: 45 Hectáreas.	
Entrada	1	Entrada	2
Coordenada Este: 281636.10 m E		Coordenada Este: 281740.72 m E	
Coordenada Norte: 6341477.75 m S		Coordenada Norte: 6341234.24 m S	

La ausencia de estrategias específicas de protección, como cortafuegos adecuados, monitoreo constante o planes de emergencia, puede resultar en la pérdida irreversible del ecosistema, afectaciones a la fauna local, daños a la infraestructura del parque y un riesgo directo para las personas que lo frecuentan o habitan en sus alrededores. Por tanto, se vuelve urgente y necesario implementar medidas de mitigación eficaces como la implementación de cortafuegos verdes.

2. PROBLEMA

El aumento en la frecuencia e intensidad de los incendios forestales en Chile representa una problemática ambiental crítica, impulsada por factores como el cambio climático, la expansión de la interfaz urbano-forestal y el manejo inadecuado del combustible vegetal. Aunque el uso de cortafuegos tradicionales como estrategia de mitigación ha demostrado ser efectivo en la contención del fuego, también conlleva importantes impactos negativos sobre el medioambiente. Su construcción y mantenimiento suelen implicar la remoción extensiva de vegetación y la modificación de la topografía, lo que incrementa la vulnerabilidad del suelo a la erosión hídrica y eólica, especialmente en zonas con pendientes pronunciadas. Esto afecta negativamente tanto la calidad del suelo como la biodiversidad local. En contraste, los cortafuegos verdes, basados en el uso de especies vegetales piro-resistentes, se presentan como una alternativa innovadora y sostenible. Esta solución no solo actúa como barrera natural contra el fuego, sino que además favorece la estabilización del suelo, la conservación de la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos, ofreciendo así una respuesta más integral y ambientalmente responsable frente al desafío de los incendios forestales. En este contexto, los cortafuegos verdes emergen como una innovadora alternativa con potencial para retardar el avance del fuego y ofrecer beneficios ecológicos adicionales. Sin embargo, a pesar del respaldo generalizado y la investigación sobre especies vegetales resistentes al fuego, existe una carencia de pruebas empíricas sobre la efectividad real de los cortafuegos verdes frente a incendios forestales, así como en simulaciones realizadas en software. Esta laguna en el conocimiento dificulta la optimización de su diseño y su implementación efectiva, considerando también que los software no cuentan con modelos de combustibles que simulen especies vegetales presentes en el territorio chileno.

Particularmente, el Parque La Reserva en Peñablanca, Villa Alemana, representa un ecosistema de alto valor ecológico y social que se encuentra en una IUF, exponiéndolo a un riesgo significativo de incendios. La ausencia de estrategias específicas de protección adecuadas, como cortafuegos eficaces, pone en peligro este valioso espacio natural.

Ante esta problemática, surge la necesidad de investigar:

¿Cómo se puede diseñar y evaluar la efectividad de un prototipo de cortafuego verde mediante la aplicación de simulación en software, específicamente *Prometheus*, para mitigar el riesgo de incendios forestales en la interfaz urbano-forestal del Parque La Reserva en Peñablanca, Villa Alemana?

Esta investigación considera variables meteorológicas, topográficas, registros históricos de incendios en la zona y la biodiversidad local en el diseño y la modelación, con el fin de establecer principios orientadores que permitan replicar o adaptar el diseño de cortafuegos verdes en otros contextos con características similares.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Evaluar la efectividad de cortafuegos verdes mediante la modelación de incendios forestales en Parque La Reserva, Peñablanca.

3.2 Objetivos Específicos

- Diseñar dos tipos de cortafuegos verdes para la protección del Parque la Reserva.
- Configurar en el software de simulación los parámetros y características de los cortafuegos verdes diseñados.
- Simular escenarios de propagación de incendios incorporando cortafuegos verdes.
- Determinar la efectividad de los cortafuegos verdes como retardantes del avance de los incendios forestales.

4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1 El impacto de los incendios como desastres socio-ambientales

La problemática de los incendios forestales adquiere una dimensión crítica en las áreas de interfaz urbano-forestal (IUF). Según Miranda et al. (2021), es precisamente en estas zonas donde los incendios provocan la mayor cantidad de fatalidades y la destrucción más significativa de hogares y otras estructuras. Esta realidad subraya la urgencia de identificar estas áreas de alto riesgo y de evaluar exhaustivamente las opciones para un manejo adecuado del paisaje (p.1). A pesar de la reconocida importancia de combinar la gestión del riesgo de incendios forestales con una planificación espacial integrada, González-Mathiesen et ál. (2019) señalan que su implementación efectiva se ve frecuentemente obstaculizada por numerosas incertidumbres, situaciones imprevistas y conflictos inherentes al proceso (p.90).

La conceptualización de los desastres también es fundamental para entender la naturaleza de los incendios. La Organización de los Estados Americanos (1991) establece que un fenómeno natural se transforma en una amenaza solo cuando impacta áreas pobladas. Si este evento peligroso excede la capacidad de respuesta de una sociedad, se clasifica como un desastre natural. Esta perspectiva desafía la noción tradicional de que los desastres son meramente consecuencias de fuerzas naturales, al enfatizar que, sin la presencia humana, los fenómenos naturales no constituyen amenazas ni causan desastres (p. 25). Complementando esta definición, Morales (2019) cita a la Organización Mundial de la Salud, describiendo un desastre como la ocurrencia de un evento externo que perturba gravemente el funcionamiento de una comunidad, resultando en pérdidas humanas, materiales, económicas o medioambientales que superan la capacidad de respuesta de la sociedad afectada con sus recursos disponibles (p. 43).

Oyarce (2019), basándose en Vargas (2002), clasifica los desastres que afectan a las regiones en dos categorías según su origen: desastres naturales o socio-naturales y desastres antrópicos y sociales. Los desastres socio-naturales, como los fenómenos meteorológicos, tectónicos y topográficos, se originan en procesos naturales, pero su impacto es influenciado por la actividad humana. Por otro lado, los desastres antrópicos y sociales son el resultado directo de acciones humanas y decisiones económico-políticas, como conflictos armados, mala gestión de residuos o accidentes por negligencia. En este marco, los incendios forestales son fenómenos que engloban ambos tipos de desastres: si bien las condiciones ambientales pueden propiciar su ocurrencia, siempre son desencadenados por un factor detonante. Sin embargo, se les considera principalmente como desastres socio-naturales o socio-ambientales, debido a un enfoque tradicional que ha privilegiado los aspectos ambientales de su origen, a menudo dejando de lado las causas humanas desde una perspectiva social (p. 15).

El impacto de los incendios como desastres socio-ambientales trasciende las pérdidas materiales y monetarias. Estudios realizados por el Centro de Estudio del Clima y la Resiliencia en Valparaíso, citados por González et al. (2020), indican que la zona centro-sur de Chile es una de las más afectadas por este tipo de eventos (p. 50). Cuando los incendios queman una superficie de gran extensión con alta intensidad, adquieren la categoría de desastres ecológicos. Esto se debe a la elevada dificultad para su control, el alto requerimiento de recursos económicos para su combate, el rango de destrucción que ocasionan, la peligrosidad para su extinción, la devastación de infraestructuras y el deterioro de la calidad del aire, especialmente en zonas de interfaz (p.14). Los mismos autores enfatizan que los incendios de interfaz son una fuente significativa de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel

global y tienen un profundo impacto en ecosistemas en situación crítica, lo que podría llevarlos al colapso o extinción. Además, advierten que los métodos contables tradicionales para estimar los impactos económicos suelen subestimar los costos reales al ignorar los efectos sobre servicios ecosistémicos esenciales. Por ello, un análisis económico riguroso es crucial para orientar las estrategias de prevención, mitigación y control hacia áreas de mayor relevancia social, económica y ambiental. Finalmente, se destaca que los incendios no solo causan daño físico, sino también traumas psicológicos profundos, afectando considerablemente a individuos, familias y comunidades.

Paradójicamente, el fuego, más allá de ser visto como un desastre, también puede ser concebido como una oportunidad para lograr una integración sistémica de los aspectos sociales y ambientales. Esto implica abordar los incendios no solo como eventos destructivos, sino como momentos críticos para implementar estrategias que mejoren la resiliencia y la sostenibilidad de los sistemas socio-ambientales. La "integración sistémica" se refiere a la incorporación de diversas disciplinas y enfoques para gestionar el fuego de manera holística, considerando tanto el impacto ambiental como las implicaciones sociales. En este contexto, es crucial reconocer que los incendios, aunque representan desastres socio-ambientales con impactos devastadores en términos materiales, humanos y ecológicos, también presentan una oportunidad para reevaluar y mejorar las estrategias de gestión del paisaje y la planificación territorial. Al articular proyectos de paisaje que integren la mitigación de riesgos con la planificación del uso del suelo y su diseño, se puede no solo reducir la vulnerabilidad ante futuros incendios, sino también fomentar un desarrollo más equilibrado y consciente de las dinámicas socio-ambientales. De esta manera, los incendios pueden ser una oportunidad para innovar y fortalecer la cohesión entre las comunidades y sus entornos naturales, promoviendo así una coexistencia más armoniosa y sostenible (Sánchez, 2024).

4.2 La gestión del riesgo de desastres (GRD) en relación con incendios forestales

La Gestión del Riesgo de Desastres (GRD) se entiende como un proceso continuo y multisectorial orientado a prevenir, reducir y manejar los riesgos asociados a amenazas naturales, con el objetivo de minimizar sus impactos y promover el desarrollo sostenible (UNISIR, 2009; ONEMI, 2020). Esta perspectiva ha evolucionado desde la mera respuesta ante emergencias hacia enfoques preventivos, sistémicos y proactivos, integrando medidas de planificación territorial, participación comunitaria y políticas públicas coordinadas (Vicuña & Schuster, 2021).

En el contexto específico de los incendios de interfaz urbano-rural, se destaca la necesidad de estrategias como zonas de amortiguamiento o "buffers", las cuales han sido adoptadas en países como España y Francia, donde se establecen distancias mínimas de seguridad entre la vegetación y las viviendas para reducir el riesgo de propagación del fuego (León et al., 2023). Estas medidas requieren planificación de largo plazo, mapeo de zonas de riesgo y manejo del paisaje como un sistema integral (Frievalt, 2024).

Ejemplos concretos de este enfoque incluyen Rancho Mission Viejo en California, que combina zonas de amortiguación, infraestructura ecológica y tecnología para alerta temprana, y el caso chileno de Barrio Botania en Quilpué, donde un programa de prevención comunitaria financiado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), en conjunto con CONAF y Cáritas Chile, permitió que los habitantes enfrentaran con éxito el mega incendio de 2024 mediante capacitación,

equipamiento y una evacuación oportuna (Havana Times, 2024). Esto demuestra la relevancia de la apropiación comunitaria y la planificación anticipada en la gestión efectiva del riesgo de incendios.

4.3 Incendios forestales y sus clasificaciones

Los incendios forestales pueden clasificarse según el estrato de combustible afectado, siendo esta una de las tipologías más utilizadas en la literatura especializada (KPN Safety Solutions, 2025; Martínez et al., 2004). Los incendios de superficie, los más frecuentes, se propagan horizontalmente consumiendo la capa de combustibles superficiales como hojarasca, pastizales y ramas caídas. Aunque presentan menor intensidad y son más fáciles de controlar, constituyen frecuentemente el origen de incendios más severos (Infobae, 2024; KPN Safety Solutions, 2025). En contraste, los incendios aéreos o de copa representan los eventos más peligrosos, caracterizados por una rápida propagación a través de las coronas arbóreas con liberación significativa de energía. Esta categoría incluye tres patrones de comportamiento: antorcheo (ignición puntual de copas), copa pasivo (propagación dependiente del fuego superficial) y copa activa (propagación independiente y continua), siendo este último particularmente complejo de contener y asociado a condiciones de viento superiores a 30 km/h con alta continuidad de copas (PREVIFOR, 2023). Completa esta clasificación los incendios subterráneos, que consumen material orgánico del subsuelo como raíces o turba, mostrando combustión lenta con escasa manifestación superficial, lo que dificulta su detección y extinción, además de presentar riesgo de reignición prolongada (Infobae, 2024; KPN Safety Solutions, 2025). Para una mejor comprensión de los tipos de incendios mencionados, se incluye la Figura 4.1 a continuación, donde se aprecian los incendios superficiales, aéreos y subterráneos.



Figura 4.1: Tipos de incendios forestales (Ocampo M, 2009).

Adicionalmente, los incendios forestales pueden categorizarse según su magnitud, donde se distinguen conatos (<1 ha), incendios estándar (1-500 ha), Grandes Incendios Forestales (>500 ha) y mega incendios (>10,000 ha), estos últimos caracterizados por su capacidad de generar microclimas propios y resultar incontrolables con medios convencionales (Emagister, 2023; KPN Safety Solutions, 2025; National Geographic, s.f.).

Desde la perspectiva de los factores de propagación, se identifican incendios dominados por viento, convección y/o topografía (KPN Safety Solutions, 2025; PREVIFOR, 2023).

Los incendios dominados por el viento se propagan siguiendo su dirección y velocidad, lo que inclina las llamas y precalienta los combustibles ubicados a favor del viento. La tasa de propagación aumenta exponencialmente con la velocidad del viento, y el patrón de avance suele ser alargado en dicha dirección, generando flancos activos y penachos convectivos (Byram, G. M, 1959).

Por su parte, los incendios de tipo convectivo generan columnas de aire caliente (plumas térmicas) lo suficientemente intensas como para crear patrones locales de viento. Este fenómeno puede desencadenar comportamientos extremos del fuego, como tormentas de fuego (*firestorms*), coronamiento (*crowning*) o propagación mediante pavesas (*spotting*). En estos casos, la convección predomina sobre la radiación como mecanismo de transferencia de calor (Countryman, C. M, 1972).

Finalmente, los incendios topográficos son aquellos en los que la propagación del fuego está dominada por la influencia del terreno, especialmente la pendiente. El fuego avanza más rápido cuesta arriba debido al precalentamiento de los combustibles por la radiación y la convección, mientras que la propagación cuesta abajo es más lenta. La orientación de las laderas (solana/umbría) también afecta la disponibilidad de combustibles (Countryman, C. M, 1972). Esto debido a que las laderas de solana al encontrarse expuestas a mayor cantidad de horas de sol directo, su cobertura vegetal presenta menor humedad que las laderas de umbría.

Respecto al origen, mientras los incendios naturales son escasos (asociados principalmente a rayos), los antrópicos representan la mayoría de casos, ya sea por negligencia en actividades humanas o por intencionalidad (Aegon, 2024; Emagister, 2023; Oroel, s.f.; BCN, 2023).

4.4 Cortafuegos verdes una herramienta de manejo de incendios forestales

Los cortafuegos verdes, o barreras verdes, son estructuras de vegetación diseñadas y ubicadas estratégicamente para proteger valores en riesgo. Estos consisten en franjas o bloques, anchos o estrechos, donde la vegetación densa o altamente inflamable ha sido modificada continuamente para presentar un menor volumen y/o una baja inflamabilidad (Green, 1977). El objetivo principal de estas barreras es disminuir la velocidad de propagación y la intensidad del fuego, particularmente interrumpiendo la propagación por las copas de los árboles, lo que facilita significativamente las labores de control y combate de los incendios (Batista et al., 2012; Viana et al., 2018).

La clasificación de los cortafuegos verdes puede realizarse atendiendo a diversos criterios, como las especies vegetales utilizadas, su diseño estructural y su ubicación estratégica. Esta flexibilidad en la categorización permite adaptar las barreras vegetales a las condiciones específicas de cada zona, maximizando su eficacia en la prevención de incendios forestales. La selección del tipo de cortafuego verde depende de factores como la topografía del terreno, las características climáticas predominantes y los recursos disponibles para su implementación y mantenimiento (Hernández et al., 2019). A continuación, se describen los tipos más comunes.

4.4.1 Clasificación por Diseño Estructural



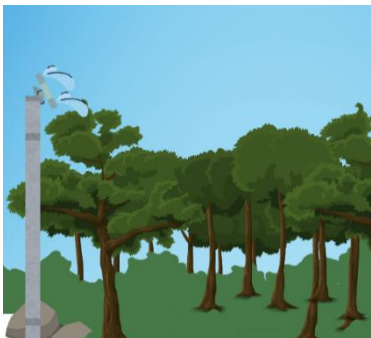
Esta categorización se basa en la disposición espacial y la forma en que se configura la vegetación en el paisaje para interceptar el avance del fuego.

Cortafuegos Verdes Lineales: Consisten en franjas continuas de vegetación que se extienden a lo largo de áreas estratégicas, tales como bordes de carreteras, límites de propiedades o frentes de masas forestales. Su diseño rectilíneo permite una fácil integración con el paisaje y son efectivos para canalizar o detener fuegos de superficie de baja a moderada intensidad (Vélez, 2000).

Cortafuegos Verdes Modulares: Compuestos por módulos o bloques de vegetación distribuidos en patrones específicos, como cuadrículas, círculos o diseños irregulares. Este tipo de diseño es particularmente útil en áreas con topografía irregular o donde se requiere una mayor flexibilidad para adaptar la barrera a elementos del paisaje. Permiten la compartimentación del área, creando puntos de anclaje para el control del fuego (Hernández et al., 2019).

Cortafuegos Verdes Mixtos: Combinan el uso de especies vegetales ignífugas con otras técnicas de prevención de incendios. Esto puede incluir la integración de sistemas de riego para mantener la humedad de la vegetación, la incorporación de cortafuegos físicos (como franjas de suelo desnudo o líneas de defensa) en puntos críticos, o la gestión activa de la carga de combustible mediante el pastoreo (Viana et al., 2018). Para una mayor comprensión visual de los tipos de cortafuegos verdes descritos, sus representaciones gráficas se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Tipos de cortafuegos verdes.

Cortafuegos verdes lineales	Cortafuegos verdes modulares	Cortafuegos verdes mixtos
 <p data-bbox="304 1491 497 1525">(Creación propia)</p>	 <p data-bbox="724 1498 916 1532">(Creación propia)</p>	 <p data-bbox="1139 1498 1335 1532">(Creación propia)</p>
<p data-bbox="204 1541 598 1753">Consiste en Franjas de vegetación que se extienden a lo largo de áreas estratégicas, como bordes de carreteras o límites de bosques. Su diseño lineal permite una fácil integración con el paisaje.</p>	<p data-bbox="624 1541 1016 1753">Compuestos por módulos de vegetación distribuidos en patrones específicos, como cuadrículas o círculos. Este diseño es útil en áreas con topografía irregular o donde se requiere una mayor flexibilidad.</p>	<p data-bbox="1042 1541 1434 1715">Combinan especies vegetales con otras técnicas de prevención, como la instalación de sistemas de riego o la incorporación de cortafuegos físicos en áreas críticas.</p>

4.4.2 Clasificación por Composición y Función Específica

Esta clasificación se enfoca en las características intrínsecas de las especies vegetales seleccionadas y el rol principal que desempeñan en la interrupción del fuego.

Franjas de Especies de Baja Inflamabilidad: Son el tipo más común y se basan en la selección de especies arbóreas o arbustivas cuyas propiedades físico-químicas las hacen inherentemente menos propensas a la ignición y a la propagación intensa del fuego. Estas propiedades incluyen un alto contenido de humedad en sus tejidos, una baja proporción de aceites volátiles o resinas, y un follaje denso que puede generar sombra, ayudando a mantener la humedad del suelo circundante (Moreira et al., 2001; Plana et al., 2005). De acuerdo con Biondi y Batista (2010), para evaluar el potencial de las especies que pueden ser utilizadas en la formación de barreras verdes es necesario que sus características atiendan el máximo de requisitos relacionados con la baja inflamabilidad para dificultar la ignición y propagación del fuego. La materia vegetal es siempre combustible, pero no siempre es inflamable; la inflamabilidad varía significativamente según la especie y su contenido de humedad (Vélez, 2000).

Cortafuegos con Especies Leñosas de Hoja Ancha o Caducifolias: Frecuentemente, estas especies presentan una menor inflamabilidad en comparación con las coníferas, especialmente durante las estaciones de mayor riesgo de incendio. Su menor contenido de resinas y un mayor contenido de humedad foliar las convierten en opciones valiosas. En el caso de las caducifolias, la pérdida de hoja en otoño, si no se gestiona, puede acumular combustible fino, pero la baja inflamabilidad de la planta viva sigue siendo una ventaja (Paula y Ojeda, 2009).

Plantaciones Cortafuegos: Son masas forestales diseñadas y gestionadas específicamente con el objetivo de actuar como barreras ignífugas. A menudo, se seleccionan especies de crecimiento relativamente rápido y alta tolerancia a la sequía, pero siempre priorizando sus propiedades de baja inflamabilidad. La gestión de estas plantaciones incluye podas y aclareos para reducir la carga de combustible y evitar la continuidad vertical y horizontal del incendio (González et al., 2017).

Cortafuegos Agroforestales o Silvopastorales: Integran la producción agrícola o ganadera con la presencia de árboles en la misma superficie. En este contexto, las actividades de pastoreo o cultivo contribuyen a mantener la carga de combustible fino a nivel del suelo, reduciendo la propagación de incendios de superficie. Los árboles, a su vez, pueden ser seleccionados por sus características ignífugas para formar una barrera vertical (Kaye et al., 2019).

4.4.3 Clasificación por Ubicación Estratégica

La efectividad de un cortafuego verde también depende crucialmente de su posicionamiento en el terreno en relación con las áreas a proteger y los patrones de propagación del fuego.

Cortafuegos Perimetrales: Se establecen alrededor de áreas de especial valor, como zonas de interfaz urbano-forestal, infraestructuras críticas, o áreas de alto valor ecológico. Su propósito es proteger estas áreas creando un anillo de seguridad que detenga o disminuya el avance de un incendio proveniente del exterior (CONAF, n.d.).

Cortafuegos Internos o de Compartimentación: Diseñados para dividir grandes extensiones de masa forestal en unidades de manejo más pequeñas. Estos permiten la compartimentación del combustible, dificultando la propagación a gran escala y facilitando las labores de extinción al crear puntos de anclaje para los equipos de combate (Scott y Burgan, 2005).

Cortafuegos de Enlace: Conectan barreras naturales existentes (como ríos, formaciones rocosas o grandes claros) o infraestructuras lineales (caminos, carreteras, líneas de transmisión) para formar una

red de cortafuegos más robusta y continua. Su objetivo es aprovechar y potenciar la efectividad de elementos preexistentes en el paisaje (Fernández et al., 2019).

4.5 Características clave de las plantas para su desempeño como cortafuegos verdes

La selección de especies vegetales es un aspecto fundamental en el diseño de cortafuegos verdes, ya que determina la eficacia de estas barreras en la prevención y mitigación de incendios forestales (Departamento de Recursos Naturales del Estado de Washington, 2020, p.6). A continuación, se presentan las características clave que deben poseer las especies vegetales para cumplir eficazmente su función como cortafuegos verdes:

En primera instancia, es esencial comprender la naturaleza de la inflamabilidad vegetal. Esta no es una propiedad inherente e inmutable de las especies, sino un rasgo dinámico que varía significativamente según múltiples factores intrínsecos de la planta y las condiciones ambientales. Como se ha definido, la inflamabilidad engloba la capacidad de un combustible para incendiarse y mantener una llama (Anderson et al., 1970). La evaluación de esta característica es crucial para la gestión del riesgo de incendios y la implementación de estrategias preventivas. Asimismo, la inflamabilidad se ve influenciada por una serie de propiedades de la planta, incluyendo su contenido de humedad, composición química, características físicas, su capacidad de regeneración, la compatibilidad ecológica y las necesidades de mantenimiento, además de su etapa de desarrollo, características las cuales se describen a continuación.

4.5.1 El Rol del contenido de humedad

Un factor crítico en la determinación de la inflamabilidad de una planta es el contenido de humedad en sus tejidos vegetales, actuando como un potente retardante natural de la combustión. Las especies que mantienen un elevado porcentaje de agua en sus hojas, tallos y otras estructuras son considerablemente menos susceptibles a la ignición y propagación del fuego (Doran et al., 2004; Ganteaume et al., 2013). La presencia de agua requiere una cantidad sustancial de energía calórica para evaporarse antes de que los procesos de pirólisis y combustión puedan iniciarse, disminuyendo significativamente la velocidad a la que se produce la quema (Face2fire, s.f.). Las plantas con hojas gruesas y suculentas, como diversas especies de cactus (por ejemplo, *Opuntia spp.*) o *Aloe vera*, son ejemplos paradigmáticos de esta característica, ya que retienen eficazmente la humedad incluso durante períodos prolongados de sequía, contribuyendo a su baja inflamabilidad (Doran et al., 2004; Papanastasis et al., 2005). La mayoría de los tejidos foliares vivos contienen al menos un 50% de agua en peso, y su ignición no ocurre hasta que se ha perdido una proporción significativa de esta agua por evaporación (White & Zipperer, 1998). Las investigaciones demuestran consistentemente que las especies con mayor contenido de humedad presentan una menor inflamabilidad, reduciendo de manera efectiva el riesgo de propagación del fuego (Batista et al., 2012).

4.5.2 Influencia de la composición química

Además del contenido hídrico, la composición química interna de las hojas y la corteza desempeña un papel determinante en la inflamabilidad de las plantas. Aquellas especies que poseen bajas concentraciones de compuestos volátiles, como aceites esenciales, resinas y terpenos, exhiben una menor propensión a contribuir a la propagación del fuego (Keeley et al., 2005; Murray & Hardstaff,

2018). Estos compuestos actúan como acelerantes de la combustión, facilitando la ignición, aumentando la intensidad de las llamas y la velocidad de propagación. Por el contrario, las plantas con una predominancia de hojas coriáceas o cerosas, que a menudo se caracterizan por una estructura más densa y un menor contenido de estas sustancias volátiles, demuestran una mayor resistencia a la ignición, constituyendo una barrera natural adicional contra el fuego (Batista et al., 2012).

4.5.3 La Etapa de Desarrollo y su Impacto en la Inflamabilidad

Asimismo, la etapa de desarrollo o edad de un individuo vegetal es un factor crítico que modula su inflamabilidad. Esta propiedad no es estática, sino que evoluciona a lo largo del ciclo de vida de la planta debido a cambios continuos en sus características físicas, fisiológicas y químicas.

En las fases iniciales de crecimiento, como plántulas y vegetación joven, las plantas presentan una alta proporción de tejidos finos y tiernos, los cuales tienden a deshidratarse rápidamente. Esta característica, junto con una menor biomasa, resulta en una mayor facilidad de ignición en estas etapas, ya que requieren menos energía para iniciar la combustión (Pausas, 2012).

A medida que el individuo vegetal transita hacia la madurez, acumula una mayor biomasa, desarrollando estructuras más robustas como tallos leñosos y un follaje denso. Aunque el contenido de humedad en los tejidos vivos puede fluctuar estacionalmente, las plantas maduras con sistemas radiculares profundos suelen mantener niveles de humedad más estables. Sin embargo, la acumulación de biomasa muerta (ramas secas y hojarasca retenida) dentro de la estructura de la planta y en su entorno aumenta significativamente, contribuyendo al potencial de combustible. Los cambios en la composición química, como el aumento de lignina y celulosa, también influyen en la duración de la combustión.

Finalmente, en las etapas tardías y de senescencia, la cantidad total de combustible, tanto vivo como muerto, suele ser considerablemente mayor. Este material, al poseer un bajo contenido de humedad, es altamente inflamable y puede actuar como un "combustible escalera", facilitando la propagación del fuego del suelo a la copa (Prometheus Protocols, s.f.). Una planta envejecida o en declive puede exhibir una menor vitalidad y, por ende, un menor contenido de humedad en sus tejidos vivos, lo que incrementa su susceptibilidad general a la ignición y propagación.

4.5.4 Capacidad de Regeneración Post-Incendio

Por otra parte, la capacidad de regeneración post-incendio se refiere a la habilidad de ciertas especies vegetales para rebrotar vigorosamente desde su base (rebrote de cepa) o para germinar rápidamente a partir de semillas resistentes al fuego, una vez que el incendio ha pasado (Keeley et al., 2012; Pausas et al., 2004). Aunque esta característica no reduce la inflamabilidad directa de la planta antes del evento de fuego, es fundamental para la resiliencia del ecosistema y la rápida recuperación de la cobertura vegetal en un cortafuegos verde después de un posible paso del fuego. Especies con alta capacidad de rebrote o germinación post-fuego contribuyen a la rápida restauración de la barrera protectora, minimizando la erosión del suelo y el establecimiento de especies invasoras (Moreira et al., 2012). Esto es crucial para mantener la funcionalidad a largo plazo del cortafuego.

4.5.5 Compatibilidad con el Ecosistema Local

De igual importancia, la compatibilidad con el ecosistema local subraya la necesidad de utilizar especies vegetales autóctonas o nativas en la implementación de cortafuegos verdes. Las especies autóctonas están naturalmente adaptadas a las condiciones climáticas, edáficas (suelo) y biológicas específicas de la región, lo que les confiere una mayor resistencia a sequías, enfermedades y plagas locales (Keeley, 2006). Esta adaptación intrínseca se traduce en una mayor probabilidad de éxito en el establecimiento y desarrollo de la barrera vegetal, una mejor retención de la humedad, y una menor necesidad de insumos externos como riego o fertilizantes. Además, el uso de especies nativas contribuye a la conservación de la biodiversidad local y al mantenimiento de la estructura y función ecológica del paisaje circundante, evitando la introducción de especies exóticas que podrían volverse invasoras o alterar el equilibrio del ecosistema (Pyšek et al., 2004).

4.5.6 Requerimientos de Mantenimiento y Cuidado

Finalmente, la selección de especies para cortafuegos verdes debe considerar sus necesidades de mantenimiento y cuidado. Es preferible optar por especies que requieran un bajo mantenimiento, lo que implica menos poda, menor necesidad de eliminación de hojarasca o material muerto, y una menor dependencia de riego una vez establecidas (Arbor Valley Nursery, 2024; Valenzuela, 2018). Las plantas que producen poca hojarasca fina y seca o que tienen una alta tasa de descomposición de sus residuos vegetales son deseables, ya que reducen la acumulación de combustible en el suelo. En este contexto, el requerimiento hídrico es un factor clave; especies con bajas necesidades de agua, que sean tolerantes a la sequía y capaces de mantener su vitalidad y contenido de humedad con precipitaciones mínimas, son ideales (Agee et al., 2005; Royal Horticultural Society, 2023). Un bajo requerimiento de mantenimiento no solo optimiza los recursos y costos asociados a la gestión del cortafuego, sino que también asegura la sostenibilidad y efectividad a largo plazo de la barrera vegetal en la prevención de incendios.

4.6 Simulación de cortafuegos verdes en software de propagación de incendios

La simulación por computadora se presenta como herramienta alternativa al estudio de los incendios forestales, de manera que se pueden recrear eventos que sucedieron en el pasado y estudiar diversas soluciones que pudieran tomarse, y considerarlas para casos futuros (Trujillo et al, 2021, p.3). Existe una variada gama de software que simula la propagación de incendios, como Cell2Fire, un programa español desarrollado principalmente por el Grupo de Investigación en Tecnologías de la Información para la Gestión Forestal Sostenible (TIG) de la Universidad de Córdoba; FARSITE y FlamMap, softwares estadounidenses creados por el USDA Forest Service, específicamente por el Missoula Fire Sciences Laboratory; y *Prometheus*, software canadiense desarrollado por el Canadian Forest Service en colaboración con agencias provinciales y territoriales, por mencionar algunos.

Aunque existen numerosos estudios de modelado enfocados en la gestión del tratamiento de combustibles, son pocos los que abordan específicamente el diseño y tratamiento de redes de cortafuegos, conocidas como Fuel Break Networks (FBN, por sus siglas en inglés) (Nguyen, Dung et al., 2024). Entre los trabajos que destacan en esta línea se encuentra el de Belavenutti et al. (2022), quienes desarrollaron un modelo para priorizar proyectos discretos, es decir, subredes dentro de una FBN, con el objetivo de implementar tratamientos de combustible en un horizonte temporal de 10 a 20 años. Para ello, diseñaron trece escenarios, en los que la secuencia de ejecución de los proyectos

fue optimizada para cumplir con múltiples objetivos de gestión del fuego. Por otro lado, Mollocana-Lara et al. (2025) evaluaron el comportamiento del fuego y la efectividad tanto de barreras existentes (como carreteras) como de cortafuegos propuestos, mediante simulaciones realizadas con el software FlamMap.

En el contexto chileno, el *software Prometheus* ha mostrado una mayor precisión en general referente a la simulación de incendios en Chile, comparado con otros software como FlamMap y Cell2Fire (Peña, 2024). *Prometheus* integra una base de datos de modelos de combustible estandarizados, compatibles con las coberturas vegetales de su país de origen (Tymstra et al., 2010). Dado que el *software Prometheus* no dispone de modelos de combustible preexistentes que reflejen características específicas del territorio chileno, se hace necesaria la modificación de un modelo existente. Esta adaptación permitirá que el modelo de combustible resultante represente fielmente las propiedades ignífugas y la respuesta al fuego de las especies vegetales del territorio propuestas para el diseño de los cortafuegos verdes, maximizando así la fidelidad de las simulaciones y la validez de los resultados obtenidos para la toma de decisiones.

4.7 Modelo de combustibles para cortafuegos verdes en el software Prometheus

Un modelo de combustible en el contexto de la simulación de incendios forestales representa una caracterización cuantitativa y cualitativa de la vegetación que influye directamente en la propagación del fuego. Estos modelos describen las propiedades físicas y químicas de los combustibles vegetales (vivos y muertos) en un área determinada, permitiendo a los simuladores predecir el comportamiento del fuego. El *software Prometheus*, como simulador canadiense de propagación de incendios, opera con una serie de modelos de combustible estandarizados, derivados principalmente del Sistema Canadiense de Comportamiento del Fuego Forestal (Canadian Forest Fire Behavior Prediction System - FBP System) (Tymstra et al., 2010). Estos modelos están diseñados para reflejar las características y la respuesta al fuego de los tipos de vegetación predominantes en Canadá. A continuación, en la Figura 4.2 se presenta un fragmento de la lista de modelos de combustibles que utiliza el programa.

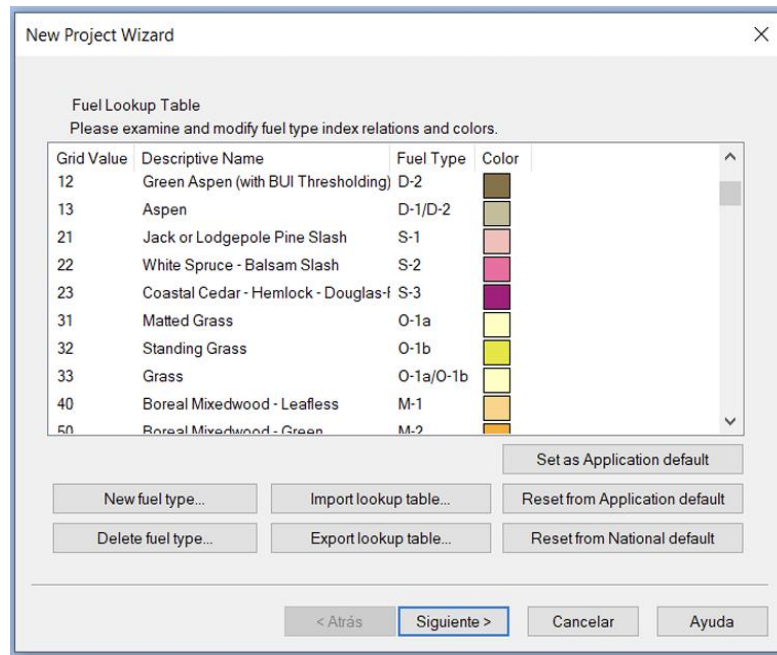


Figura 4.2: Lista de modelos de combustibles disponibles en Prometheus (Software Prometheus, 2025).

Para cada modelo de combustible, *Prometheus* considera parámetros claves que definen su comportamiento. Entre los relevantes para la simulación se incluyen:

- **Altura de la Base del Dosel (CBH - Crown Base Height):** Medida en metros (m), esta variable es fundamental para la propagación del fuego en el dosel de los árboles. Influye directamente en la transición de un incendio superficial a un incendio de copas. Los datos de CBH se obtienen usualmente mediante mediciones directas en campo (clinómetros, telémetros láser) o análisis de modelos digitales de elevación (Tymstra et al., 2010, p.36).
- **Carga de Combustible en la Copa (CFL - Crown Fuel Load):** Representada en kilogramos por metro cuadrado (kg/m^2). La CFL cuantifica la masa de material combustible presente en la corona de los árboles, es decir, en la parte superior de la vegetación. Este valor se diferencia del BUI, que se asocia al combustible acumulado en los estratos más profundos. La CFL se determina mediante muestreos de campo, que incluyen la recolección y pesaje de la materia vegetal seca, o mediante modelos de estimación que utilizan características de la vegetación y mapas de cobertura vegetal existentes. (Tymstra et al., 2010, p.36).
- **Altura del Umbral (TH - Threshold Height):** Es la altura mínima en metros (m) que debe alcanzar la llama para que el fuego pueda propagarse de manera autosostenida, considerando factores como el tipo de combustible, la humedad y las condiciones atmosféricas. Actúa como un filtro para determinar si el incendio puede propagarse a nuevos combustibles (Forestry Canada, 1992).
- **Índice de Acumulación de Combustible (BUI - Buildup Index):** Aunque sus unidades son relativas, el BUI es un indicador que se correlaciona con la densidad superficial del combustible disponible para quemar (masa por unidad de área, kg/m^2), influyendo en la intensidad y duración del incendio. Su estimación se basa en datos de carga de material vegetal seco, procesados mediante modelos que consideran la humedad y el nivel de curación de la vegetación (Tymstra et al., 2010, p.36).

- **Máximo Efecto de Acumulación (Max BE - Buildup Effect):** El Max BE corresponde al valor máximo posible del Buildup Effect (BE) para un tipo específico de combustible. Este parámetro se deriva del Buildup Index (BUI), que cuantifica la cantidad de combustible acumulado en capas profundas, como hojarasca, ramas muertas y otros combustibles pesados. El Max BE representa un escenario de "peor caso", en el que la acumulación histórica de combustible es óptima para favorecer incendios de alta intensidad. Su propósito es evaluar la máxima influencia que dicha acumulación puede tener en la intensidad del fuego bajo condiciones extremas (Forestry Canada, 1992). En la Ecuación 4.1 se presenta la fórmula para su cálculo.

Ecuación 4.1: Cálculo del BE
(Forestry Canada, 1992).

$$BE = e^{\left[50 \cdot \ln(q) \cdot \left(\frac{1}{BUI} - \frac{1}{BUI_0}\right)\right]}$$

Donde:

- BUI , índice de acumulación ("Buildup Index").
 - BUI_0 , Índice de acumulación promedio del modelo de combustible.
 - q , proporción de la tasa de propagación máxima posible que se alcanza en un BUI estándar (se define al final de la sección).
- **Velocidad de Propagación del Fuego (ROS - Rate of Spread):** Expresada en metros por minuto (m/min), esta variable es crucial para representar la tasa a la que el fuego avanza a través del combustible. Los valores de ROS pueden derivarse de tablas de comportamiento del combustible específicas para cada tipo de vegetación o ajustarse basándose en mediciones de campo y modelos empíricos que integran condiciones de humedad y meteorológicas (Tymstra et al., 2010, p.35). En la Ecuación 4.2 se presenta la fórmula para su cálculo.

Ecuación 4.2: Cálculo del ROS
(Forestry Canada, 1992).

$$ROS = a \cdot \left[1 - e^{(-b \cdot ISI)}\right]^c \cdot CF$$

Donde:

- ISI, índice de propagación inicial ("Initial Spread Index").
 - CF, coeficiente de curado del césped ("Grass curing coefficient").
 - a , b y c , constantes de los modelos de combustible (se definen al final de la sección).
- **Tasa de propagación del retroceso del fuego (BROS - Back fire spread rate):** Representa la velocidad a la que el fuego avanza en dirección opuesta al viento. Por lo general metros por minuto (m/min) o kilómetros por hora (km/h). Mientras más fuerte el viento, menor será el BROS (Forestry Canada, 1992). En la Ecuación 4.3 se presenta la fórmula para su cálculo.

Ecuación 4.3: Cálculo del BROS
(Forestry Canada, 1992).

$$BROS = a \cdot (1 - e^{-b \cdot BISI})^c \cdot BE$$

Donde:

- BISI, índice de propagación inicial asociado a la tasa de propagación hacia atrás.
- a , b y c , constantes de los modelos de combustible (se definen al final de la sección).
- **Tasa de propagación del fuego en flanco (FROS - Flank fire spread rate):** Es la velocidad a la que el fuego se expande perpendicularmente a la dirección del viento principal. Normalmente se mide en metros por minuto (m/min) o kilómetros por hora (km/h). Determina cómo se ensancha el incendio y su patrón de crecimiento (Forestry Canada, 1992). En la Ecuación 4.4 se presenta la fórmula para su cálculo.

Ecuación 4.4: Cálculo del FROS
(Forestry Canada, 1992).

$$FROS = \frac{ROS + BROS}{LB \cdot 2}$$

Donde:

- LB, relación longitud/ancho ("Length-to-breadth ratio").
- **Definición de Parámetros Complementarios (Forestry Canada, 1992):**
 - a : Coeficiente que ajusta la tasa de propagación base (sin viento ni pendiente).
 - b : Coeficiente que cuantifica la sensibilidad de la ROS al viento (WS , velocidad del viento). Valores altos de b indican que el viento acelera significativamente la propagación.
 - c : Coeficiente que ajusta el efecto de la pendiente en la ROS.
 - q : Representa la proporción de la tasa máxima de propagación del fuego cuando el Índice de Acumulación (BUI) es igual a 50. Este parámetro ajusta la influencia del BUI en la propagación del fuego.
 - Si $q = 1$, la relación entre BUI y ROS es lineal.
 - Si $q < 1$, la ROS aumenta lentamente con el BUI.
 - Si $q > 1$, la ROS es altamente sensible a cambios en el BUI.

4.8 Normativa ambiental aplicable

Chile cuenta con una normativa específica destinada a la protección y gestión sostenible de los ecosistemas forestales nativos. En este marco, la Ley N°20.283 sobre Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal establece como objetivo central la protección, recuperación y mejoramiento del bosque nativo, con el fin de garantizar la sustentabilidad de los ecosistemas y dar cumplimiento a la política ambiental del país (Ley N°20.283, 2008). Esta ley se complementa con instrumentos técnicos orientados a la gestión del riesgo de incendios forestales, como la Norma de manejo de prevención y protección contra incendios forestales en zonas rurales y de interfaz urbano/forestal aplicable a bosque nativo (CONAF & MINAGRI, 2019).

Dicha norma define lineamientos específicos para la implementación de medidas destinadas a disminuir la propagación del fuego en zonas de riesgo. Entre estas medidas se encuentra la construcción de fajas libres de vegetación, que consisten en franjas de terreno de ancho determinado, adyacentes a rodales de bosque nativo, en las que se elimina completamente la vegetación arbórea y arbustiva, conservando la cubierta herbácea como estrategia de protección contra la erosión. Estas fajas se implementan especialmente en sectores próximos a zonas habitadas o de interfaz urbano-rural, así como en bordes de caminos que superan los 10 metros de ancho (CONAF & MINAGRI, 2018).

Asimismo, la norma contempla el uso de fajas cortacombustibles, definidas como zonas de amortiguación que buscan reducir la continuidad vertical y horizontal de la vegetación mediante técnicas como raleos y podas, así como el manejo de la vegetación herbácea. El objetivo principal de estas fajas es reducir la carga de combustible presente en el ecosistema, retardando así la propagación del fuego en caso de un incendio forestal (CONAF & MINAGRI, 2018).

La aplicación de esta normativa resulta pertinente al considerar que, según la información disponible en la Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile (IDE Chile), el área del Parque La Reserva presenta una cobertura vegetal clasificada como “Bosque esclerófilo mediterráneo costero de *Lithrea caustica* - *Cryptocarya alba*”. Este ecosistema corresponde a bosque nativo según lo definido por la Ley 20.283, al estar constituido por especies autóctonas características de la zona central de Chile. El bosque esclerófilo mediterráneo posee un elevado valor ecológico, destacando como hábitat de una singular biodiversidad que incluye numerosas especies endémicas –únicas en el mundo– tanto de flora como de fauna (Portillo, 2024).

De acuerdo con la definición establecida en la Ley 20.283, se entiende por bosque nativo a aquel compuesto por especies originarias del territorio nacional, provenientes de generación o regeneración natural, o plantaciones bajo dosel que reproduzcan las especies propias del área de distribución original, admitiendo eventualmente la presencia dispersa de especies exóticas. En este sentido, la vegetación presente en el área cumple con los criterios legales y técnicos para ser reconocida como bosque nativo, por lo que la aplicación de las disposiciones contenidas en esta ley y sus normas complementarias resulta pertinente y/o plenamente procedente.

4.8.1 Especificaciones para la Creación de Cortafuegos Verdes según la Normativa Vigente

Los cortafuegos verdes corresponden a una estrategia de mitigación de incendios basada en el manejo planificado de la vegetación, cuyo propósito es disminuir la propagación del fuego en entornos de bosque nativo. Esta medida está reconocida formalmente por la Norma de Manejo de Prevención y Protección contra Incendios Forestales en zonas rurales y de interfaz urbano/forestal (CONAF &

MINAGRI, 2019), la cual establece criterios técnicos para su implementación en zonas vulnerables a incendios forestales, como el caso de los bosques esclerófilos costeros.

El diseño de estos cortafuegos verdes se estructura en torno a dos tipos principales de intervención silvícola: las fajas libres de vegetación y los cortacombustibles. Las primeras consisten en franjas de al menos 10 metros de ancho (en proyección horizontal) en las que se elimina completamente la vegetación arbórea y arbustiva, manteniendo únicamente el estrato herbáceo, con el fin de reducir el riesgo de propagación del fuego y prevenir procesos erosivos. Por su parte, los cortacombustibles se instalan con un ancho mínimo equivalente a una vez la altura del bosque (nunca inferior a 10 metros) y consisten en raleos y podas de los árboles, que buscan interrumpir la continuidad vertical y horizontal de la vegetación. En estos sectores, se debe podar hasta un 40 % de la altura de los árboles (con un máximo de 8 metros) y controlar el estrato herbáceo, evitando su conexión con la copa de los árboles (CONAF & MINAGRI, 2018).

La aplicación de estas medidas se orienta principalmente a zonas de interfaz urbano-rural, donde el bosque colinda con áreas habitadas, así como en las inmediaciones de caminos, quebradas, humedales y otras estructuras naturales que puedan actuar como vectores de propagación del fuego. El diseño debe considerar distancias desde bordes de caminos o viviendas, siempre en proyección horizontal, sin contemplar la pendiente del terreno. Además, los cortacombustibles deben instalarse contiguos a fajas libres de vegetación o a elementos naturales capaces de contener el avance del fuego, como cursos de agua.

La selección de especies vegetales permitidas también está regulada. En el caso de las fajas libres de vegetación, solo se admite la presencia de cubierta herbácea de baja inflamabilidad, mientras que en los cortacombustibles se pueden mantener árboles nativos resistentes al fuego.

En la Tabla 4.2 se presenta un resumen de las especificaciones para la construcción de cortafuegos verdes basado en la Norma de manejo de prevención y protección contra incendios forestales en zonas rurales y de interfaz urbano/forestal aplicable a bosque nativo.

Tabla 4.2: Resumen de especificaciones relevantes para la construcción de cortafuegos o cortacombustibles.

Aspecto	Característica	Descripción
Cortacombustible	Ancho Mínimo	10 metros
	Ubicación	Complementario a fajas libres o estructuras naturales (quebradas, humedales).

Existen, sin embargo, restricciones importantes. Estas medidas no deben aplicarse en terrenos con pendientes superiores al 45 %, en áreas clasificadas como hábitat de especies protegidas según el Artículo 19° de la Ley 20.283, ni en plantaciones forestales. Además, está prohibido el uso de fuego como método de manejo, a menos que se cuente con un Plan de Quema aprobado por CONAF. Todo material vegetal cortado debe retirarse del sitio o tratarse mediante chipeo, evitando su acumulación en sectores cercanos a cuerpos de agua.

En cuanto a la mantención, la norma exige una frecuencia anual, preferentemente entre los meses de septiembre y marzo, coincidiendo con la temporada de mayor riesgo de incendios. También se debe realizar monitoreo constante de la regeneración indeseada, así como de posibles daños por plagas o

enfermedades, los que deben ser informados a CONAF. Desde la aprobación del plan técnico, se establece un plazo de 12 meses para ejecutar completamente las acciones definidas.

Finalmente, la implementación de cortafuegos verdes también permite la incorporación de innovación tecnológica y ecológica, lo que ha dado lugar a experiencias piloto en distintos territorios. Entre ellas, se incluye el uso de modelación computacional para validar su eficacia ante distintos escenarios de propagación del fuego, así como el diseño de mosaicos vegetales con especies nativas de baja inflamabilidad, que además aportan valor ecológico, resiliencia y biodiversidad a los paisajes intervenidos.

4.9 Especificaciones para el diseño de cortafuegos verdes según la literatura

El diseño de cortafuegos verdes efectivos requiere la integración de especificaciones técnicas que varían en función de los patrones dominantes de propagación del fuego. Para incendios influenciados por la topografía, una mayor anchura en pendientes pronunciadas es crucial; Rothermel (1972) sugiere un ancho mínimo de 2.5 veces la altura de la vegetación circundante en pendientes superiores al 20%, lo que se traduce en barreras de 30-50 metros en laderas mediterráneas (Fernandes et al., 2013). Es decir, 2.5 se refiere a la relación ancho/altura (2,5:1) por lo que, si la vegetación alrededor del cortafuego tiene una altura promedio de 4 metros, el ancho mínimo del cortafuego debe ser de 10 metros. Por otro lado, una pendiente del 20% significa que el terreno se eleva 20 metros por cada 100 metros de distancia horizontal. Adicionalmente, la selección de especies con alta retención de humedad, como *Quercus ilex* o *Prunus lusitanica*, es fundamental, dado que sus hojas gruesas contribuyen a reducir la radiación transmitida (Vallejo et al., 2012).

En el caso de incendios dominados por el viento, donde el "spotting" (salto de chispas) representa un desafío considerable, la propuesta incluye una geometría en "V" invertida para los cortafuegos, con anchos que pueden variar de 50 a 100 metros en barlovento para disipar eficientemente el flujo eólico (Finney, 2006). Complementariamente, es clave una estratificación vegetal baja, con arbustos menores de 1.5 metros, para prevenir la formación de "escaleras de fuego" que facilitan la propagación vertical (Agee et al., 2000).

Para incendios con un fuerte componente convectivo, caracterizados por columnas de aire caliente que transportan pavesas a distancias significativas (Albini, 1979), las especificaciones de diseño demandan que los cortafuegos verdes superen la longitud potencial de "spotting". Albini (1979) sugiere anchos superiores a 100 metros, respaldados por modelos como FARSITE, y se ha documentado el uso de franjas de *Acacia spp.* de bajo contenido volátil en Australia (Duff et al., 2018). Asimismo, el mantenimiento intensivo mediante podas frecuentes es crucial para reducir la biomasa aérea y minimizar la convección local (Agee et al., 2000).

Un diseño efectivo de cortafuegos verdes integra un diagnóstico preciso del patrón de incendio local, empleando herramientas como el modelo de Rothermel (1972) para pendientes o FARSITE para "spotting"; una selección rigurosa de especies adaptadas que combinen bajo contenido volátil (e.g., *Lithraea caustica* en Chile) y alta humedad foliar (CONAF, 2020); y un monitoreo post-implantación continuo, con el uso de sensores de humedad en la vegetación (Duff et al., 2018) para ajustar el mantenimiento y asegurar la eficacia a largo plazo.

5. METODOLOGÍA

5.1 Metodología general

La metodología general utilizada corresponde a la Investigación Basada en Diseño (IBD) que se subdivide en cinco fases que relatan los procesos generales para la obtención del resultado.

Fase 1: Análisis del problema y del contexto:

Se realizó un diagnóstico técnico del comportamiento de incendios forestales en la zona de estudio identificando limitaciones en métodos tradicionales de contención y evaluando la factibilidad del uso de cortafuegos verdes. Esta fase incluyó revisión bibliográfica y análisis de datos históricos.

Fase 2: Diseño preliminar:

Con base en la literatura científica y criterios de la ingeniería se abordó un diseño preliminar de cortafuegos verdes. Este incluyó la selección de especies vegetales, espaciamiento, distribución y criterios técnicos.

Fase 3: Implementación del diseño:

Se procedió a implementar el diseño mediante simulaciones computacionales, en este caso, en el *software Prometheus*.

Fase 4: Evaluación del diseño:

Se evaluó el desempeño del diseño frente a variables críticas: eficiencia de la medida, el área total quemada en un tiempo determinado y el tiempo de retardo del avance del incendio. La recolección de datos incluyó métodos cuantitativos y cualitativos.

Fase 5: Generación de los principios de diseño (factores determinantes):

A partir de los resultados, se establecen principios técnicos y recomendaciones aplicables para el diseño de cortafuegos verdes en contextos similares, contribuyendo tanto a la práctica ingenieril como al desarrollo de conocimiento teórico.

5.2 Materiales

La presente sección aborda los materiales utilizados para la elaboración del estudio.

Software Prometheus

El software seleccionado para modelar la implementación de cortafuegos verdes y su efecto retardante en los incendios correspondió a *Prometheus*, el cual, según J. Peña (2024), mostró una mayor precisión en general, comparado con otros softwares como FlamMap y Cell2Fire.

El modelo utiliza datos heterogéneos de combustibles, topografía y condiciones meteorológicas para calcular resultados espacialmente explícitos sobre el comportamiento y la propagación del incendio. Para ello, es necesario ingresar esta información en un formato de grilla, donde cada celda contiene las variables asociadas a puntos geográficos específicos. A partir de los puntos de ignición, el modelo proyecta una elipse cuyas dimensiones varían según las características de la celda desde la cual se origina. Posteriormente, se genera una capa tangente a todas las elipses proyectadas, delineando así

el nuevo perímetro del incendio. Todos los resultados de salida son compatibles con sistemas de información geográfica, como QGIS o ArcGIS (Alberta, 2023).

Entre las potenciales aplicaciones de *Prometheus*, se describen:

- Previsión del crecimiento de los incendios forestales para la toma de decisiones operativas.
- Evaluación de la eficacia de estrategias alternativas de gestión del combustible.
- Planificación de quemas prescritas.
- Apoyo forense a las investigaciones de incendios forestales.
- Estudio del papel del fuego en el establecimiento y mantenimiento de patrones paisajísticos.
- Proporcionar estimaciones espaciales y temporales de las emisiones de humo.
- Examinar el impacto de los escenarios de cambio climático en la superficie quemada.
- Complementar los programas de formación y educación sobre comportamiento en caso de incendio.

Software QGIS

QGIS (Quantum GIS) es un software de código abierto para el análisis y gestión de información geoespacial. Permite visualizar, editar y analizar datos geográficos en diversos formatos, integrando herramientas avanzadas para la cartografía digital, el procesamiento de imágenes satelitales y la modelización espacial (QGIS, 2024.).

Entre las aplicaciones más relevantes de QGIS en el contexto de la modelación de cortafuegos, se incluyen:

- Integración y visualización de salidas de modelos de propagación de incendios.
- Análisis multicriterio para la selección óptima de especies vegetales o zonas de intervención.
- Delimitación y caracterización de áreas de riesgo.
- Diseño y planificación territorial con enfoque preventivo frente a incendios forestales.
- Generación de mapas temáticos para la comunicación de resultados a comunidades o autoridades.
- Apoyo en procesos de restauración ecológica post-incendio mediante análisis de cobertura y conectividad.

5.3 Métodos

En la presente sección se detalla la metodología empleada para cumplir cada objetivo y actividad propuesta. A fin de ofrecer una visualización de la metodología, la Figura 5.1 ilustra su diagrama de flujo.

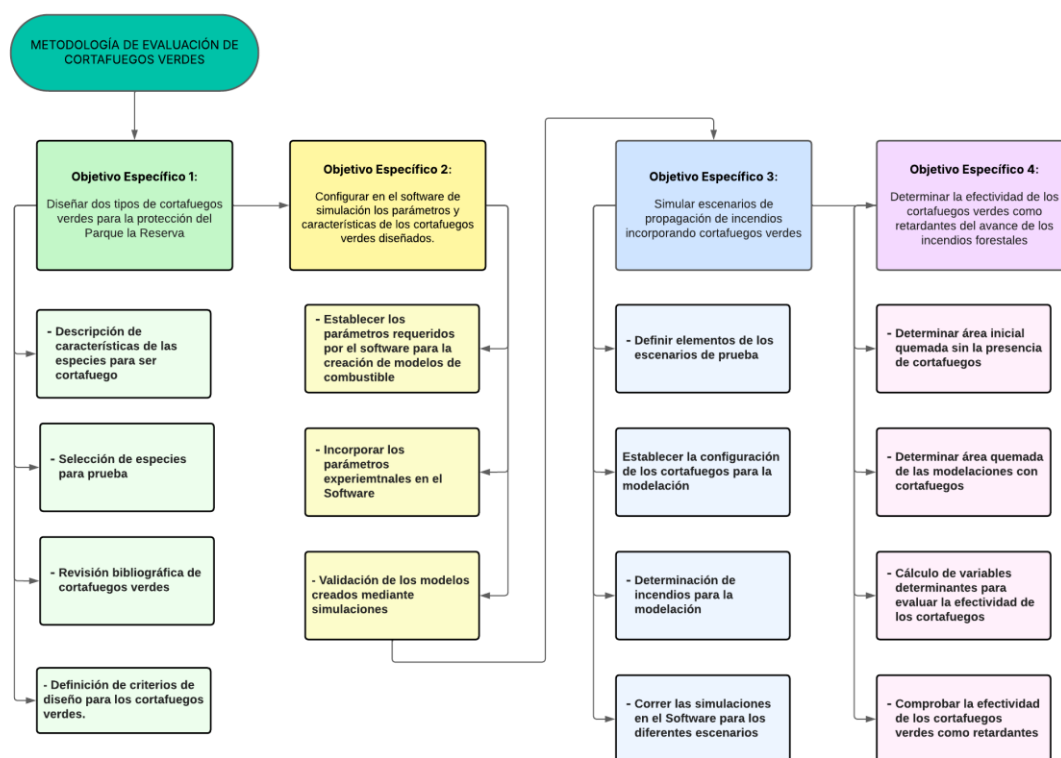


Figura 5.1: Esquema metodológico de los objetivos y actividades.

5.3.1 Metodología objetivo específico 1: Diseñar dos tipos de cortafuegos verdes para la protección del Parque la Reserva ubicado en Peñablanca

Para el cumplimiento del primer objetivo específico se realizaron cuatro actividades fundamentales. Inicialmente, se describieron las características de las especies para ser utilizadas como cortafuegos verdes mediante una revisión bibliográfica. Posteriormente, se seleccionaron las especies para prueba mediante la aplicación de un algoritmo de significancia. A continuación, se ejecutó una revisión bibliográfica especializada de cortafuegos verdes existentes. Finalmente, se definieron los criterios de diseño con base en la normativa vigente y las características del área de estudio. Dichas actividades se describen a continuación:

Actividad 1: Descripción de características de las especies para ser cortafuego verde

Para cumplir con el objetivo propuesto, se elaboró una tabla resumen que compila los resultados destacados de las características clave que deben poseer las especies vegetales para su implementación como cortafuegos verdes, detallando variables como el porcentaje de humedad y la inflamabilidad. Este proceso consideró:

- Se llevó a cabo una búsqueda bibliográfica en bases de datos científicas especializadas.
- Posteriormente, se identificaron y seleccionaron las publicaciones científicas más relevantes que abordaran las características de especies vegetales con resistencia al fuego.
- A continuación, se extrajeron y sistematizaron las características clave reportadas en la literatura consultada, priorizando variables críticas como el porcentaje de humedad foliar y los índices de inflamabilidad.

- Finalmente, se organizó la información recopilada en una tabla resumen que permitió clasificar las especies según su potencial capacidad para funcionar como cortafuegos verdes.

Actividad 2: Selección de especies para prueba

Análisis previo

Para llevar a cabo este análisis, se utilizó una base de datos vegetal elaborada por el Instituto de Ecología y Biodiversidad (IEB) de la Universidad de Concepción, la cual caracteriza un total de 4.166 especies vegetales presentes en el territorio nacional. A partir de esta información, se filtraron aquellas especies que se encuentran en la Región de Valparaíso y que pertenecen a familias suculentas o presentan hojas de tipo suculento.

Con los resultados obtenidos, se elaboró una tabla, en la cual se indica el origen de cada especie (nativa, endémica o adventicia), su estado de conservación y el rango altitudinal en el que es posible encontrarlas. Además, se incorporó una columna de observaciones en la que se señalan las razones por las cuales determinadas especies no se consideraron en la evaluación mediante el algoritmo de significancia que se describe más adelante en esta sección.

Entre los principales motivos de descarte se encuentra la altura óptima de desarrollo de algunas especies, la cual no coincide con la altitud registrada en el Parque La Reserva, lo que limitaría su adaptación y crecimiento adecuado en dicho entorno.

Otro criterio de exclusión corresponde al estado de conservación de las especies. En particular, aquellas clasificadas como vulnerables, amenazadas o en peligro no se consideraron debido a las dificultades asociadas a su obtención. Además, la Ley N°20.283 sobre Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal exige la elaboración de Planes de Manejo aprobados por CONAF para intervenir bosques que alberguen especies nativas en riesgo, lo que representa una restricción relevante para el uso futuro del Parque La Reserva y la exigencia normativa que deberá ser respetada.

Algoritmo de significancia para la selección de las especies vegetales

Se presentan los criterios utilizados para determinar la aplicabilidad de las especies vegetales estudiadas por cada característica, con el fin de incorporarlas en los prototipos de cortafuegos verdes.

1. Contenido de humedad: El contenido de humedad representa la adaptabilidad y resistencia de la planta en diferentes entornos. Este contenido se clasifica en tres rangos: alto, medio y bajo (Royal Horticultural Society, 2023). A continuación, en la Tabla 5.1 se presentan los criterios y su ponderación correspondiente.

Tabla 5.1: Criterios y ponderaciones del contenido de humedad.

Criterio	Ponderación
Alto: 60 % o más	3
Medio: 40 % - 60 %	2
Bajo: 40 % o menos.	1

2. Composición química interna de las hojas y la corteza: Se refiere a los diversos compuestos orgánicos presentes en los tejidos vegetales que pueden influir directa o indirectamente en la facilidad con la que una planta se incendia y propaga el fuego. Los componentes más relevantes son los

compuestos volátiles (Keeley et al., 2005; Murray & Hardstaff, 2018; Meteored, 2024; BioBioChile, 2024). A continuación, en la Tabla 5.2 se presentan los criterios y su ponderación correspondiente.

Tabla 5.2: Criterios y ponderaciones de la composición química interna de las hojas y corteza.

Criterio	Ponderación
Sin presencia de compuesto volátiles	3
Presencia de compuesto volátiles en corteza	2
Presencia de compuesto volátiles en hojas	2
Presencia de compuesto volátiles corteza y hojas	1

3. Desarrollo o edad de un individuo vegetal (tiempo de desarrollo): El tiempo de desarrollo de una planta se categoriza en niveles alto, medio o bajo, lo cual indica el periodo requerido para alcanzar su madurez completa (Hillel, 2004). La ponderación y los criterios asociados a esta evaluación se detallan en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Criterios y ponderaciones del tiempo de desarrollo.

Criterio	Ponderación
Bajo: Máximo desarrollo 5 - 15 años	3
Medio: Máximo desarrollo 15 - 25 años	2
Alto: Máximo desarrollo >25 años	1

4. Capacidad de regeneración post-incendio: Se refiere a la habilidad de ciertas especies vegetales para rebrotar o para germinar rápidamente a partir de semillas resistentes al fuego, una vez que el incendio ha pasado (Keeley et al., 2012; Pausas et al., 2004). La regeneración post-incendio se evaluará como alta, media o baja, dependiendo de la recuperación estructural, es decir, el tiempo que tarda la especie en recuperar su estado funcional. En la Tabla 5.4 se presentan los criterios y su ponderación.

- **Alta:** La población vegetal se recupera a un estado funcional (cobertura, biomasa) en un periodo de 1 a 3 años post-incendio.
- **Media:** La recuperación a un estado funcional toma un periodo de 3 a 7 años post-incendio.
- **Baja:** La población tarda más de 7 años en recuperarse, o la recuperación es incompleta, requiriendo intervención externa o procesos de sucesión a largo plazo.

Tabla 5.4: Criterios y ponderaciones de la capacidad de regeneración post-incendio.

Criterio	Ponderación
Alta: 1a 3 años	3
Media: entre 3 y 7 años	2
Baja: más de 7 años o sin recuperación.	1

5. Compatibilidad con el ecosistema local: Se refiere a la capacidad de una especie vegetal para integrarse y coexistir armónicamente con los procesos y componentes naturales de un entorno dado. Implica que dicha especie no cause alteraciones significativas o perjudiciales en el equilibrio biológico, físico y químico del ecosistema, sino que, idealmente, contribuya a su salud y funcionalidad a largo plazo (Pyšek et al., 2004). En la Tabla 5.5 se presentan los criterios y su ponderación.

- **Especie endémica:** Especie vegetal que solo se encuentra de forma natural en la región geográfica específica (Villa Alemana, Peñablanca, Valparaíso) y en ninguna otra parte del mundo.
- **Especie nativa:** Especie vegetal que forma parte del ecosistema de esa región, pero pueden existir en otros lugares también.
- **Especie adventicia:** Especie vegetal introducida accidentalmente en un territorio fuera de su área natural, pero se encuentra presente en el Parque la Reserva.

Tabla 5.5: Criterios y ponderaciones de la compatibilidad con el ecosistema.

Criterio	Ponderación
Especie endémica	3
Especie nativa	2
Especie adventicia	1

6. Mantenimiento (requerimiento hídrico): El requerimiento hídrico es una característica fundamental para el mantenimiento de las especies utilizadas en cortafuegos verdes. Se priorizan aquellas con bajas necesidades de agua, que sean tolerantes a la sequía y capaces de mantener su vitalidad con precipitaciones mínimas. El requerimiento hídrico se divide en alto, medio y bajo, reflejando la cantidad de agua que cada especie necesita para crecer adecuadamente (Allen et al., 1998). En la Tabla 5.6 se presentan los criterios y su ponderación.

Tabla 5.6: Criterios y ponderaciones del requerimiento hídrico.

Criterio	Ponderación
Bajo: 200 - 400 mm año-1	3
Medio: 400 - 800 mm año-1	2
Alto: 800 - 1200 mm año-1	1

Fórmula de significancia de las características para la aplicabilidad de las especies vegetales como cortafuegos verdes

Para la construcción de la fórmula de significancia, primero se establecieron las variables (características) que formaron parte de la fórmula y tomaron el valor de la ponderación del criterio. En la Tabla 5.7 se presenta la simbología referente a las características de las especies vegetales mencionadas con anterioridad, que forman parte de la fórmula de significancia.

Tabla 5.7: Simbología para la fórmula de significancia.

Característica	Simbología
Contenido de humedad	CH
Composición química interna de las hojas y la corteza	CQ
Tiempo de desarrollo	TD
Capacidad de regeneración post-incendio	CR
Compatibilidad con el ecosistema local	CE
Requerimiento hídrico	RH

Una vez definidas las características de las especies, se estableció el algoritmo de significancia, que asigna valores de relevancia a cada una para evaluar su aplicabilidad como cortafuego verde. Esta relevancia se clasificó en alta, media y baja, de la siguiente manera:

- **Alta relevancia:** Son aquellas características específicas del caso de estudio que son cruciales para el uso de ciertas especies como cortafuego verde.
- **Relevancia media:** Corresponden a las características fundamentales que toda especie debe poseer para ser considerada un cortafuego verde a nivel general.
- **Baja relevancia:** Incluyen las características recomendadas para las especies vegetales y su uso como cortafuego.

Los valores numéricos de esta relevancia se detallan en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8: Ponderación de la relevancia del algoritmo de significancia de las características para la aplicabilidad de las especies vegetales como cortafuegos verdes.

Relevancia	Ponderación
Alta	3
Media	2
Baja	1

A continuación, en la Tabla 5.9 se presenta la relevancia y ponderación por característica.

Tabla 5.9: Resumen de la simbología para el algoritmo de significancia, relevancia y ponderación.

Característica	Simbología	Relevancia	Ponderación
Contenido de humedad	CH	Media	2
Composición química interna de las hojas y la corteza	CQ	Media	2
Tiempo de desarrollo	TD	Baja	1
Capacidad de regeneración post-incendio	CR	Alta	3
Compatibilidad con el ecosistema local	CE	Alta	3
Requerimiento hídrico	RH	Baja	1

Luego de establecer la relevancia por característica de las especies, se construyó el algoritmo de significancia de las características para la aplicabilidad de las especies vegetales como cortafuegos verdes que se presenta en la Ecuación 5.1.

Ecuación 5.1: Algoritmo de significancia de las especies para su aplicabilidad como cortafuego.

$$2CH+2CQ+TD+3CR+3CE+RH$$

Los límites de la aplicabilidad de las especies vegetales evaluadas para ser cortafuegos se determinaron calculando los valores máximos y mínimos que puede tomar el algoritmo en base a los criterios de cada característica.

Valor máximo:

$$2CH+2CQ+TD+3CR+3CE+RH \Leftrightarrow 2 \cdot 3 + 2 \cdot 3 + 3 + 3 \cdot 3 + 3 \cdot 3 + 3 = 36$$

El valor máximo que se puede obtener en el algoritmo de significancia según sus criterios por característica es de 36 puntos.

Valor mínimo:

$$2CH+2CQ+TD+3CR+3CE+RH \Leftrightarrow \\ 2 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 1 + 3 \cdot 1 + 3 \cdot 1 + 1 = 12$$

El valor mínimo que se puede obtener en el algoritmo de significancia según sus criterios por característica es de 12 puntos.

Una vez establecidas las ponderaciones de las características para cada especie mediante una revisión bibliográfica, se seleccionó la especie que obtuvo el valor más alto dentro del modelo de significancia. Finalmente, y para cumplir con este primer objetivo, se diseñaron dos prototipos de cortafuegos aplicando criterios específicos adaptados al Parque La Reserva.

Actividad 3: Revisión bibliográfica de características y clasificaciones de los cortafuegos verdes

Posteriormente, se ejecutó una revisión bibliográfica que contempló el análisis de publicaciones científicas e informes técnicos relacionados con la implementación de cortafuegos verdes a nivel nacional e internacional. El proceso metodológico incluyó:

- Diseño de una tabla de análisis estructurada con cuatro categorías principales: Criterio de Clasificación, Tipo de Cortafuego Verde, Descripción y Función Principal, y Citas bibliográficas.
- Clasificación sistemática de la información encontrada según los diferentes criterios de clasificación reportados en la literatura técnica y científica.
- Descripción detallada para cada tipo de cortafuego verde de su función principal y características distintivas documentadas.
- Registro de las citas bibliográficas correspondientes para cada tipología identificada en la literatura consultada.

Actividad 4: Definición de criterios de diseño para los cortafuegos verdes

Finalmente, se establecieron los criterios de diseño mediante un procedimiento que integró tres componentes principales: el marco normativo vigente, el análisis de las condiciones específicas del área de estudio y los resultados de las investigaciones previas realizadas. Esta integración garantizó que los diseños propuestos cumplieran con los requerimientos técnicos y se adaptaran a las particularidades ecológicas del Parque La Reserva. El proceso consideró:

- Consulta a la normativa técnica vigente en materia de prevención de incendios forestales, con especial atención a los requisitos de anchura mínima de 10 metros y la disposición de franjas cortacombustibles adyacentes.
- Se analizaron los datos históricos de comportamiento de incendios forestales en la región, proporcionados por la Corporación Nacional Forestal (CONAF).
- Se caracterizaron las condiciones ambientales específicas del Parque La Reserva, considerando variables topográficas, regímenes de viento predominantes y composición de la vegetación circundante.
- Se integraron los criterios normativos con los hallazgos de la revisión bibliográfica y las propiedades de las especies seleccionadas.

- Se establecieron los parámetros técnicos definitivos para ambas configuraciones de cortafuegos verdes.

5.3.2 Metodología objetivo específico 2: Configurar en el software de simulación los parámetros y características de los cortafuegos verdes diseñados

Para el cumplimiento del segundo objetivo específico se realizaron tres actividades fundamentales. Inicialmente, se establecieron los parámetros necesarios para la generación de los modelos de combustible en *Prometheus*. Posteriormente, se integraron los parámetros obtenidos en el software. Finalmente, se procedió a la validación de la precisión de los modelos mediante la realización de simulaciones. Dichas actividades se describen a continuación:

Actividad 1: Establecer los parámetros requeridos por el software para la creación de modelos de combustible

En primer lugar, se identificaron y sistematizaron los parámetros que el *software Prometheus* permite modificar para la creación de modelos de combustible personalizados. Este proceso consideró:

- La revisión de la documentación técnica del FBP System (Forestry Canada Fire Danger Group, 1992; Tymstra et al., 2010).
- La consulta directa a los desarrolladores de *Prometheus* respecto a la selección del modelo base más representativo para especies suculentas.
- Ajuste de parámetros estructurales y fisiológicos, en función de la morfología y ecofisiología de las especies modeladas:
- Tree Height (TH): Por medio de información bibliográfica disponible se estableció la altura de las especies vegetales.
- Crown Fuel Load (CFL): Se estableció un valor adecuado a partir de bibliografía disponible. Para las especies que carecen de esta característica, el valor correspondiente es cero. No obstante, para evitar errores matemáticos en el sistema FBP, se asignó un valor marginalmente superior a cero.
- Crown Base Height (CBH): Su valor se estableció para evitar la activación incorrecta del módulo de fuego de copa en especies que carecen de este estrato (CFL \approx 0). Utilizar la altura real introduciría un error en la simulación, ya que el modelo predeciría una transición al dosel que es ecológicamente incorrecto. Para evitar este comportamiento, se asignó un valor de CBH artificialmente alto. Esta solución impide que el algoritmo active la rutina de fuego de copa, haciendo que el fuego se comporte de manera exclusivamente superficial.
- La construcción de una tabla comparativa donde se especificaron los parámetros originales del modelo seleccionado, junto con los valores ajustados a las características morfológicas y ecofisiológicas de *Echinopsis chiloensis*.

El procedimiento aplicado corresponde a una estrategia de modelación por analogía, en la cual se adapta un modelo empírico preexistente a especies no incluidas en el FBP System, mediante ajustes sustentados en su arquitectura vegetal y ecofisiología. Esta aproximación es consistente con las recomendaciones de Alexander & Cruz (2013) para el modelamiento de combustibles no tradicionales en ausencia de datos experimentales de propagación.

Actividad 2: Incorporación de los parámetros obtenidos en el Software

Para la incorporación de los parámetros, primeramente, se realizó la instalación del programa y sus complementos para asegurar su correcto funcionamiento.

- Instalación del *software Prometheus* (Prometheus_2023.06.01_EOL.exe).
- Instalación de Java Platform SE binary (Versión: 8.0.4610.11).
- Instalación de QGIS (QGIS Desktop 3.40.10).
- Instalación Fire Analytics Toolbox (complemento de QGIS).

Como segunda actividad, tras la instalación, se mantuvieron reuniones con especialistas en modelación de incendios forestales para garantizar el correcto uso del *software Prometheus*.

En tercer lugar, se realizó la incorporación de las capas con información que requiere el software, esto involucró la recopilación, procesamiento y preparación de datos espaciales y meteorológicos. El procedimiento se detalla a continuación:

- **Adquisición y preparación de datos espaciales:** La capa de topografía se descargó desde la plataforma de Infraestructura de Datos Geoespaciales (IDE Chile) y luego fue incorporada al software QGIS. De forma paralela, se obtuvo desde la misma fuente la capa de cobertura vegetal, la cual también fue integrada al entorno de QGIS para luego descargar un archivo con la información de esta capa en formato Excel. Este archivo se utilizó para asignar a cada polígono de la capa vegetacional un modelo de combustible estandarizado, reconocido por el *software Prometheus*. Este paso fue fundamental para que el programa identificara correctamente las características de combustibilidad de cada unidad una vez cargada la capa.
- **Delimitación y ajuste del área de estudio:** Posteriormente, mediante la utilización del complemento Fire Analytics Toolbox (FAT) dentro de QGIS, se procedió a recortar y ajustar las capas de topografía y vegetación para delimitar el área de interés correspondiente al Parque La Reserva. Este proceso garantizó la alineación espacial de ambas capas y su correcta georreferenciación, asegurando una lectura precisa por parte del motor de cálculo de *Prometheus*.
- **Procesamiento de datos meteorológicos:** Se descargaron los datos meteorológicos históricos de la estación más cercana al área de estudio (la cual correspondió a una ubicada en Limache) desde los registros de la Dirección Meteorológica de Chile. Esta información fue procesada y consolidada en un único archivo en formato Excel, estructurado de acuerdo con los requisitos de entrada del *software Prometheus* para asegurar su compatibilidad.
- **Definición de los puntos de ignición:** Finalmente, se definieron y georreferenciaron los puntos de ignición dentro del proyecto en QGIS. Estos puntos vectoriales fueron exportados y posteriormente cargados en el *software Prometheus* para su utilización como escenarios de inicio en las simulaciones de propagación de incendios.

Una vez completada la preparación de la simulación a través de los pasos anteriores, se procedió a la fase de validación del modelo de combustible modificado para la *Echinopsis chilensis*.

Actividad 3: Validación de los modelos creados mediante simulaciones

Para la validación del modelo de combustible se utilizó la información de un incendio ocurrido en el Parque La Reserva, donde se encontraba la especie *Echinopsis chiloensis* (modelo a poner a prueba). El objetivo fue ajustar el modelo para reproducir el comportamiento del incendio registrado el 17 de marzo de 2018 en el parque y, de este modo, validar que el comportamiento de la quema del modelo ajustado es consecuente con lo observado en la realidad. A continuación, se describen los pasos realizados para la validación del modelo:

- **Recopilación de datos históricos de incendios ocurridos en la zona:** Se solicitó a CONAF el histórico de incendios ocurridos en el Parque la Reserva. Dicha información contiene los polígonos de los incendios ocurridos en la zona y puntos que representan los focos de los incendios con la información (fecha y hora) sobre su comienzo y extinción.
- **Incorporación de los puntos de ignición:** En QGIS se establecieron los puntos de ignición que generaron el incendio a modelar establecidos en las bases de datos de CONAF y se incorporaron en el *Software Prometheus*.
- **Incorporación de las capas de información:** Esto se refiere al ingreso de los datos topográficos, vegetacionales y meteorológicos procesados con anterioridad al *Software Prometheus* donde fueron utilizados los datos del día del siniestro.
- **Modificación de parámetros del modelo D-2:** Se modificaron dentro del software los parámetros establecidos por la revisión bibliográfica para asemejar el comportamiento del modelo de combustible al de la *Echinopsis chiloensis*.
- **Simulación de prueba 1:** Se realizó una simulación del incendio con el modelo D-2 de combustible ajustado para las capas representadas de *Echinopsis chiloensis*.
- **Ajuste del modelo de combustible:** Posterior a la simulación de prueba, se modificaron los parámetros que afectaban el comportamiento del modelo de combustible, como la limitante del BUI (BUI > 80 para iniciar el consumo del combustible) para el caso del modelo de combustible D-2.
- **Modificación de parámetros del modelo D-1:** Se modificaron dentro del software los parámetros establecidos por la revisión bibliográfica para asemejar el comportamiento del modelo de combustible al de la *Echinopsis chiloensis*, sin la limitante del BUI, condicionante exclusiva del modelo D-2.
- **Simulación de prueba 2:** Se realizó una simulación del incendio con el modelo D-1 de combustible ajustado para las capas representadas de *Echinopsis chiloensis*.
- **Modificación de parámetros del modelo D-2:** Se modificaron dentro del software los parámetros establecidos por la revisión bibliográfica para asemejar el comportamiento del modelo de combustible al de la *Echinopsis chiloensis*, como en la primera simulación. En este caso, incluyendo un segundo punto de ignición para emular la acción de contención de bomberos y el comportamiento real del incendio registrado, con un tiempo de activación que consideró un estimado de llegada y actuación de los equipos de aproximadamente dos horas.
- **Simulación de prueba 3:** Se realizó una simulación del incendio con el modelo D-2 de combustible ajustado para las capas representadas de *Echinopsis chiloensis*, incluyendo dos puntos de ignición.
- **Modificación de parámetros del modelo D-1:** Dentro del software se ajustaron los parámetros definidos a partir de la revisión bibliográfica, con el propósito de asemejar el comportamiento

del modelo de combustible al de *Echinopsis chiloensis*. Esta modificación se realizó sin considerar la limitante del BUI del modelo D-2. En este caso, se incluyó un segundo punto de ignición al igual que en la simulación 3.

- **Simulación de prueba 4:** Se realizó una simulación del incendio con ambos puntos de ignición y el modelo D-1 de combustible ajustado para las capas representadas de *Echinopsis chiloensis*.
- **Validación del modelo:** Una vez realizada la simulación, se compararon los polígonos del incendio real con el polígono de la simulación. Para determinar la precisión de las simulaciones se calculó el índice F1-Score (Puntuación-F1), el cual fue implementado según la adaptación de Carrasco et al. (2023). El índice F_1 sintetiza métricas de acierto (área correctamente representada) y error (áreas omitidas y comisionadas) en un único valor, calculado conforme a la Ecuación 5.2.

Ecuación 5.2: Cálculo del índice F1-Score.

$$F1 = \frac{TP}{TP+0.5 \cdot (FP+FN)}$$

Donde:

- F1, corresponde a al valor de precisión de la Puntuación-F1.
- TP, corresponde al área interior (en hectáreas) del perímetro del incendio representada correctamente por el resultado de la simulación (Positivos verdaderos).
- FP, corresponde al área (en hectáreas) que el resultado del modelo consideró como afectada cuando en la realidad no lo fue (Falsos positivos).
- FN, corresponde al área (en hectáreas) que el modelo consideró como no afectada cuando en la realidad sí lo fue (Falsos negativos).

Los valores del índice F_1 oscilan entre 0 y 1, donde 1 corresponde a una precisión del 100 %. Las variables TP, FP y FN fueron calculadas mediante las herramientas de geoprocésamiento “Intersección” y “Diferencia” del software QGIS. La simulación que presente un valor de F-1 más cercano a 1 será el escenario seleccionado. Sin embargo, el valor de precisión establecido como adecuado, corresponde a valores de F-1 iguales o superiores a 0,70 o 70% de precisión (DataCamp, 2025).

5.3.3 Metodología objetivo específico 3: Simular escenarios de propagación de incendios incorporando cortafuegos verdes

Para el cumplimiento del tercer objetivo se desarrollaron cuatro actividades principales. En primer lugar, se definieron los escenarios de prueba; posteriormente, se estableció la configuración de los cortafuegos. Luego, se determinaron las condiciones de los incendios para la modelación y, finalmente, se llevó a cabo la simulación en el *software Prometheus*.

Actividad 1: Definir elementos de los escenarios de prueba

Primeramente, se definieron los elementos que formaron parte de la modelación como la topografía (la zona de estudio para la simulación), vegetación (presente en la zona), información meteorológica (velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad y precipitaciones del día a modelar), entre otros. Para este proceso se considera la base normativa y técnica del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) en donde se exige que los estudios ambientales se realicen en épocas contrastadas, con la

finalidad de evaluar los límites ambientales con la presencia de los cortafuegos verdes. Una vez que se haya definido y obtenido toda la información lo siguiente corresponde a crear los escenarios en *Prometheus*. Esto se realizará de acuerdo con lo mencionado en el informe técnico de Peña, J (2024) sobre “Modelación de incendios con el *software Prometheus*”, donde se detallan los pasos para crear escenarios con diversas capas de información.

Seguido a esto, se ingresaron los diseños de cortafuegos verdes creados al *software* de acuerdo con la metodología presentada en el informe técnico “Modelación de incendios forestales con incorporación de cortafuegos verdes” Toro-Moreno (2025), donde se explica como incorporar capas vegetacionales como cortafuegos verdes dentro del programa.

Para la selección del conjunto de datos meteorológicos se consideraron los siguientes criterios:

- **Completitud y calidad de los datos:** El software requiere disponer de un conjunto mensual de datos meteorológicos sin vacíos para ejecutar las simulaciones. Por ello, se realizó un proceso de revisión e interpolación de los registros incompletos, excluyendo de las pruebas aquellos días que presentaban valores ausentes o inconsistentes.
- **Representatividad de las condiciones meteorológicas:** Con el objetivo de analizar el comportamiento de los cortafuegos verdes bajo condiciones contrastantes, se seleccionaron dos escenarios: uno estival y otro invernal. Para cada caso, se priorizaron los días con condiciones más representativas del riesgo de incendio, considerando variables críticas como temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento.
- **Criterio de selección para el escenario estival:** Dentro del periodo comprendido entre 2019 y 2025, se identificaron los días con temperaturas máximas más elevadas, velocidades de viento más altas y menor humedad relativa, buscando representar condiciones extremas y de mayor potencial de propagación de incendios. La elección de este día no tuvo un carácter aleatorio, sino que respondió a la intención de modelar un escenario crítico y conservador desde el punto de vista del riesgo de fuego.

Actividad 2: Establecer la configuración de los cortafuegos para la modelación

Por otra parte, para establecer la configuración de los cortafuegos verdes utilizados en la modelación, se realizó una consulta directa con la Dirección Ambiental Municipal (DAM) de Villa Alemana, con el propósito de determinar la sección de terreno que se busca proteger mediante la implementación de los cortafuegos, de acuerdo con las recomendaciones de CONAF.

Para ello, se formularon tres preguntas fundamentales orientadas a definir el área a proteger dentro del sector de estudio:

- ¿Qué se desea proteger?
- ¿Qué se puede permitir perder?
- ¿Qué no se puede permitir perder?

Adicional a esto, se creó una tabla donde se presentaron los diseños de cortafuegos a evaluar en las simulaciones.

Actividad 3: Determinación de incendios para la modelación

Lo siguiente, corresponde a determinar el tipo de incendio que será modelado en Parque la Reserva, de acuerdo con el registro histórico de los incendios más frecuentes en la zona, con la finalidad de establecer los puntos de ignición para la modelación.

Para la selección de los puntos de ignición, se consideraron cuatro criterios fundamentales:

- Ubicación de las zonas con mayor probabilidad de ocurrencia de incendios (zona de interfaz urbano-forestal).
- Zona con mayor registro histórico de incendios forestales según la información proporcionada por CONAF.
- Distancia respecto al cortafuego (punto cercano y punto lejano).
- Configuración geométrica de la franja libre de vegetación (sección recta y sección curva).

Actividad 4: Ejecutar las simulaciones en el Software para los diferentes escenarios.

Se realizaron simulaciones de propagación de incendios mediante el *software Prometheus*, evaluando las configuraciones de cortafuegos verdes previamente establecidas. El diseño experimental consideró cuatro puntos de ignición (P1, P2, P3, P4), dos diseños de cortafuegos (Diseño A y Diseño B), dos espesores de cortafuegos (10 m y 20 m) y dos temporadas climáticas (verano e invierno).

La matriz de simulaciones se estructuró de la siguiente manera:

Temporada de Verano:

- Diseño A - 10 m: P1, P2, P3, P4
- Diseño A - 20 m: P1, P2, P3, P4
- Diseño B - 10 m: P1, P2, P3, P4
- Diseño B - 20 m: P1, P2, P3, P4

Temporada de Invierno:

- Diseño A - 10 m: P1, P2, P3, P4
- Diseño A - 20 m: P1, P2, P3, P4
- Diseño B - 10 m: P1, P2, P3, P4
- Diseño B - 20 m: P1, P2, P3, P4

El total de 32 simulaciones permitió analizar de manera comparativa la eficiencia y el desempeño de los cortafuegos verdes ante distintos escenarios de ignición, geometría y condiciones climáticas, asegurando una evaluación integral de su comportamiento frente al fuego.

5.3.4 Metodología objetivo específico 4: Determinar la efectividad de los cortafuegos verdes como retardantes del avance de los incendios forestales

Para el cumplimiento del cuarto objetivo se desarrollaron cuatro actividades fundamentales. En primer lugar, se determinó el área inicial quemada sin la presencia de cortafuegos; posteriormente, se estableció el área quemada de las modelaciones con cortafuegos. Luego, se calcularon las variables

determinantes para evaluar la efectividad de los cortafuegos y, finalmente, se comprobó la efectividad de los cortafuegos verdes como retardantes.

Para lo anterior se realizó un análisis comparativo de las variables de comportamiento del fuego. Este método se basa en comparar variables claves obtenidas en las simulaciones de cada diseño modelado. Las variables incluyen:

- Área quemada total en metros cuadrados.
- Tiempo de retardo del avance del incendio (minutos).

Procedimiento:

- Se modelan los diferentes escenarios de cortafuegos verdes en el software (ej. diseño A y diseño B).
- Se mantienen constantes las condiciones ambientales (viento, humedad, topografía, etc.) para las simulaciones en cada estacionalidad (condiciones en verano y condiciones en invierno).
- Se registran los resultados para cada variable mencionada.
- Se comparan los valores obtenidos para determinar cuál diseño es más eficaz, para esto, se cuantifico numéricamente cuánto mejor es un diseño respecto a otro en cada variable, dando una idea clara de la magnitud de su eficacia.

Actividad 1: Determinar área inicial quemada sin la presencia de cortafuegos

Para determinar el área inicial quemada (incendio control), se calculó el área del polígono correspondiente utilizando el software QGIS. La variable tiempo considerada varía según la estacionalidad: en la temporada estival se emplea un intervalo de 3 horas, mientras que en la temporada invernal se utilizó un intervalo de 6 horas.

El siguiente procedimiento se aplicó para cada punto de ignición, con el objetivo de calcular el área correspondiente a cada incendio control:

- La simulación del incendio control se exporta y guarda en formato SHP.
- El archivo SHP se carga en el software QGIS.
- Se accede a la tabla de atributos de la capa correspondiente y se activa el modo de edición.
- A continuación, se abre la calculadora de campos y se utiliza la función “\$area” para calcular el valor del polígono en metros cuadrados, obteniendo así el área inicial quemada.
- Finalmente, se organizan los resultados en tablas.

Actividad 2: Determinar área quemada de las modelaciones con cortafuegos

Para determinar el área quemada de cada modelación con la presencia de cortafuegos, se realizó el mismo procedimiento descrito para la determinación de las áreas en los incendios control.

- Se exporta y guarda en formato SHP la simulación realizada.
- El archivo SHP se carga en el software QGIS.
- Se accede a la tabla de atributos de la capa correspondiente y se activa el modo de edición.
- A continuación, se abre la calculadora de campos y se utiliza la función “\$area” para calcular el valor del polígono en metros cuadrados, obteniendo así el área inicial quemada.

- Se organizan los resultados en tablas. La simbología utilizada en este caso para identificar los diseños y puntos de ignición se estructura de la siguiente manera: DA corresponde al Diseño A y DB al Diseño B; posteriormente se indica el espesor (10 o 20 metros) y, finalmente, el punto de ignición (P1, P2, P3 o P4).

Actividad 3: Cálculo de variables determinantes para evaluar la efectividad de los cortafuegos

Para realizar el cálculo de las variables determinantes para evaluar la efectividad de los cortafuegos verdes, se calcula la eficiencia de los diseños, el área sin afectación con el uso de los cortafuegos verdes y finalmente el tiempo de retardo proporcionado por el uso de estos.

Cálculo de eficiencia de reducción del área quemada

Primeramente, para el cálculo de la eficiencia se utiliza la Ecuación 5.3 presentada a continuación:

Ecuación 5.3: Calculo de la eficiencia de los diseños de cortafuegos.

$$Eficiencia (\%) = \frac{A_{control} - A_{corta\ fuego}}{A_{control}} \cdot 100\%$$

Donde:

- $A_{control}$, corresponde al área quemada en la simulación sin cortafuego (incendio control) en metros cuadrados.
- $A_{corta\ fuego}$, corresponde al área quemada en la simulación con cortafuego en metros cuadrados.

La eficiencia del diseño puede expresarse como el porcentaje de reducción del área quemada respecto al incendio control y se interpreta de la siguiente manera:

- Si la eficiencia es alta, el cortafuego fue más efectivo en reducir la superficie quemada.
- Si la eficiencia es baja o negativa, el cortafuego fue poco efectivo o incluso contraproducente.

En la Tabla 5.10 se presentan la clasificación de los rangos de valores de eficiencia de reducción del área quemada.

Tabla 5.10: Clasificación de rangos de eficiencia.

Eficiencia (%)	Interpretación
>80%	Alta eficiencia: la mayoría del área que se quería proteger se preserva gracias al cortafuego.
60% - 80%	Eficiencia moderada: el cortafuego protege parcialmente el área, con pérdidas significativas.
<60%	Baja eficiencia: el cortafuego apenas reduce la propagación; gran parte del área se quema.

Cálculo del área sin afectación con el uso de cortafuegos verdes

El siguiente paso consistió en calcular la eficacia de cada cortafuego en términos del área que logró proteger del incendio para cada simulación. Para ello, se utilizó la Ecuación 5.4 descrita a continuación:

Ecuación 5.4: Área sin afectación del incendio.

$$A_{sa} = A_{control} - A_{cortafuego}$$

Donde:

- A_{sa} , corresponde al área sin afectación en metros cuadrados (área no quemada por el incendio).
- $A_{control}$, área quemada en la simulación sin cortafuego (incendio control) en metros cuadrados.
- $A_{cortafuego}$, área quemada en la simulación con cortafuego en metros cuadrados.

Posteriormente, se estimó el promedio del área sin afectación para las diferentes configuraciones de diseño y espesor de los cortafuegos verdes. La matriz de resultado se expresó de la siguiente manera:

- DA10 - Diseño A de espesor de 10 m.
- DA20 - Diseño A de espesor de 20 m.
- DB10 - Diseño B de espesor de 10 m.
- DB20 - Diseño B de espesor de 20 m.

Cálculo del Tiempo de retardo de los diseños de cortafuegos verdes

Finalmente, el tiempo de retardo se calculó con la Ecuación 5.5 descrita a continuación:

Ecuación 5.5: Tiempo de retardo de los diseños de cortafuegos verdes.

$$Tr = (hora_{cf} * 60 + min_{cf}) - (hora_c * 60 + min_c)$$

Donde:

- Tr , corresponde al tiempo de retardo en minutos.
- $Hora (cf)$, corresponde a la hora de término incendio con cortafuego, en formato 24 horas (sin incluir los minutos). Ejemplo: 19:40 se ingresa el valor 19.
- $Min (cf)$, corresponde a los minutos de la hora de término incendio con cortafuego. Ejemplo: 19:40 se ingresa el valor 40.
- $Hora (c)$, corresponde a la hora de término incendio control, en formato 24 horas (sin incluir los minutos).
- $Min (c)$, corresponde a los minutos de la hora de término incendio control.

6. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en relación con el primer objetivo específico, detallando las actividades desglosadas que permitieron su consecución.

6.1 Diseño de dos tipos de cortafuegos verdes para la protección del Parque la Reserva

En la siguiente sección se presentan los resultados que permitieron definir el diseño de dos prototipos de cortafuegos verdes destinados a la protección del Parque La Reserva. Asimismo, se describen las actividades desarrolladas para su ejecución.

6.1.1 Descripción de características de las especies para utilizar como cortafuegos verdes

La Tabla 6.1 sintetiza las características consideradas para la selección de las especies utilizadas en los prototipos de cortafuegos verdes simulados.

Tabla 6.1: Resumen de la descripción de características de las especies para ser cortafuegos verdes.

Características Clave	Descripción y Rol en Cortafuegos Verdes	Impacto en la Inflamabilidad / Relevancia	Citas
Contenido de Humedad	Nivel de agua en tejidos. Actúa como un potente retardante natural de la combustión. Las especies que mantienen un elevado porcentaje de agua son menos susceptibles a la ignición y propagación.	Disminuye significativamente la ignición y propagación. Requiere una cantidad sustancial de energía calórica para evaporarse antes de la pirólisis y combustión.	Doran et al., 2004; Ganteaume et al., 2013; Face2fire, s.f.; White & Zipperer, 1998; Batista et al., 2012; Papanastasis et al., 2005
Composición Química Interna	Presencia de compuestos volátiles (aceites esenciales, resinas, terpenos) en hojas y corteza.	Bajas concentraciones de volátiles disminuyen la propensión a la propagación del fuego. Altas concentraciones actúan como acelerantes.	Keeley et al., 2005; Murray & Hardstaff, 2018; Batista et al., 2012
Etapa de Desarrollo /Edad	La inflamabilidad no es estática, evoluciona a lo largo del ciclo de vida de la planta debido a cambios continuos en sus características físicas, fisiológicas y químicas.	-Plántulas/ Jóvenes: Alta inflamabilidad. -Madurez: Inflamabilidad variable. -Senescencia: Alta inflamabilidad.	Pausas, 2012; Prometheus Protocols, s.f.
Capacidad de Regeneración Post-Incendio	Habilidad de ciertas especies para rebrotar desde su base o germinar rápidamente a partir de semillas resistentes al fuego una vez que el incendio ha pasado.	No reduce la inflamabilidad directa, pero es fundamental para la resiliencia del ecosistema y la rápida recuperación de la cobertura vegetal, manteniendo la funcionalidad a largo plazo del cortafuego.	Keeley et al., 2012; Pausas et al., 2004; Moreira et al., 2012
Compatibilidad con el Ecosistema Local	Importancia de utilizar especies vegetales autóctonas o nativas. Estas están naturalmente adaptadas a las condiciones climáticas, edáficas y biológicas específicas de la región.	Confiere mayor resistencia a sequías, enfermedades y plagas locales, lo que se traduce en mayor éxito de establecimiento y menor necesidad de insumos. Contribuye a la conservación de la biodiversidad.	Keeley, 2006; Pyšek et al., 2004

Mantenimiento (Requerimiento Hídrico)	Preferencia por especies que requieran bajo mantenimiento (menos poda, eliminación de hojarasca /material muerto, menor dependencia de riego una vez establecidas).	Un bajo requerimiento de mantenimiento optimiza recursos y costos, asegurando la sostenibilidad y efectividad a largo plazo de la barrera vegetal. Incluye especies tolerantes a la sequía.	Arbor Valley Nursery, 2024; Valenzuela, 2018; Agee et al., 2005; Royal Horticultural Society, 2023
---------------------------------------	---	---	--

6.1.2 Selección de especies para prueba

En el presente apartado se llevó a cabo la selección de especies para las pruebas. El proceso comenzó con un análisis preliminar que clasificó especies vegetales de la región de Valparaíso, pertenecientes al hábito de suculentas o con hojas de tipo suculento. La Tabla 6.2 presenta dicha categorización (Anexo 1 – Especies vegetales).

Tabla 6.2: Características de las especies potenciales para ser evaluadas en el modelo de significancia.

Especies Región de Valparaíso	Hábito	Origen	Estado de conservación	Altura habitada (m)	Observaciones	Aplicabilidad
<i>Cumulopuntia sphaerica</i>	Suculenta	Nativa	Preocupación menor (LC)	0-3500		Aplica
<i>Echinopsis chiloensis</i>	Suculenta	Endémica	Casi Amenazada (NT)	0-1700		Aplica
<i>Eriosyce aurata</i>	Suculenta	Endémica	S/I	1500-2500	Debido a la altura para su desarrollo, no se considera.	No aplica
<i>Eriosyce chilensis</i>	Suculenta	Endémica	En peligro (EN)	0-100	Debido a su estado de conservación, no se considera.	No aplica
<i>Eriosyce curvispina</i>	Suculenta	Endémica	S/I	200-2000		Aplica
<i>Eriosyce engleri</i>	Suculenta	Endémica	S/I	0-1900		Aplica
<i>Eriosyce garaventa</i>	Suculenta	Endémica	S/I	1000-3000	Debido a la altura para su desarrollo, no se considera.	No aplica
<i>Eriosyce subgibbosa</i>	Suculenta	Endémica	Vulnerable (VU)	0-500	Debido a su estado de conservación, no se considera.	No aplica
<i>Eulychnia castanea Phil.</i>	Suculenta	Endémica	Casi amenazada (NT)	0-200		Aplica
<i>Maihueniopsis ovata</i>	Suculenta	Nativa	Casi Amenazada (NT)	1000-2000	Debido a la altura para su desarrollo, no se considera.	No aplica
<i>Carpobrotus chilensis</i>	Hierba	Nativa	No evaluado (NE)	0-500		Aplica

Lo siguiente corresponde a la recopilación de información de las especies seleccionadas en el análisis previo con la información de las características definidas para el algoritmo de significancia. En la Tabla 6.3 se presentan las especies junto con las características y sus respectivas citas.

Tabla 6.3: Información recopilada de las características por especies.

Especies	Características	Citas relevantes
<i>Cumulopuntia sphaerica</i>	CH: Las cactáceas suculentas almacenan agua en sus tejidos, pero su contenido de humedad en estado natural (sin estrés hídrico) rara vez supera el 40 % en peso seco. Estudios en <i>Opuntia</i> (género cercano) reportan valores entre 20-35 % en tallos maduros.	Le Houérou, H. N. (1996). [‡]
	CQ: Las cactáceas del género <i>Cumulopuntia</i> no producen resinas, aceites esenciales u otros volátiles inflamables. Su defensa se basa en metabolitos secundarios no volátiles (ej. alcaloides).	Griffiths, D. (1916). <i>The genus Opuntia</i> . Carnegie Institution.
	TD: Es una especie de crecimiento lento, típico de cactáceas adaptadas a estrés hídrico. Puede tardar varios años en alcanzar su tamaño completo (alrededor de 10-15 años).	Anderson, E. F. (2001). <i>The Cactus Family</i> . Timber Press.
	CR: No hay evidencia de rebrote post-incendio en esta especie. Su regeneración depende de semillas, pero su lento crecimiento retrasa la recuperación del individuo.	Reyes-Olivas, A., Sánchez-Soto, B. H., & García-Moya, E. (2002).
	CE: Nativa.	Rodríguez, R., C. (et al). (2018).
	RH: Especie adaptada a ambientes áridos con precipitaciones mínimas. Sobrevive con menos de 200 mm anuales, pero su crecimiento óptimo requiere hasta 400 (mm/año).	Le Houérou, H. N. (1996).
<i>Echinopsis chiloensis</i>	CH: Medio (40-60%) en temporada húmeda, pero puede caer a Bajo (<40%) en sequía extrema. Almacena agua en tallos suculentos, pero su humedad varía estacionalmente.	Squeo, F. A., Aravena, R., Aguirre, E., Pollastri, A., Jorquera, C. B., & Ehleringer, J. R. (2006).
	CQ: Sin presencia significativa en hojas/corteza. las cactáceas no producen aceites inflamables como especies resiníferas.	Loayza, A. P., Carvajal, D. E., & García-Guzmán, P. (2015).
	TD: Medio, alcanza madurez reproductiva en ~5-7 años. Cactácea columnar de crecimiento moderado para su tipo.	Guerrero, P. C., Bustamante, R. O., & Durán, A. P. (2011).
	CR: Baja, no rebrota. Depende de semillas, que pueden germinar si el fuego no las destruye.	Gómez-González, S., Torres-Díaz, C., Bustos-Schindler, C., & Gianoli, E. (2018).
	CE: Endémica.	Rodríguez, R., C. (et al). (2018).
	RH: Bajo (200-400 mm/año). Tolera sequías prolongadas debido a su metabolismo CAM (metabolismo ácido de las crasuláceas).	Luebert, F., & Pliscoff, P. (2017). <i>Bioclimatología de Chile</i> (2ª ed.). Ediciones UC.
<i>Eriogyne curvispina</i>	CH: Medio (40-60%) en temporadas húmedas, pero puede descender a Bajo (<30%) en sequías prolongadas debido a su adaptación xerofítica. Esta especie almacena agua en su tallo suculento y tiene una cutícula gruesa que reduce la pérdida hídrica. Estudios en cactáceas del género <i>Eriogyne</i> muestran que su humedad interna fluctúa según la estacionalidad.	Nobel, P. S. (2003). <i>Environmental biology of agaves and cacti</i> . Cambridge University Press.
	CQ: Sin presencia significativa en tejidos. A diferencia de plantas resiníferas (ej. pinos), <i>E. curvispina</i> no produce aceites inflamables. Sin embargo, contiene alcaloides y metabolitos secundarios (como betaínas) que podrían actuar como retardantes naturales del fuego.	Martínez-Harms, J., González-Teuber, M., & Vásquez, R. A. (2018).

<i>Eriosyce curvispina</i>	TD: Alto, 7-10 años para alcanzar madurez reproductiva. Es una especie de crecimiento lento, típico de cactáceas globulares. Su floración ocurre en individuos adultos, generalmente después de los 7 años.	Hoffmann, A. E., & Walter, H. E. (2004)
	CR: Baja, depende casi exclusivamente de semillas, que pueden sobrevivir si están protegidas en el suelo. No rebrota desde la base.	Gómez-González, S., Torres-Díaz, C., Bustos-Schindler, C., & Gianoli, E. (2018).
	CE: Endémica.	Rodríguez, R., C. et al. (2018).
	RH: Bajo (200-400 mm/año). Sobrevive con precipitaciones mínimas y riegos esporádicos. Su fisiología CAM le permite abrir estomas de noche para minimizar pérdida de agua.	Luebert, F., & Pliscoff, P. (2017).
<i>Eriosyce engleri</i>	CH: Como la mayoría de las cactáceas, almacena agua en sus tejidos suculentos, pero su contenido de humedad en condiciones naturales rara vez supera el 40 %.	Nobel, P. S. (2003).
	CQ: No se reportan aceites esenciales, resinas u otros volátiles inflamables en su estructura.	Kiesling, R., & Ferrari, O. (2005).
	TD: Alcanza la madurez reproductiva después de 10-15 años, típico de cactáceas globulares de zonas áridas.	Anderson, E. F. (2001).
	CR: No rebrota después del fuego y depende de semillas para regenerarse, con tasas bajas de germinación en condiciones naturales.	Guerrero, P. C., et al. (2011).
	CE: Endémica.	Rodríguez, et al. (2018).
	RH: Sobrevive con precipitaciones mínimas (150–300 mm anuales) debido a su metabolismo CAM.	Luebert, F., & Pliscoff, P. (2017).
<i>Eulychnia castanea</i>	CH: Como cactus columnar, almacena más agua que especies globulares, pero menos que suculentas no cactáceas. Estudios en <i>Eulychnia</i> reportan ~45-55% de humedad en tallos adultos en época húmeda.	Nobel, P. S., & De la Barrera, E. (2003).
	CQ: Produce ceras cuticulares con trazas de triterpenoides volátiles en su corteza leñosa, pero no en los tallos verdes.	Loayza, A. P., et al. (2015).
	TD: Especie de crecimiento extremadamente lento; alcanza madurez reproductiva después de 15-20 años.	Hoffmann, A. E. (2010).
	CR: Puede rebrotar desde meristemas basales si el daño no es severo, pero la recuperación completa de la estructura lleva de 5 y 6 años.	Gómez-González, S., et al. (2018).
	CE: Endémica.	Rodríguez, R., C. et al. (2018).
	RH: Más dependiente de nieblas costeras (camanchaca) que otras cactáceas; requiere aproximadamente 500 mm anuales equivalentes.	Larraín, H., et al. (2019).
<i>Carpobrotus chilensis</i>	CH: Sus hojas suculentas almacenan grandes cantidades de agua (65-75% en temporada húmeda).	D'Antonio, C. M., & Mahall, B. E. (1991).
	CQ: Contiene aceites esenciales (ej. linalool) y flavonoides volátiles en hojas, que pueden aumentar su inflamabilidad.	Vila, M., et al. (2006).
	TD: Alcanza madurez reproductiva en 2-3 años y forma densas matas rápidamente.	Conser, C., & Connor, E. F. (2009).

<i>Carpobrotus chilensis</i>	CR: Rebrote vigoroso desde tallos subterráneos y semillas. Estudio en Chile mostró recuperación del 90% de cobertura en 18 meses post-incendio.	Figuroa, J. A., et al. (2011).
	CE: Nativa.	Rodríguez, R., C. et al. (2018).
	RH: Tolera sequía, pero crece mejor con humedad costera o riego moderado (400-600 mm/año).	Traveset, A., et al. (2008).

Seguido a esto, se ejecutó el algoritmo de significancia para cada especie seleccionada en el análisis previo, dando como resultado los valores presentados en la siguiente Tabla 6.4 (Anexo – Algoritmo de significancia).


Tabla 6.4: Resultado de la aplicación del algoritmo de significancia.

Especie	CH	CQ	TD	CR	CE	RH	Total
<i>Cumulopuntia sphaerica</i>	2	6	3	3	6	3	23
<i>Echinopsis chiloensis</i>	4	6	3	6	9	3	31
<i>Eriosyce curvispina</i>	4	6	3	3	9	3	28
<i>Eriosyce engleri</i>	2	6	3	3	9	3	26
<i>Eulychnia castanea</i>	4	4	2	6	6	2	24
<i>Carpobrotus chilensis</i>	6	4	3	9	6	2	30

Para el diseño del cortafuego se seleccionó únicamente la especie que alcanzó el puntaje más alto en el modelo de significancia. En este sentido, de acuerdo con la Tabla 6.4, de las seis especies evaluadas se selecciona la *Echinopsis chiloensis* como la más adecuada para su uso como cortafuego verde.

En la Tabla 6.5 se presenta la imagen de la especie seleccionada para los prototipos de cortafuegos verdes y una breve descripción que justifica su elección.

Tabla 6.5: Descripción de *Echinopsis chiloensis* y su uso como cortafuego.

<i>Echinopsis chiloensis</i>

(Friedrich & G.F. Rowley, 2008)
Nombre común: Quisco.
El Quisco es una especie presente en el "Parque La Reserva" de Villa Alemana. Su presencia local contribuye a disminuir el impacto ambiental de su uso y, al tratarse de una planta suculenta sin compuestos volátiles, resulta especialmente adecuada para la implementación de cortafuegos.

6.1.3 Revisión bibliográfica de características y clasificaciones de los cortafuegos verdes

Los cortafuegos verdes, o barreras verdes, son estructuras vegetativas diseñadas estratégicamente para la protección de elementos en riesgo frente a incendios forestales (Green, 1977). Su objetivo principal es disminuir la velocidad de propagación y la intensidad del fuego, particularmente interrumpiendo la propagación por las copas de los árboles, lo cual facilita las labores de control y combate de incendios (Batista et al., 2012; Viana et al., 2018).

Para sintetizar los hallazgos más relevantes obtenidos de esta revisión bibliográfica, la Tabla 6.6 presenta un resumen de los principales tipos y categorizaciones de cortafuegos verdes, facilitando una visualización concisa de la información clave identificada.

Tabla 6.6: Resumen de la revisión bibliográfica de cortafuegos verdes.

Criterio de Clasificación	Tipo de Cortafuego Verde	Descripción y Función Principal	Citas
Diseño Estructural	Lineales	Franjas continuas de vegetación que se extienden a lo largo de áreas estratégicas (ej. bordes de carreteras) para canalizar o detener fuegos de baja a moderada intensidad.	Vélez, 2000
	Modulares	Compuestos por módulos o bloques de vegetación distribuidos en patrones específicos (cuadrículas, círculos) para compartimentar el terreno o adaptarse a topografías irregulares.	Hernández et al., 2019
	Mixtos	Combinan vegetación con otras técnicas de prevención (ej. sistemas de riego, cortafuegos físicos, gestión de la carga de combustible por pastoreo) para una estrategia integral.	Viana et al., 2018
Composición y Función	Baja Inflamabilidad	Compuestas por especies con alto contenido de humedad, baja presencia de aceites volátiles/resinas, y lenta combustión, seleccionadas para dificultar la ignición y propagación.	Moreira et al., 2001; Plana et al., 2005; Vélez, 2000; Biondi y Batista, 2010
	Hoja Ancha/ Caducifolias	Utilizan especies leñosas que generalmente presentan menor inflamabilidad que las coníferas debido a su menor contenido de resinas y mayor humedad foliar, siendo valiosas en estaciones de alto riesgo.	Paula y Ojeda, 2009
	Plantaciones Específicas	Masas forestales diseñadas y gestionadas con el propósito de actuar como barreras ignífugas, priorizando especies de crecimiento rápido, tolerancia a la sequía y propiedades de baja inflamabilidad.	González et al., 2017
	Agroforestales/ Silvopastorales	Integran la producción agrícola o ganadera con la presencia de árboles; la actividad del manejo de cultivos o pastoreo contribuye a reducir la carga de combustible fino.	Kaye et al., 2019
Ubicación Estratégica	Perimetrales	Se establecen alrededor de áreas de especial valor (interfaz urbano-forestal, infraestructuras, ecológicas) para crear un anillo de seguridad que detenga o disminuya el avance de incendios externos.	CONAF, n.d.
	Internos/ Compartimentación	Diseñados para dividir grandes extensiones forestales en unidades de manejo más pequeñas, limitando la propagación a gran escala y facilitando las labores de extinción.	Scott y Burgan, 2005
	De Enlace	Conectan barreras naturales existentes (ríos, formaciones rocosas) o infraestructuras lineales (camino, carreteras) para formar una red de cortafuegos más robusta y continua, aprovechando elementos preexistentes.	Fernández et al., 2019

Adicional al tipo de cortafuegos, se realizaron hallazgos respecto a las especificaciones para su diseño, abordadas desde dos enfoques principales: la normativa chilena y la literatura científica. La normativa nacional (CONAF & MINAGRI, 2019) establece anchos mínimos (10 metros para fajas libres y cortacombustibles) y regula intervenciones como raleos, podas y control de estrato herbáceo, con aplicación en interfaz urbano-rural y restricciones en pendientes elevadas o hábitats protegidos

(CONAF & MINAGRI, 2018). Por otro lado, la literatura científica enfatiza la adaptación del diseño a los patrones de propagación del fuego: se sugieren mayores anchos en pendientes para incendios topográficos (Rothermel, 1972; Fernandes et al., 2013) y especies con alta retención de humedad (Vallejo et al., 2012). Para incendios de viento, se propone una geometría en "V" invertida (Finney, 2006) y baja estratificación vegetal (Agee et al., 2000). Los incendios convectivos demandan anchos superiores a 100 metros para mitigar el "spotting" y un mantenimiento intensivo (Albini, 1979; Duff et al., 2018; Agee et al., 2000). Un diseño efectivo, bajo esta perspectiva, integra el diagnóstico del patrón de incendio local, la selección de especies adaptadas y un monitoreo continuo (CONAF, 2020; Duff et al., 2018).

6.1.4 Definición de criterios de diseño para los cortafuegos verdes

Para la construcción del diseño del cortafuego verde lo primero que se debe tener en consideración, es el tipo de incendio más recurrente en la zona. Los incendios, como se menciona en secciones anteriores, varían dependiendo de su propagación (viento, convectivo y topográfico) y el estrato de combustible afectado (superficial, aéreo y subterráneo).

La Corporación Nacional Forestal (CONAF) posee información histórica de incendios en diferentes sectores de Chile, entre ellos Villa Alemana y Peñablanca. Esta entidad proporcionó los datos históricos del Parque la Reserva y sus alrededores, donde los incendios registrados mayormente corresponden al tipo topográfico y superficial. A continuación, se presenta la Figura 6.1, en la que se observa la dimensión y orientación de los incendios de mayor magnitud ocurridos en el sector. Estos incendios están representados mediante polígonos con borde de color rojo, mientras que los focos se muestran como puntos blancos (definidos como "Focos menores de incendios" en la leyenda de la figura 6.1). Cabe señalar que no todos los focos registrados derivaron en incendios de magnitud considerable.



Figura 6.1: Cartografía del histórico de incendios del Parque la Reserva Villa Alemana.

Referente a su topografía, el Parque La Reserva presenta pendientes superiores al 20%, según información proporcionada por la Dirección Ambiental de Villa Alemana. Por ello, resulta pertinente

que el diseño considere las recomendaciones de Rothermel (1972) para la implementación de cortafuegos efectivos frente a incendios de tipo topográfico.

Por otro lado, respecto a la normativa vigente (Ley 20.283), los cortacombustibles se instalan complementarios a fajas libres de vegetación, como caminos o estructuras naturales (quebradas o humedales). También, el cortacombustible se instala con un ancho mínimo equivalente a una vez la altura del bosque, nunca inferior a 10 metros.

En base a lo anterior, se presentan en la Tabla 6.7 las características fundamentales para las propuestas de los diseños de cortafuegos verdes.

Tabla 6.7: Características claves de los diseños de cortafuegos verdes para el Parque la Reserva.

Diseño	Composición vegetal	Composición estructural	Ubicación estratégica
Diseño A	<i>Echinopsis chiloensis</i>	Lineal	De enlace
Diseño B	<i>Echinopsis chiloensis</i>	Zig-zag	De enlace

Es importante considerar para el diseño la altura promedio que alcanzan las especies vegetales en su etapa madura. La *Echinopsis chiloensis* tiene una altura promedio de 0,5 a 2 metros (Hoffmann, A. & Walter, H., 2004).

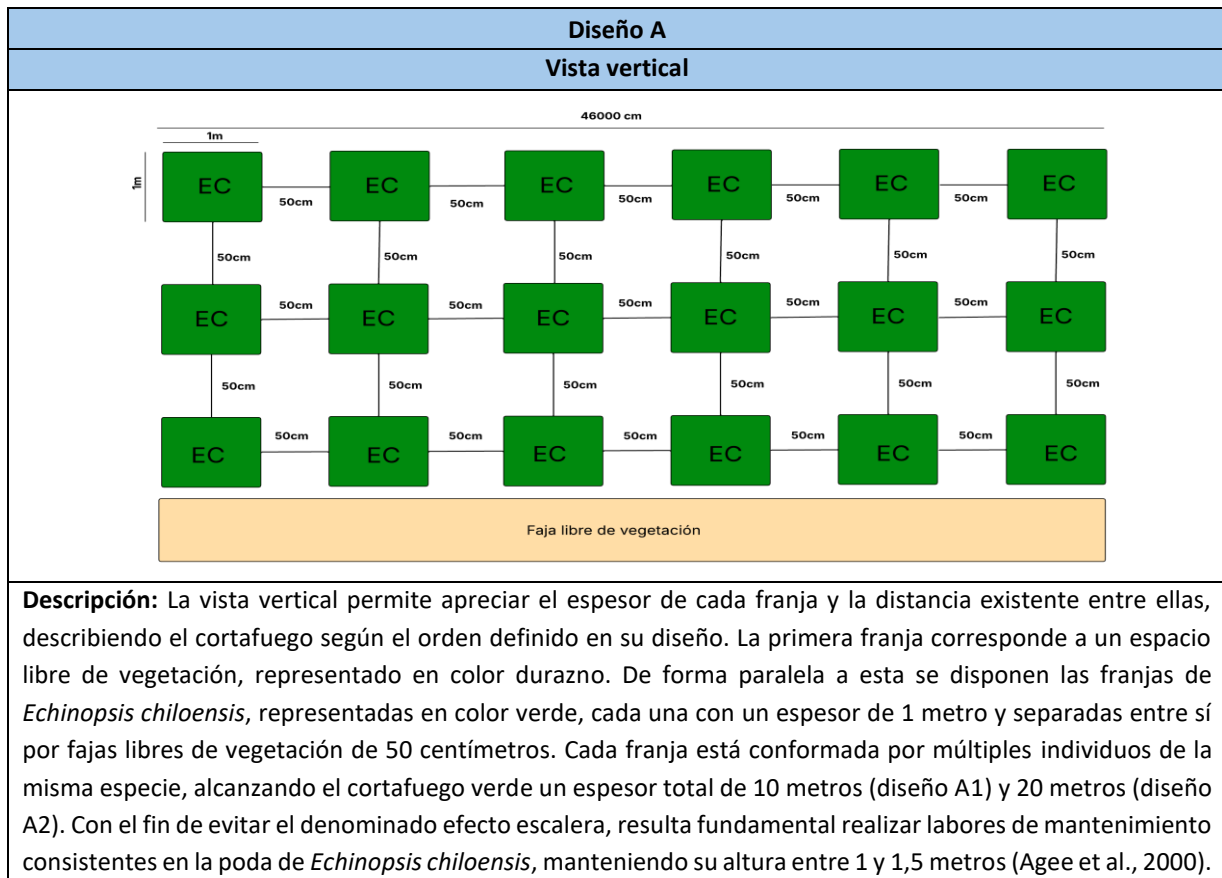
Con base en este parámetro, se desarrollaron dos prototipos geométricos de cortafuegos verdes: un diseño lineal (Tipo A) y un diseño en zig-zag (Tipo B). Para evaluar el efecto del ancho de la barrera, cada prototipo geométrico fue dimensionado en dos variantes: una con un ancho de 10 metros (DA10 y DB10) y otra con un ancho de 20 metros (DA20 y DB20). De este modo, se generaron un total de cuatro configuraciones distintas para su simulación y análisis comparativo. A continuación, la Tabla 6.8 describe el fundamento técnico utilizado para la creación de estos diseños.

Tabla 6.8: Descripción diseños A y B.

Componente	Diseños				Fundamento Técnico
	Lineal		Zig Zag		
	DA10	DA20	DB10	DB20	
Ancho total	10 m	20 m	10 m	20 m	Art. 12 Manual CONAF (cumple CONAF 2020)
Estructura	<i>Echinopsis chiloensis</i> [1m] y fajas libres de vegetación [50cm]		<i>Echinopsis chiloensis</i> [1m] y fajas libres de vegetación [50cm]		Interrupción radiación térmica (Rothermel, 1972)
Mantenimiento	Poda anual de <i>Echinopsis</i> para mantener altura de 1 m hasta 1,5m.		Poda anual de <i>Echinopsis</i> para mantener altura de 1 m hasta 1,5m.		Evita formación de "escaleras" (Agee et al., 2000)

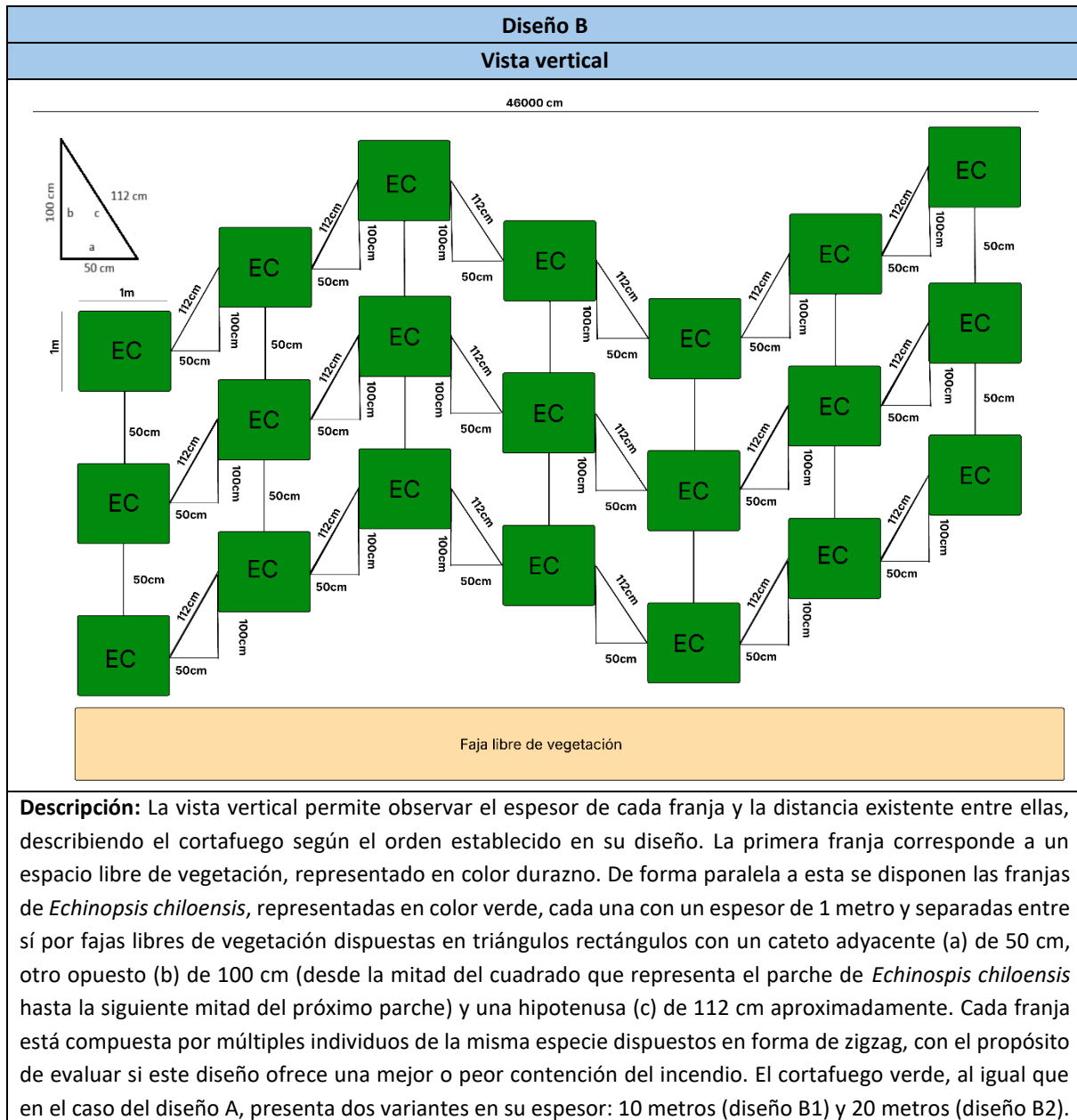
En la Tabla 6.9 se presenta la vista vertical del diseño A de cortafuego verde, acompañada de una descripción detallada de este.

Tabla 6.9: Vista vertical del Diseño A de cortafuego verde.



En la Tabla 6.10 se presenta el diseño B de cortafuego verde junto con una descripción detallada de este. Estas representaciones gráficas permiten visualizar la disposición espacial de los elementos que lo componen.

Tabla 6.10: Vista vertical del Diseño B de cortafuego verde.



6.2 Configuración de parámetros y características de los cortafuegos verdes diseñados en el software de simulación

Este objetivo se cumplió en tres etapas: primero, se establecieron los parámetros necesarios en *Prometheus* para definir modelos de combustible que representarán fielmente la ecofisiología de la especie seleccionada; segundo, se incorporaron los valores normalizados y experimentales en el software para crear un modelo personalizado; y finalmente, se validó el modelo mediante simulaciones que verificaron por medio del índice F1-Score su comportamiento coherente como cortafuego verde dentro del entorno de simulación.

6.2.1 Determinación de los parámetros requeridos por el software para la creación de modelos de combustible

En *Prometheus*, los modelos de combustible (fuel types) son fundamentales porque determinan la velocidad de propagación, la intensidad y la energía liberada por el incendio. Por defecto, el software trabaja con los tipos de combustible canadienses definidos en el FBP System (p. ej. C-1 a C-7 para coníferas, M-1 a M-4 para mixtos, D-1 a D-2 para decídúos, O-1a y O-1b para pastizales, etc.).

Para establecer el modelo de combustible que mejor se ajusta a la especie seleccionada, se realizó la consulta a los diseñadores del programa *Prometheus*, en la cual se menciona que el modelo con mayor similitud corresponde al D-2. A continuación, se presenta un extracto de lo mencionado por parte de los creadores:

“Use el modelo de combustible D-2 para su parche de combustible. Este modelo de combustible representa los rodales de Green Aspen durante el verano, cuando el alto contenido de humedad del combustible en hierbas, hierbas, pastos y arbustos sirve para amortiguar el potencial de propagación del fuego en la superficie. Las tasas máximas de propagación son una quinta parte de las de los incendios de primavera u otoño en condiciones de quema similares representadas por el modelo de combustible D-1 para los rodales de álamo temblón sin hojas. Un umbral de índice de acumulación (BUI) también se aplica al modelo de combustible D-2 donde una simulación de incendio no se propagará ni consumirá combustible a menos que el BUI sea ≥ 80 . En otras palabras, el modelo de combustible D-2 representa vegetación de alto contenido de humedad que es resistente al fuego y solo favorece la propagación del fuego cuando las condiciones son muy secas. Este es probablemente el modelo de combustible más representativo para la vegetación suculenta en ausencia de datos de investigación empírica.”

Los modelos de combustibles D-1 y D-2 se caracterizan por la presencia de un manto de duff, una capa orgánica parcialmente descompuesta que se ubica entre la hojarasca y el suelo mineral. Este estrato, aunque forma parte del perfil de combustibles del ecosistema, raramente aporta material disponible para la combustión, debido a su elevado contenido de humedad, que limita su capacidad de arder y contribuir al desarrollo del fuego.

De acuerdo con los requisitos que presenta el *Software Prometheus* para crear/modificar modelos de combustible, las variables modificables son aquellas descritas en la siguiente sección. A continuación, se presenta la Tabla 6.11 donde se exponen los parámetros ajustados para el modelo de combustible personalizado de *Echinopsis chiloensis*.

Tabla 6.11: Parámetros para el modelo de combustible personalizado.

Parámetro	Unidad	Valor original D-2	<i>Echinopsis chiloensis</i>	Fuente
TH	Metros	-1,0	2	Hoffmann, A. E., & Walter, H. E. (2004). <i>Cactáceas en la flora silvestre de Chile</i> (2ª ed.). Ediciones Fundación Claudio Gay.
CFL	Kg/m ²	0,000	0,001	Hoffmann, A. E., & Walter, H. E. (2004). <i>Cactáceas en la flora silvestre de Chile</i> (2ª ed.). Ediciones Fundación Claudio Gay.
CBH	Metros	0,0	50	Hoffmann, A. E., & Walter, H. E. (2004). <i>Cactáceas en la flora silvestre de Chile</i> (2ª ed.). Ediciones Fundación Claudio Gay.
BUI	Adimensional	32	32	-
Max BE	Adimensional	1,1790	1,1790	-
a	Adimensional	30	30	-
b	Adimensional	0,02320	0,02320	-
c	Adimensional	1,60	1,60	-
q	Adimensional	0,90	0,90	-

Los parámetros para los modelos personalizados de *Echinopsis chiloensis* se definieron mediante una combinación de valores derivados del modelo base D-2 (Aspen verde) y ajustes específicos basados en la morfología y ecofisiología de las especies. Esta aproximación metodológica se alinea con las prácticas recomendadas para modelar combustibles no tradicionales cuando no se dispone de datos empíricos completos de propagación (Alexander & Cruz, 2013).

6.2.2 Incorporación de los parámetros experimentales en el software

El presente apartado describe el proceso de incorporación de los parámetros del modelo de combustible desarrollado para *Echinopsis chiloensis* en el software *Prometheus*. La parametrización final fue el resultado de un proceso donde se conservaron los elementos del modelo base D-2 análogos al comportamiento de suculentas y se redefinieron estratégicamente aquellos necesarios para suprimir comportamientos no deseados, como la ignición de corona. La siguiente descripción detalla los valores finales y la lógica detrás de su selección:

Parámetros conservados del modelo base D-2

Los coeficientes de propagación a, b, c, q, así como los índices Max BE y BUI, se mantuvieron idénticos a los establecidos para el modelo de combustible D-2 (Forestry Canada Fire Danger Group, 1992). La decisión de conservar estos valores se fundamenta en que son coeficientes empíricos que calibraron la ecuación de propagación del fuego superficial para un tipo de vegetación con alta humedad tisular y baja inflamabilidad, características análogas a la suculenta modelada. (Neal McLoughlin, comunicación personal, 24 de junio de 2025). Se incluyó el índice BUI, considerando su umbral de ignición (>80), ya que representa adecuadamente la resistencia al fuego en condiciones de humedad y la necesidad de sequedad extrema en combustibles profundos para que ocurra propagación significativa (Wotton, Alexander, & Taylor, 2009).

Los parámetros CFL (Crown Fuel Load) y CBH (Crown Base Height) fueron modificados sustancialmente respecto al modelo base. El valor de CFL se fijó en 0,001 kg/m² para la especie, reflejando la ausencia

total de material fino muerto en sus estructuras, ya que *Echinopsis chiloensis* es un cactus columnar sin follaje deciduo (Hoffmann, 2004). Por su parte, el parámetro CBH (Crown Base Height) se estableció en 50 m (valor más alto aceptado por el programa). Este valor, extremadamente alto, tiene una función crítica a nivel de programación: desactiva mecánicamente el algoritmo de ignición de corona en el motor de cálculo de *Prometheus*. El modelo FBP subyacente evalúa la probabilidad de transición de fuego superficial a fuego de corona comparando la altura de las llamas con el valor de CBH. Si la altura de llama supera el CBH, el modelo activa los cálculos de propagación en copa (Forestry Canada Fire Danger Group, 1992; Tymstra et al., 2010). Al fijar el CBH en un valor inalcanzable (50 m), se asegura que esta condición nunca se cumpla, forzando a que toda la propagación simulada ocurra exclusivamente a nivel superficial.

Esta configuración es ecológicamente consistente con la ausencia total de un dosel arbóreo combustible en la especie. En terminología de ingeniería forestal, un "dosel" se refiere a la capa continua de follaje y ramas finas elevadas del suelo, típica de árboles y arbustos, que permite la propagación horizontal del fuego a través de las copas (Scott & Reinhardt, 2001). La *Echinopsis chiloensis*, un cactus columnar individual, no forma este estrato de dosel; su biomasa combustible se encuentra a nivel del suelo o en estructuras aisladas y no conectadas verticalmente. Por lo tanto, la decisión de desactivar el módulo de corona es una solución de modelado y al mismo tiempo, una representación fiel de su arquitectura vegetal.

El parámetro TH (Tree Height) se ajustó según la altura característica de la especie: 2 m para *Echinopsis chiloensis*, que presenta un crecimiento columnar erecto (Hoffmann, 2004).

6.2.3 Validación de los modelos creados mediante simulaciones

La siguiente sección presenta las consideraciones y resultados de las simulaciones realizadas para validar el modelo de combustible modificado, con el objetivo de reproducir el comportamiento de la especie *Echinopsis chiloensis*, seleccionada para su uso como cortafuego verde. Para ello, se definió un escenario de incendio ocurrido en una zona con presencia de parches de esta especie, buscando representar de la manera más fiel posible la dinámica de combustión del individuo.

Validación del modelo de combustible de *Echinopsis chiloensis*

La simulación para la validación del modelo de combustible se llevó a cabo utilizando la información de incendios ocurridos en el Parque la Reserva entregada por CONAF. El incendio seleccionado para la modelación corresponde al ocurrido el día 17 de marzo del año 2018 en áreas donde se encontraban varios parches de la especie seleccionada reconocidas por las capas vegetacionales en los datos presentados por la Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile (IDE Chile). En la Tabla 6.12 se presentan los detalles del incendio a modelar y en la Figura 6.2 se presenta el polígono del incendio registrado por CONAF en el Parque la Reserva.

Tabla 6.12: Información del incendio para la validación del modelo de combustible.

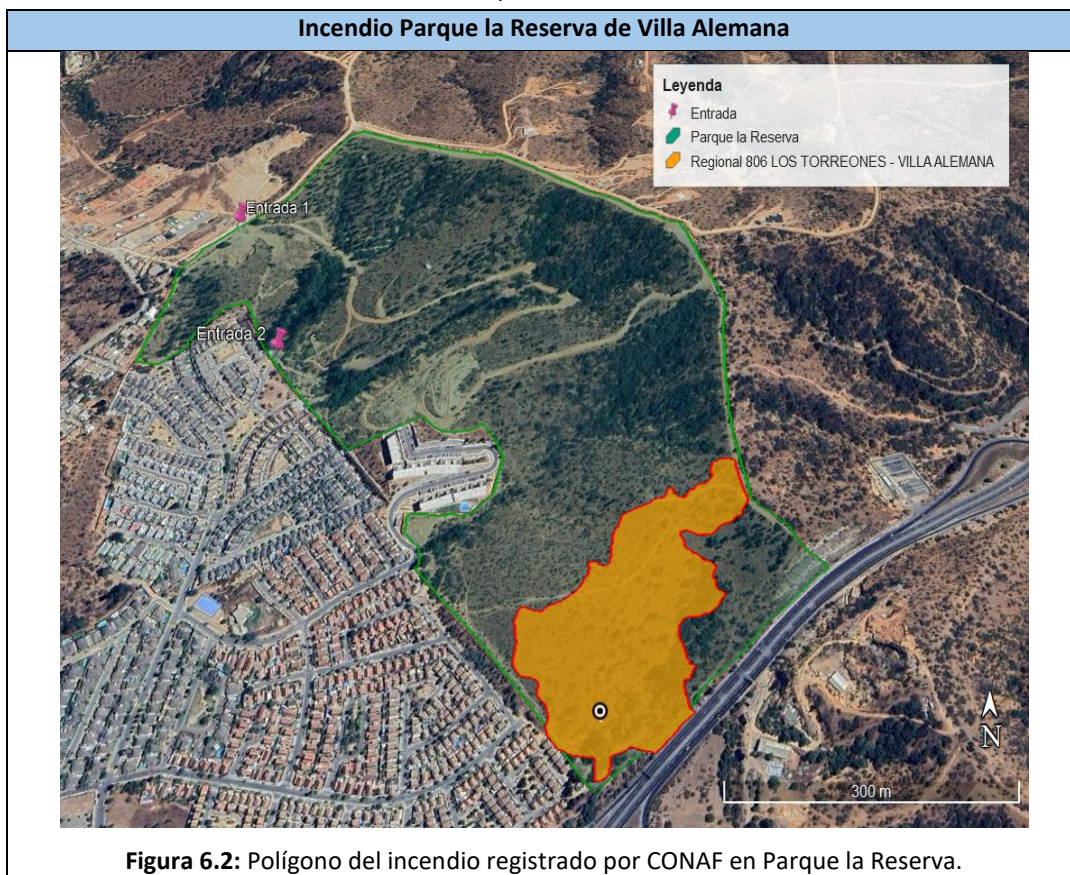


Figura 6.2: Polígono del incendio registrado por CONAF en Parque la Reserva.

Fecha del incendio:	17 de marzo 2018.
Hora de inicio:	15:00 horas.
Hora de término:	19:30 horas.
Ubicación del foco:	Latitud: 33° 3'1.50"S
	Longitud: 71°19'55.61"O
Detalles:	<p>Representado en color naranja se encuentra el polígono que corresponde al área de afectación del incendio.</p> <p>El foco de inicio del incendio se encuentra representado en la imagen como un punto blanco y negro.</p> <p>Representado en color verde se encuentra el polígono correspondiente al área del Parque la Reserva de Villa Alemana.</p> <p>El incendio fue atendido por la compañía de bomberos de Villa Alemana en sus flancos Este y Oeste hasta su contención.</p>

Resultado simulación 1

La primera simulación se realizó con los parámetros matemáticos del modelo de combustible D-2 (en base a la recomendación de los creadores del software), modificando únicamente los parámetros específicos de la especie (CFL, CBH y TH). También, se consideró para la simulación el foco del incendio en la posición geográfica y hora de inicio establecida por CONAF.

En la Figura 6.3 se presenta la simulación del incendio utilizando el modelo de combustible D-2 ajustado. La propagación del frente de fuego a lo largo del tiempo se representa mediante isotimas en color rojo, mientras que el punto de ignición se identifica con un punto rojo en su interior. El paisaje combustible se compone de las siguientes capas, representadas por polígonos de colores:

- Amarillo: Modelo O-1a (pastizal).
- Burdeos: Modelo M-3 (matorral denso).
- Naranja claro: Modelo M-1 (bosque nativo o plantación abierta).
- Morado: Modelo C-7 (bosque nativo adulto semidenso).
- Café oscuro: Modelo D-2 modificado (Parches de *Echinopsis chiloensis*).
- Negro: Zonas Non-fuel (áreas urbanas, pueblos o industriales).

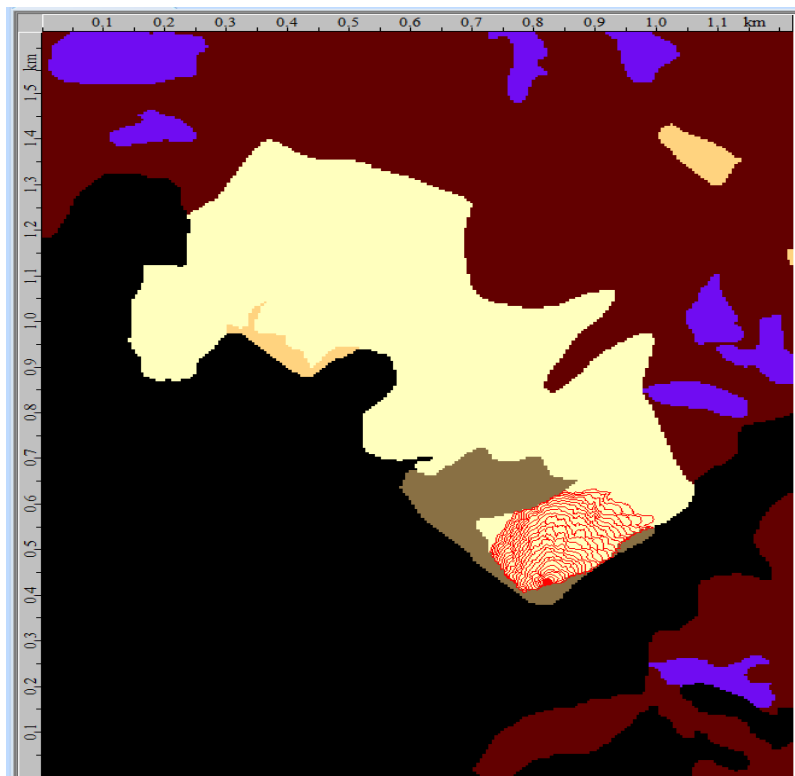


Figura 6.3: Imagen de la simulación del modelo D-2 ajustado.

En la Figura 6.4 que se presenta a continuación, se muestra el acercamiento de la simulación. En dicha imagen se puede observar cómo los parches de *Echinopsis chiloensis* no fueron afectados por el incendio, esto se debe a la limitante preestablecida por el programa. Para poder quemar esta zona el BUI debe ser superior o igual a 80, sin embargo, por las condiciones meteorológicas y del terreno este valor no logra ser alcanzado produciendo que estos parches no sean afectados.

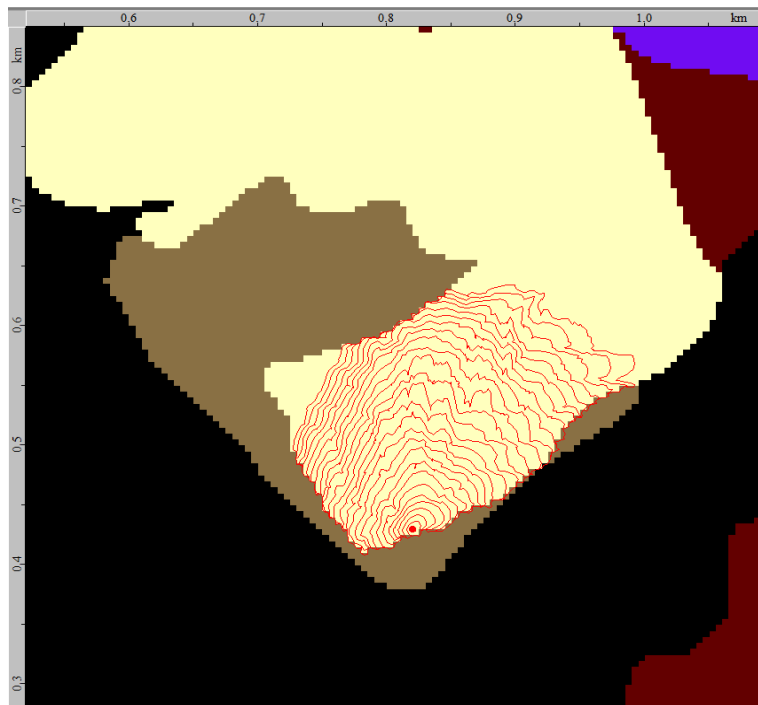


Figura 6.4: Acercamiento de la simulación del modelo D-2 ajustado.

En la Figura 6.5 se presenta en color morado claro el polígono generado por la simulación (D-2 modificado) y el color naranja corresponde al área real afectada por el incendio según los datos proporcionados por CONAF.

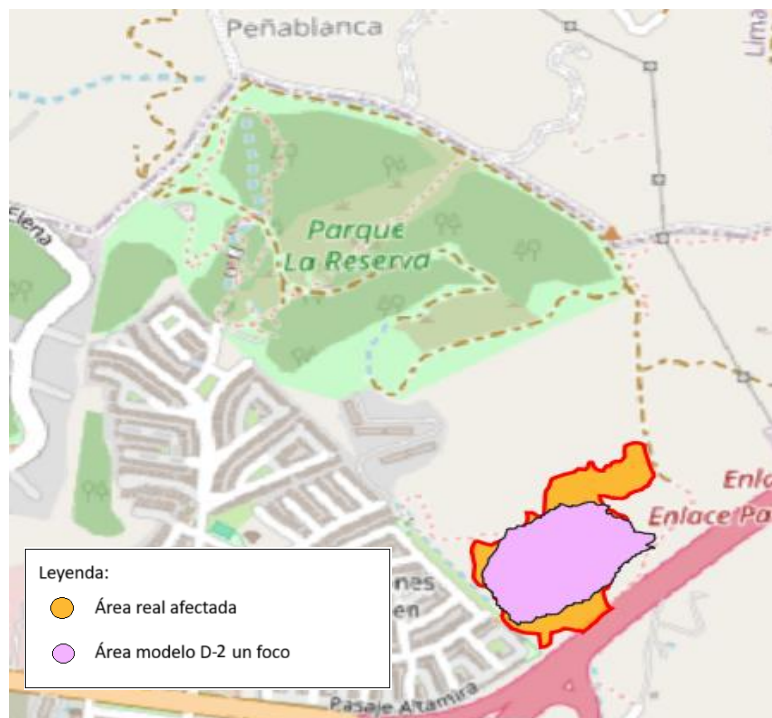


Figura 6.5: Polígono de la simulación del modelo D-2 ajustado y del incendio real.

En base a los resultados presentados con anterioridad, se realizó el cálculo del índice F1- Score para medir el porcentaje de ajuste que tiene el modelo de combustible con respecto al incendio real. Los resultados de este índice se presentan en la Tabla 6.13 (el cálculo de los índices F1-Score para todas las simulaciones se encuentran contenidas en el "Anexo 3 - Índice F1-Score").

Tabla 6.13: Resultado del índice F1-Score (F1), positivos verdaderos (TP), falsos positivos (FP) y falsos negativos (FN) para el modelo de combustible D-2 ajustado.

D-2 Modificado Foco 1		
TP	FP	FN
3,14	0,38	1,86
F1	0,74	73,72%

Como se muestra en la Tabla 6.13, el modelo representó correctamente un total de 3 hectáreas (TP). Sin embargo, consideró como zona afectada 0,38 hectáreas que en la realidad no fueron quemadas (FP), y, a su vez, omitió la afectación de aproximadamente 1,9 hectáreas que sí resultaron incendiadas en la situación real (FN). Por lo anterior, el índice F1 indica una precisión del 73% para esta simulación. No obstante, aunque este valor refleja un nivel de precisión adecuado, el modelo no logra representar de manera fiel el comportamiento real de los parches de *Echinopsis chiloensis*.

Resultado simulación 2

La segunda simulación se realizó con los parámetros matemáticos del modelo de combustible D-1, modificando únicamente los parámetros específicos de la especie (CFL, CBH y TH). Esto se debe a que en el resultado anterior debido a la limitante del BUI para el modelo D-2 los parches de *Echinopsis Chiloensis* no fueron afectados, a pesar de que en la realidad si fueron quemados por el incendio. Al revisar en la literatura, se observó que los modelos de combustible D-2 y D-1 comparten todos los valores de sus parámetros, con la diferencia que el modelo D-2 posee este condicionante en su valor de BUI, que el modelo D-1 no posee. Es por lo anterior que se consideró el modelo D-1 para las simulaciones. Por otro lado, para esta simulación también se configuró el foco del incendio en la posición geográfica y hora de inicio establecida por CONAF.

En la Figura 6.6 se presenta la simulación del incendio utilizando el modelo de combustible D-1 ajustado. La propagación del frente de fuego a lo largo del tiempo se representa mediante isotimas en color rojo, mientras que el punto de ignición se identifica con un punto rojo en su interior. El paisaje combustible se compone de las siguientes capas, representadas por polígonos de colores:

- Amarillo: Modelo O-1a (pastizal).
- Burdeos: Modelo M-3 (matorral denso).
- Naranja claro: Modelo M-1 (bosque nativo o plantación abierta).
- Morado: Modelo C-7 (bosque nativo adulto semidenso).
- Café grisáceo: Modelo D-1 modificado (Parches de *Echinopsis chiloensis*).
- Negro: Zonas Non-fuel (áreas urbanas, pueblos o industriales).

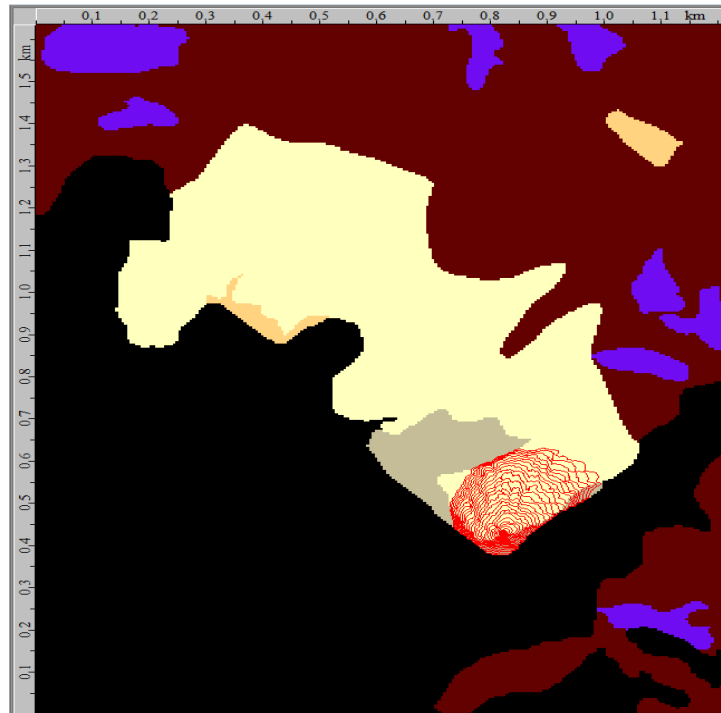


Figura 6.6: Imagen de la simulación del modelo D-1 ajustado.

En la Figura 6.7 que se presenta a continuación, se muestra el acercamiento de la simulación. En dicha imagen se puede observar cómo los parches de *Echinopsis chiloensis* si lograron ser afectados por el incendio debido a que ya no existe la limitante del BUI mencionada con anterioridad, representado de una manera más fiel la realidad.

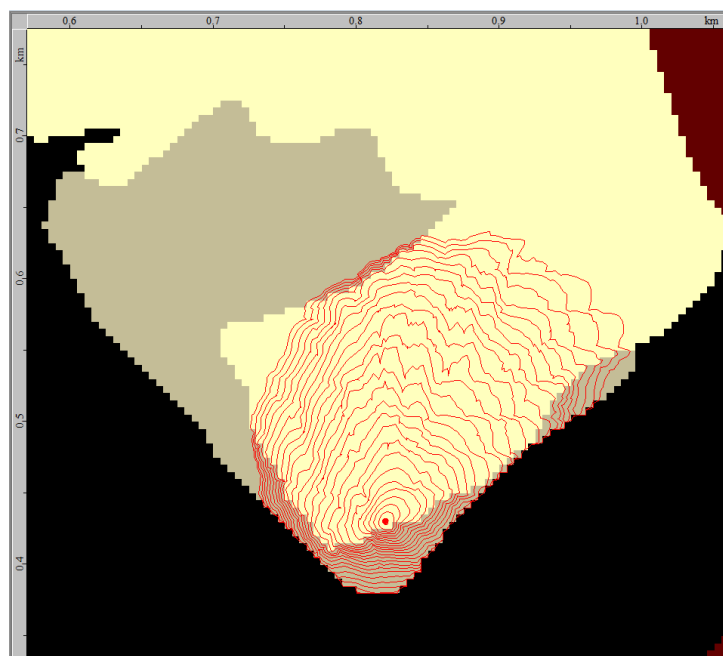


Figura 6.7: Acercamiento de la simulación del modelo D-1 ajustado.

En la Figura 6.8 se presenta en color amarillo el polígono generado por la simulación (modelo D-1 modificado) y el color naranja corresponde al área real afectada por el incendio según los datos proporcionados por CONAF.

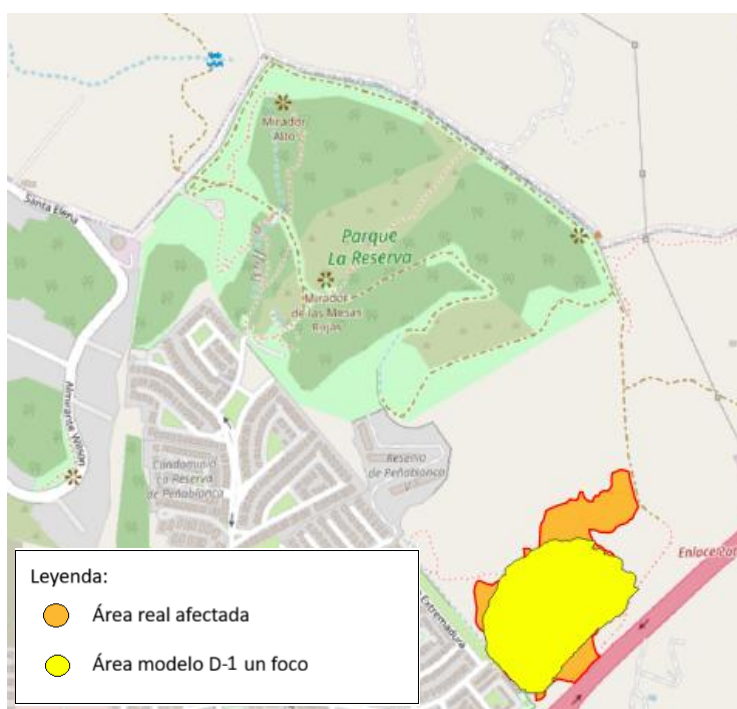


Figura 6.8: Polígono de la simulación del modelo D-1 ajustado y del incendio real.

En base a los resultados presentados con anterioridad, se realizó el cálculo del índice F1- Score para medir el porcentaje de ajuste que tiene el modelo de combustible D-1 modificado, con respecto al incendio real. Los resultados de este índice se presentan en la Tabla 6.14.

Tabla 6.14: Resultado del índice F1-Socre (F1), positivos verdaderos (TP), falsos positivos (FP) y falsos negativos (FN) para el modelo de combustible D-1 ajustado.

D-1 Modificado Foco 1		
TP	FP	FN
3,48	0,64	1,51
F1	0,76	76,36%

Como se muestra en la Tabla 6.14, el modelo representó correctamente un total de 3,48 hectáreas (TP). Sin embargo, consideró como zona afectada 0,64 hectáreas que en la realidad no fueron quemadas (FP), y se omitió la afectación de aproximadamente 1,5 hectáreas que sí resultaron incendiadas en la situación real (FN). Por lo anterior, el índice F1 representa una precisión del 76% para esta simulación. Resultando en una mejor precisión en comparación con el modelo D-2 ajustado.

Simulaciones con factores externos de contención del incendio

Posteriormente a la simulación de los escenarios iniciales, se incorporó la consideración de la acción de bomberos en el modelo. Si bien el *software Prometheus* no permite representar directamente la

intervención de brigadas, dicha acción influye en la dispersión del incendio en sus flancos (Colorado Firecamp, 1996).

De acuerdo con los antecedentes proporcionados por CONAF, los bomberos realizaron maniobras de contención en los costados del incendio, lo que provocó que el fuego concentrara su avance en la parte superior, generando un polígono de mayor elongación. Para reproducir de manera fidedigna este comportamiento en la simulación, se implementó la activación de un foco secundario de ignición en horas posteriores al inicio del siniestro. La incorporación de este foco consideró un tiempo estimado de llegada y actuación de los equipos de aproximadamente dos horas, con el objetivo específico de emular el impulso preferencial del fuego en la parte superior como consecuencia de las labores de contención.

Esta decisión metodológica se basó en la limitación del software empleado, el cual no permite parametrizar directamente la acción humana ni las maniobras de supresión (por ejemplo, líneas de control o retardantes). Según la literatura, en estos casos es válido realizar ajustes indirectos al escenario de ignición o a las condiciones del modelo para representar de manera más realista la propagación del fuego, especialmente cuando el evento incluye intervención de brigadas (Rural Fire Research, 2020). De este modo, la activación del foco secundario permitió aproximar el comportamiento observado en terreno, integrando de forma indirecta los efectos de la supresión sobre la dinámica del incendio.

Los puntos de ignición utilizados para esta simulación, junto con una descripción pormenorizada de las consideraciones aplicadas para cada uno de ellos, se presentan en la Tabla 6.15.

Tabla 6.15: Puntos de ignición para la simulación con factores externos de contención del incendio.

Puntos de ignición	Coordenadas geográficas	Consideraciones
Punto inicial	Latitud: 33° 3'1.50"S	- Datos entregados por CONAF
	Longitud: 71°19'55.61"O	
Punto secundario	Latitud: 33°2'54.69"S	- Acción de bomberos en los flancos este y oeste. La activación de este punto se definió considerando el tiempo de respuesta de bomberos. En consecuencia, se estableció su inicio a las 17:00 horas, es decir, dos horas después del primer punto de ignición.
	Longitud: 71°19'53.07"O	

Resultado simulación 3

La tercera simulación se realizó con los parámetros matemáticos del modelo de combustible D-2, modificando únicamente los parámetros específicos de la especie (CFL, CBH y TH) al igual que en la primera simulación. Sin embargo, consideró el uso de ambos puntos de ignición presentados anteriormente.

En la Figura 6.9 se presenta la simulación del incendio utilizando el modelo de combustible D-2 ajustado y la activación de ambos puntos, manteniendo la simbología de las capas vegetaciones descritas para la primera simulación.

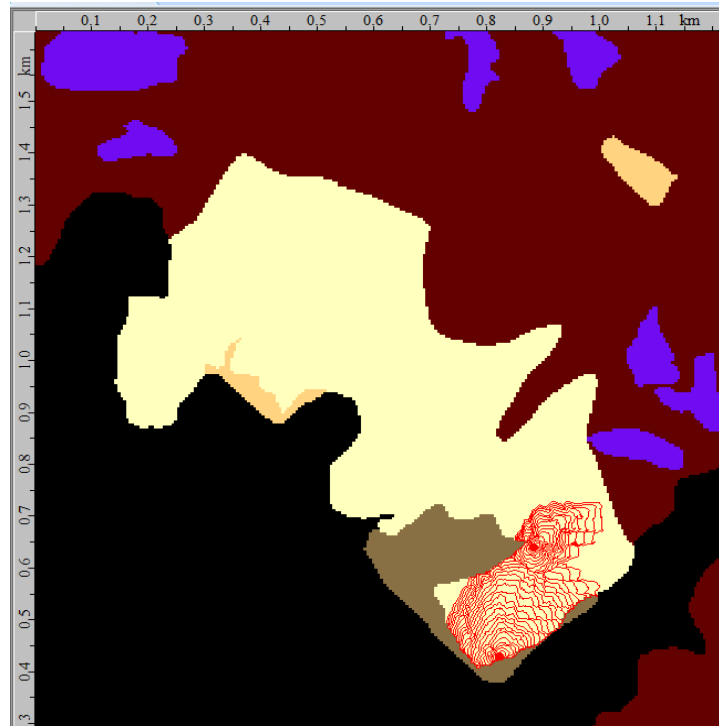


Figura 6.9: Imagen de la simulación del modelo D-2 ajustado con 2 focos integrados.

En la Figura 6.10 que se presenta a continuación, se muestra el acercamiento de la simulación. En dicha imagen se observa cómo los parches de *Echinopsis chiloensis* no fueron afectados por el incendio al igual de la primera simulación, incluso con la activación de ambos focos demostrando que, a pesar de esta nueva variante, el BUI no logra alcanzar un valor superior a 80. Por lo anterior, se comprueba que el modelo D-2 no logra representar la afectación real de la especie seleccionada.

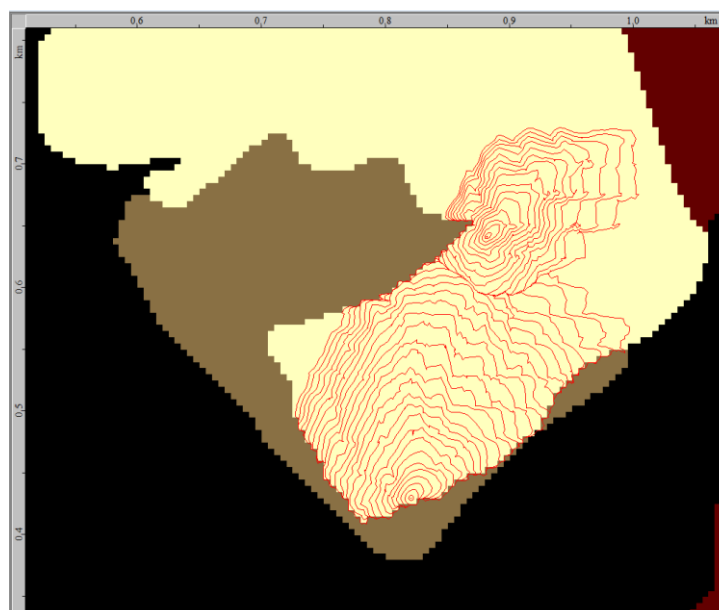


Figura 6.10: Acercamiento de la simulación del modelo D-2 ajustado con 2 focos integrados.

En la Figura 6.11 se presenta en color morado oscuro el polígono generado por la simulación (modelo D-2 modificado e incluyendo dos focos) y en color naranja se representa el área real afectada por el incendio según los datos proporcionados por CONAF.

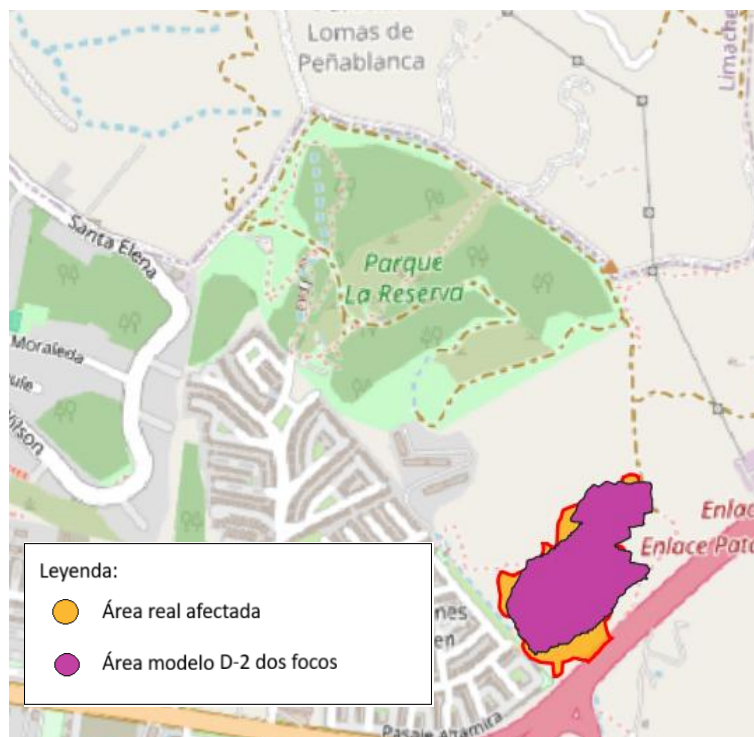


Figura 6.11: Polígono de la simulación del modelo D-2 ajustado con 2 focos y del incendio real.

En base a los resultados presentados con anterioridad, se realizó el cálculo del índice F1- Score para medir el porcentaje de ajuste que tiene el modelo de combustible con respecto al incendio real. Los resultados de este índice se presentan en la Tabla 6.16.

Tabla 6.16: Resultado del índice F1-Socre (F1), positivos verdaderos (TP), falsos positivos (FP) y falsos negativos (FN) para el modelo de combustible D-2 ajustado con 2 focos.

D-2 Modificado 2 Focos		
TP	FP	FN
3,99	0,81	1,01
F1	0,81	81,47%

Como se muestra en la Tabla 6.16, el modelo representó correctamente un total aproximado de 4 hectáreas (TP). Sin embargo, consideró como zona afectada 0,81 hectáreas que en la realidad no fueron quemadas (FP) y omitió la afectación de 1 hectárea que sí resultó incendiada en la situación real (FN). Por lo anterior, el índice F1 representa una precisión del 81,5%. Estos resultados indican que el uso de dos focos mejora la precisión del modelo. Sin embargo, el objetivo de la simulación es validar el modelo de combustible que mejor se ajusta al comportamiento de la especie seleccionada y si bien se obtuvo un valor de precisión superior a las primeras simulaciones, este modelo de combustible no logró reproducir de manera adecuada el efecto real del incendio sobre la *Echinopsis chiloensis*.

Resultado Simulación 4

La cuarta simulación se realizó con los parámetros matemáticos del modelo de combustible D-1, modificando únicamente los parámetros específicos de la especie (CFL, CBH y TH) al igual que en la segunda simulación. Sin embargo, consideró el uso de ambos puntos de ignición presentados anteriormente en la Tabla 6.15.

En la Figura 6.12 se presenta la simulación del incendio utilizando el modelo de combustible D-1 ajustado y la activación de ambos puntos de ignición, manteniendo la simbología de las capas vegetaciones descritas para la segunda simulación.

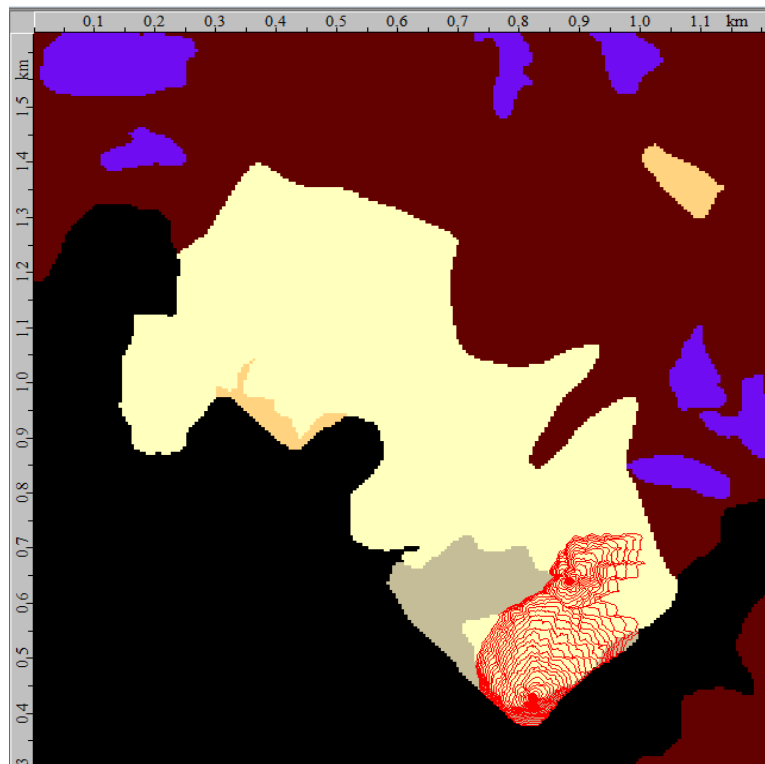


Figura 6.12: Imagen de la simulación del modelo D-1 ajustado con 2 focos integrados.

En la Figura 6.13 que se presenta a continuación, se muestra el acercamiento de la simulación. En dicha imagen se puede observar cómo los parches de *Echinopsis chiloensis* si lograron ser afectados por el incendio debido a que ya no existe la limitante del BUI establecida para el modelo de combustible D-2, representado de una manera más fiel la realidad.

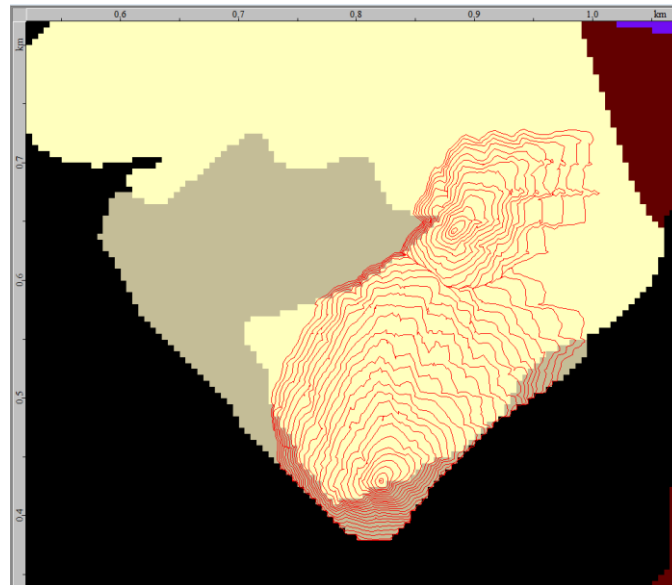


Figura 6.13: Acercamiento de la simulación del modelo D-1 ajustado con 2 focos integrados.

En la Figura 6.14 se presenta en color durazno el polígono generado por la simulación (modelo D-1 modificado e incluyendo dos focos) y en color naranja se representa el área real afectada por el incendio según los datos proporcionados por CONAF.

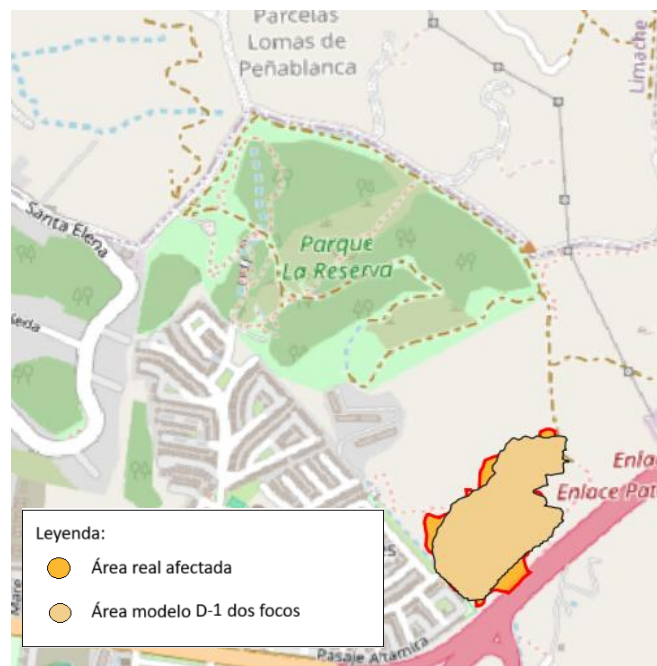


Figura 6.14: Polígono de la simulación del modelo D-1 ajustado con 2 focos y del incendio real.

En base a los resultados presentados con anterioridad, se realizó el cálculo del índice F1- Score para medir el porcentaje de ajuste que tiene el modelo de combustible con respecto al incendio real. Los resultados de este índice se presentan en la Tabla 6.17.

Tabla 6.17: Resultado del índice F1-Socre (F1), positivos verdaderos (TP), falsos positivos (FP) y falsos negativos (FN) para el modelo de combustible D-1 ajustado con 2 focos.

D-1 modificado 2 Focos		
TP	FP	FN
4,36	1,03	0,64
F1	0,84	83,90

Como se muestra en la Tabla 6.17, el modelo representó correctamente un total aproximado de 4 hectáreas (TP). Sin embargo, consideró como zona afectada 1 hectárea que en la realidad no fue quemada (FP) y se omitió la afectación de 0,64 hectáreas que sí resultaron incendiadas en la situación real (FN). Por lo anterior, el índice F1 representa una precisión aproximada del 84% para este caso, resultando en una representación más fiel del incendio y del comportamiento de real de la quema de *Echinopsis chiloensis*.

En conclusión, se confirma que el modelo de combustible que mejor se ajusta al comportamiento de la especie seleccionada es el modelo D-1 modificado, en todos los casos simulados.

6.3 Simulación de escenarios de propagación de incendios incorporando cortafuegos verdes

En la siguiente sección se presentan los resultados correspondientes a la selección de los escenarios de propagación de incendios que incorporan cortafuegos verdes. Las actividades desarrolladas se enfocaron en la definición de los elementos ambientales de los escenarios de prueba, la configuración de los cortafuegos verdes a simular, la determinación de los focos de incendio utilizados en la modelación y, finalmente, la ejecución de las simulaciones en el software.

6.3.1 Definir elementos de los escenarios de prueba (topografía, vegetación, clima, etc).

En esta sección se presenta la ubicación de los prototipos de cortafuegos verdes, junto con la caracterización de la topografía, vegetación y condiciones meteorológicas, que permite evaluar su efectividad como barreras preventivas frente a la propagación de incendios por medio de simulaciones en el *Software Prometheus*.

Ubicación de los prototipos de cortafuegos verdes

El lugar donde se busca implementar el uso de cortafuegos verdes como medida de mitigación para incendios forestales corresponde al Parque la Reserva de Peñablanca, perteneciente a la Municipalidad de Villa Alemana, Región de Valparaíso. Por lo anterior, todas las simulaciones se realizarán en este lugar.

Posterior a la definición del área de emplazamiento de los cortafuegos verdes, se procedió a la selección de los escenarios de prueba y las variables de entrada (condiciones del entorno) para la simulación.

Elementos de los escenarios de prueba

Los elementos que forman parte de los escenarios de prueba se dividen en tres grupos fundamentales: topografía, capa vegetacional y condiciones meteorológicas que se describen a continuación.

Topografía

La capa topográfica constituye un componente fundamental en el *software Prometheus*, ya que proporciona la base geomorfológica sobre la cual se calcula el comportamiento del fuego. Esta capa, representada mediante un Modelo Digital de Elevación (MDE), define la altitud del terreno para cada punto del área de estudio, permitiendo al modelo derivar variables críticas como la pendiente y la orientación de las laderas. Estos parámetros modifican directamente la tasa de propagación del incendio y la dirección de avance de las llamas, según los algoritmos físicos implementados en el software.

Para construir esta capa, se utilizó el modelo 'DEM Alos Palsar Región de Valparaíso', obtenido del Geoportal del Sistema Nacional de Coordinación de Información Territorial (SNIT) de Chile. Este archivo, publicado en 2016, presenta una resolución espacial de 12.5 metros por píxel, proporcionando el nivel de detalle necesario para las simulaciones a escala de paisaje. El MDE fue posteriormente procesado en QGIS para recortarlo y alinearlo con los límites exactos del área de estudio en el Parque La Reserva de Villa Alemana, antes de ser incorporado al software para su procesamiento.

Capa vegetacional y modelos de combustibles

Las capas vegetacionales forman un papel fundamental en la modelación de incendios dentro del software, esto se debe a que la capa vegetacional define el modelo de combustible que se le otorga dentro del programa por lo que afecta en la propagación del incendio.

La información de las capas vegetacionales se extrajo de la Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile (IDE Chile) de la sección de información de Planificación Catastral. El documento corresponde al Catastro y Actualización de los Recursos Vegetacionales y Uso de la Tierra de la Región de Valparaíso (V), con una escala de 1:50.000, y sistema de referencia EPSG:32719 del periodo comprendido entre el año 2001 y 2021. La cartografía fue obtenida a partir de imágenes Landsat 8, con una escala regional y una superficie mínima cartografiable de 0,27 ha, utilizadas para la representación del uso y cambio de uso de la tierra mediante la metodología semiautomatizada denominada Multi-índice o MIICA. Esta metodología se basa en la combinación de cuatro índices espectrales (dNBR, dNDVI y CV), los cuales, a través de reglas de integración, permiten generar una cobertura de cambio de uso de la tierra que indica la magnitud y direccionalidad del cambio.

Las cubiertas cartográficas almacenan la información del Catastro de los Recursos Vegetacionales correspondientes a las últimas actualizaciones realizadas en cada región, en este caso de Valparaíso. Estas capas cuentan con información relacionada a los usos, subusos y estructuras de los recursos Vegetacionales, además de tipologías forestales y especies predominantes (IDE Chile, 2019).

Posterior a la obtención de la información de las formaciones vegetacionales, se estableció el modelo análogo que describiera de mejor manera el tipo de combustible dentro del terreno. La información detallada de la asignación se encuentra en el Anexo 4 – Capa vegetacional.

En la Tabla 6.18 se presenta la asignación de las formaciones vegetacionales presentes en el Parque la Reserva de Peña Blanca.

Tabla 6.18: Asignación de combustibles para las formaciones vegetaciones del Parque la Reserva.

Formación vegetal	Combustible asignado	Identificador Prometheus
Pastizal	O-1a	31
Matorral denso	M-3	70
Bosque nativo o plantación abierta	M-1	40
Bosque nativo adulto semidenso	C-7	7
Áreas urbanas	Non-Fuel	101
Formación de suculentas	D-1/D-2	13

La formación vegetal corresponde a la capa entregada por el IDE Chile y el combustible asignado corresponde a la tabla de datos que maneja el programa para generar las simulaciones (se asigna el modelo de combustible con mayor analogía). El identificador de *Prometheus* corresponde al valor numérico que se le asigna a la formación vegetal que el programa lee y expresa con los datos del combustible asignado, es decir, finalmente lo que el programa leerá y expresará según las conexiones análogas realizadas.

Condiciones meteorológicas

Los datos meteorológicos constituyen el principal forzante de la propagación del incendio en el modelo *Prometheus*, determinando la intensidad y el comportamiento del fuego. Para las simulaciones, se utilizaron datos horarios de la Estación Limache (ID: 320006), ubicada en las coordenadas -33.0120 S, -71.2610 W, y administrada por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC).

El proceso de construcción de esta capa implicó dos etapas claramente diferenciadas:

Validación del Modelo: Para verificar la precisión de la parametrización del combustible, se forzó el modelo con los datos meteorológicos del 17 de marzo de 2018, fecha en la que ocurrió un incendio real en el área de estudio, permitiendo contrastar los resultados de la simulación con el comportamiento observado.

Evaluación de los Cortafuegos: Para analizar la efectividad de los diseños de cortafuegos verdes bajo condiciones climáticas contrastantes, se seleccionaron dos días representativos de 2024: un día de verano (14 de enero de 2024) y un día de invierno (7 de julio de 2024). Esta comparación permitió evaluar el desempeño de los prototipos bajo distintos escenarios de estrés ambiental.

La información se obtuvo desde la plataforma de la DMC, descargando planillas mensuales en formato Excel que contenían los valores horarios de precipitación, humedad relativa del aire, temperatura de aire seco, y velocidad y dirección del viento. Posteriormente, estos datos fueron depurados y reformulados en una tabla única con un formato de columnas específico (Anexo 5 – Datos meteorológicos) requerido para la correcta lectura del programa.

En algunos días de los meses seleccionados se presentaron faltas de información en los registros horarios, específicamente alrededor de las 14:00 y 15:00 horas. Debido a que el programa requiere contar con el conjunto completo de datos del mes para su correcto funcionamiento, fue necesario realizar un proceso de interpolación para completar los valores ausentes. No obstante, los días con datos interpolados no fueron considerados en las pruebas, con el fin de mantener la fiabilidad de los resultados.

6.3.2 Establecer la configuración de los cortafuegos para la modelación

En coordinación con la Dirección Ambiental de Villa Alemana (DAM), se definió la ubicación de los prototipos de cortafuegos verdes a partir de un análisis participativo en el que se abordaron tres preguntas clave: ¿qué se desea proteger?, ¿qué se puede permitir perder? y ¿qué no se puede permitir perder?

Como resultado de esta instancia, se estableció que la prioridad es la protección de los parches y formas vegetacionales de matorral espinoso y bosque esclerófilo mediterráneo presentes en la interfaz urbano-forestal del Parque La Reserva. Este sector, además de su valor ecológico, posee un alto grado de exposición debido a su frecuente uso por parte de residentes locales, quienes realizan actividades recreativas, incluyendo fogatas, que han generado pequeños focos de incendio en el pasado. Bajo este contexto, la implementación de los prototipos de cortafuegos verdes se justifica como una estrategia preventiva destinada a minimizar el riesgo de propagación del fuego hacia los ecosistemas nativos de mayor valor ambiental y cultural. La ubicación propuesta considera zonas de mayor vulnerabilidad, cercanas a los espacios de uso recreativo, con el fin de actuar como una barrera natural que reduzca el impacto de eventuales incendios y asegure la conservación de la vegetación prioritaria.

La ubicación de los prototipos de cortafuegos verdes será la misma para ambos casos (Diseño A y Diseño B), con el objetivo de evaluar la efectividad de cada uno bajo las mismas condiciones. En la Figura 6.15 se presenta la cartografía del Parque La Reserva, donde se muestra la ubicación inicial de los prototipos de cortafuegos verdes, representada en color amarillo claro. Esta ubicación fue seleccionada considerando los focos de incendios registrados en años anteriores y la ubicación de los parches y formaciones vegetaciones a proteger las cuales se presentan de color rojo.

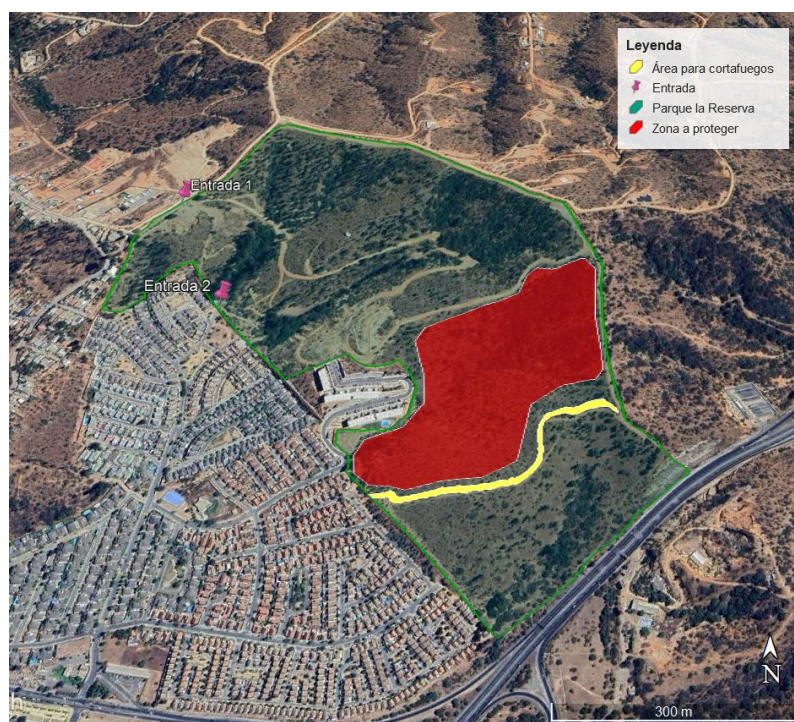


Figura 6.15: Cartografía con la ubicación inicial de los prototipos de cortafuegos verde en el Parque la Reserva.

Como se muestra en la Figura 6.15, el cortafuego no sigue una línea recta, lo cual se debe a las especificaciones establecidas en la normativa vigente, que exige que las medidas cortacombustibles se ubiquen contiguas a fajas libres de vegetación, tales como caminos o cuerpos de agua. En este caso, el cortafuego sigue el trazado de un sendero que atraviesa el sector, dividiendo la zona que se busca proteger de aquella que presenta un mayor riesgo de incendios, debido al libre y no controlado acceso de los habitantes en el área de interfaz urbano-forestal. La extensión aproximada de los cortafuegos es de 460 metros (0,46km).

En la Figura 6.16 se presentan las imágenes correspondientes a la configuración de los distintos diseños y espesores considerados para los cortafuegos verdes.



Figura 6.16: Disposición espacial de los diseños de cortafuegos a evaluar en las simulaciones.

6.3.3 Determinación de incendios para la modelación

Las modelaciones se realizaron en épocas contrastadas, es decir, una se realizó en invierno (menor probabilidad de generación de incendios) y la otra en verano (mayor frecuencia de incidentes generadores de incendios) con la finalidad de evaluar en diversas condiciones el funcionamiento del cortafuego verde.

Para la selección de los puntos de ignición, en primer lugar, se consideró la ubicación de la zona con mayor probabilidad de ocurrencia de incendios, correspondiente al área de interfaz urbano-forestal con menor nivel de control dentro del parque. En segundo lugar, se analizó la zona con mayor registro histórico de incendios forestales ocurridos en el Parque La Reserva. La zona que presenta el mayor riesgo de incendios, considerando ambos criterios, corresponde a la que se muestra en la Figura 6.17 en color morado.

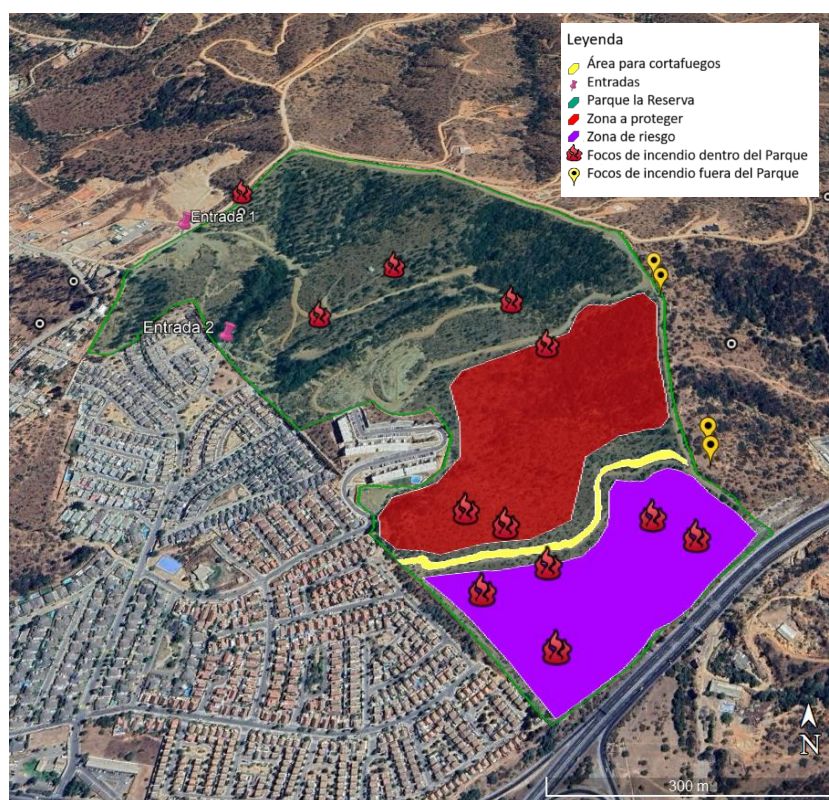


Figura 6.17: Zona seleccionada para la configuración de los puntos de ignición.

Como se muestra en la Figura 6.17, la zona con mayor concentración de focos de incendios (representados con el ícono de incendio) corresponde al área de interfaz urbano-forestal. Estos focos, además, presentan una mayor recurrencia de incendios de mayor magnitud en comparación con los demás puntos señalados en la figura, según la información proporcionada por CONAF.

Es por lo anterior que se fijaron los focos de incendios en este mismo sector, con diferencias de cercanía con el área que se desea proteger representada por el polígono de color rojo. La Figura 6.18 muestra los 4 puntos de ignición definidos con sus coordenadas geográficas y el sector donde se ubicaron los cortafuegos verdes para las pruebas.

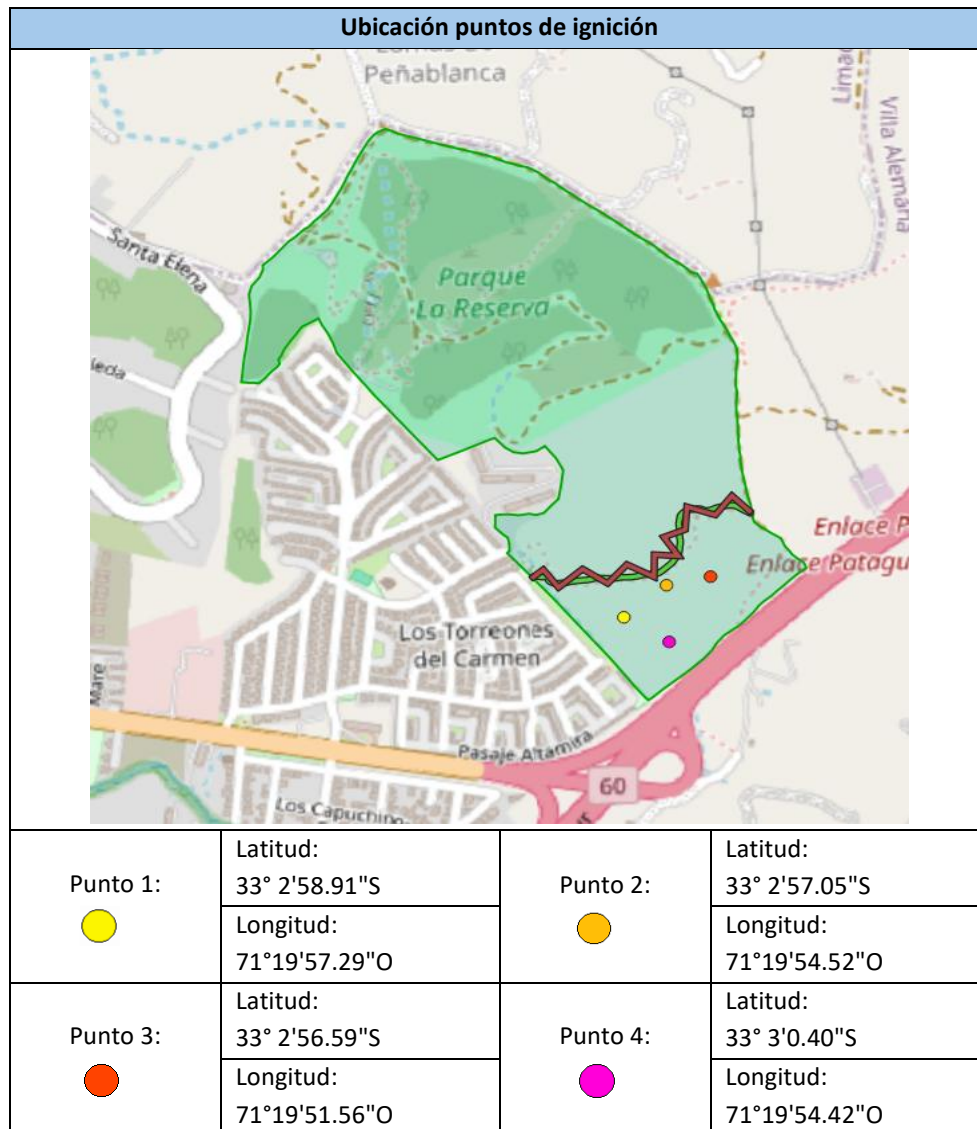


Figura 6.18: Ubicación de los puntos de ignición y zona de cortafuegos verdes.

En la imagen contenida en la Figura 6.18 se presenta la configuración de los cortafuegos A (color verde) y B (color burdeo). El punto representado en color amarillo fue seleccionado por su proximidad al tramo recto del cortafuego, con el objetivo de analizar su comportamiento en dicha sección. El punto de color naranja se escogió por su cercanía al cortafuego para evaluar el efecto de este sobre focos de incendio adyacentes. Por su parte, el punto rojo se seleccionó por encontrarse próximo a la parte curva del cortafuego, permitiendo evaluar el comportamiento del fuego en una sección con esa característica. Finalmente, el punto de color rosado fue elegido por su mayor distancia respecto al cortafuego, con el propósito de analizar su efectividad ante incendios más alejados y con distinta composición de combustible.

6.3.4 Ejecución de las simulaciones en el Software para los diferentes escenarios

La modelación se ejecutó para dos escenarios estacionales contrastantes (Servicio de Evaluación Ambiental, 2020), manteniendo constantes los parámetros base del terreno, los modelos de combustibles, la configuración geométrica y espacial de los cortafuegos (con sus variantes de diseño A y B, y anchos de 10 y 20 metros), así como la localización de cuatro puntos de ignición. La única variable modificada correspondió a la condición meteorológica, representativa de un día tipo para cada estación.

Consecuentemente, los resultados se presentan con una agrupación jerárquica basada en la estacionalidad, el diseño del cortafuego y el espesor de la franja.

Resultados de Modelación: Escenario Estival

La simulación se realizó el día 14 de enero de 2024, entre las 16:00 y las 19:00 horas. Esta fecha fue seleccionada debido a las altas temperaturas y velocidades de viento registradas, variables que resultan determinantes en la propagación y comportamiento de los incendios forestales.

Las variables climáticas a modelar se encuentran descritas en la Tabla 6.19 que se presenta a continuación:

Tabla 6.19: Valores climáticos a modelar en época estival.

Hora	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (km/h)	Dirección del viento (°)	Precipitaciones (mm)
16:00	32,8	32	3,704	330	0
17:00	33,8	30	1,852	241	0
18:00	35,2	29	3,704	301	0
19:00	34,1	31	14,816	283	0

En las simulaciones se mantiene constante la información topográfica y las capas vegetacionales utilizadas para la validación del modelo de combustible.

Los cortafuegos fueron sometidos a cuatro simulaciones, una por cada foco descrito en la Figura 6.18. Los puntos de ignición (focos) fueron activados sin la presencia del cortafuego con el propósito de establecer el incendio de control, es decir, aquel que se utilizará como referencia para evaluar la efectividad del cortafuego verde como medida de mitigación frente a incendios forestales. En la Figura 6.19 se presenta la imagen de los incendios control representados en color azul y en color verde el sector correspondiente al área del Parque la Reserva.

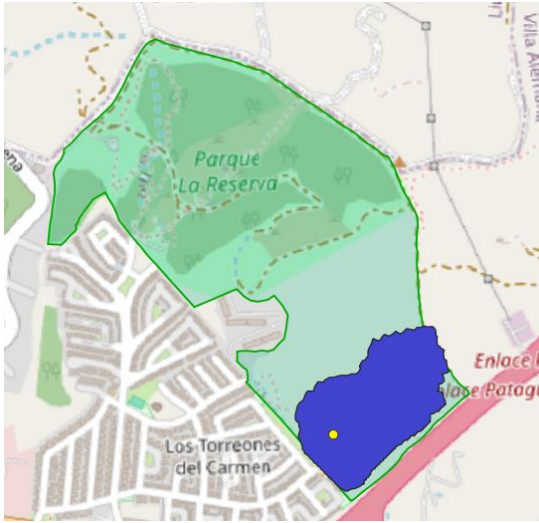
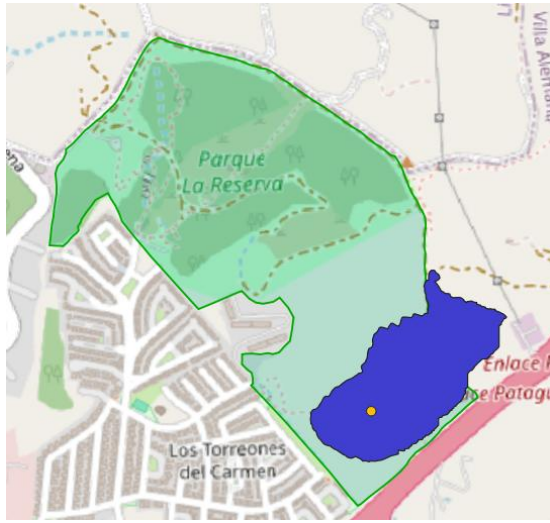
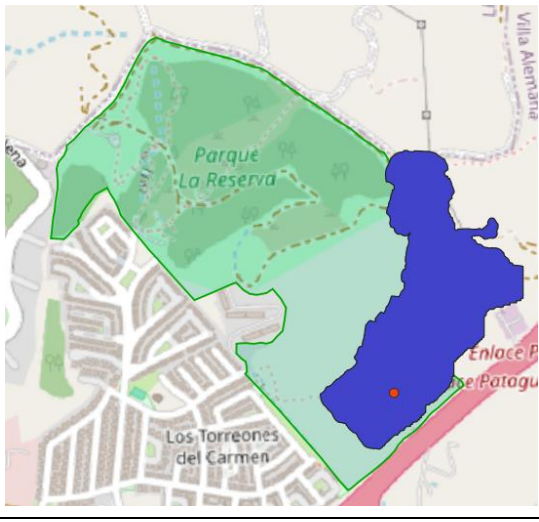
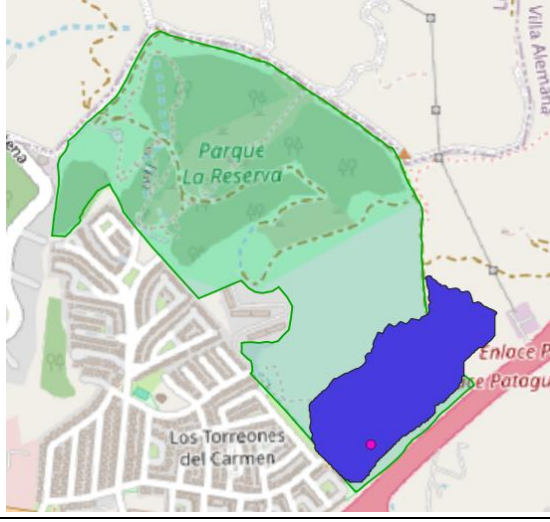
Simulaciones periodo estival	
Área de control Foco 1	Área de control Foco 2
	
<p>Descripción: El color azul representa el área que representa el incendio control generado por la activación del punto 1 de ignición (color amarillo).</p>	<p>Descripción: En color naranja se encuentra representado el punto 2 de ignición y en color azul el área del incendio control para este foco.</p>
Área de control Foco 3	Área de control Foco 4
	
<p>Descripción: En color rojo se representa el punto 3 de ignición y en color azul el respectivo polígono del incendio generado en la simulación.</p>	<p>Descripción: El punto 4 de ignición se encuentra representado en color rosado y en azul el área generada en la simulación para el incendio control en este caso.</p>

Figura 6.19: Incendio control de los cuatro focos seleccionados.

Como se puede apreciar en las imágenes contenidas en la Figura 6.19, la ubicación de los puntos de ignición cambia significativamente el comportamiento del incendio.

- **Simulaciones Diseño A**
- El diseño A corresponde al cortafuego lineal que sigue la dirección del sendero que divide la sección protegida del parque y la zona de interfaz urbano-forestal de menor control.

- **Espesor de 10 metros:** El cortafuego cuenta con una configuración lineal que alcanza un total aproximado de 460 km y un ancho de 10 metros. En la Figura 6.20 se presentan los resultados de las simulaciones.

Simulaciones periodo estival- Cortafuego lineal 10 metros	
Foco 1	Foco 2
<p>Descripción: El cortafuego para el punto 1 de ignición logró impedir la quema de 5.573 metros cuadrados.</p>	<p>Descripción: El cortafuego para el punto 2 de ignición logró impedir la quema de 3.416 metros cuadrados.</p>
Foco 3	Foco 4
<p>Descripción: El cortafuego para el punto 3 de ignición logró impedir la quema de 2.606 metros cuadrados.</p>	<p>Descripción: El cortafuego para el punto 4 de ignición logró impedir la quema de 1.700 metros cuadrados.</p>

Figura 6.20: Simulaciones del cortafuego Diseño A de 10 metros de espesor.

- **Espesor de 20 metros:** El cortafuego cuenta con una configuración lineal que alcanza un total aproximado de 460 km y un ancho de 20 metros. A continuación, en la Figura 6.21 se presentan las simulaciones del cortafuego lineal (A) con 20 metros de grosor.

Simulaciones periodo estival- Cortafuego lineal 20 metros	
Foco 1	Foco 2
<p>Descripción: El cortafuego para el punto 1 de ignición logró impedir la quema de 9.889 metros cuadrados.</p>	<p>Descripción: El cortafuego para el punto 2 de ignición logró impedir la quema de 8.588 metros cuadrados.</p>
Foco 3	Foco 4
<p>Descripción: El cortafuego para el punto 3 de ignición logró impedir la quema de 111 metros cuadrados.</p>	<p>Descripción: El cortafuego para el punto 4 de ignición logró impedir la quema de 2.421 metros cuadrados.</p>

Figura 6.21: Simulaciones del cortafuego Diseño A de 20 metros de espesor.

- **Simulaciones Diseño B**

El diseño B corresponde al cortafuego zigzagueante que sigue la dirección del sendero que divide la sección protegida del parque y la zona de interfaz urbano-forestal de menor control.

- **Espesor de 10 metros:** El cortafuego cuenta con una configuración zigzagueante que alcanza un total aproximado de 460 km y un ancho de 10 metros.

A continuación, en la Figura 6.22 se presentan las simulaciones del cortafuego en zig-zag (B) con 10 metros de grosor.

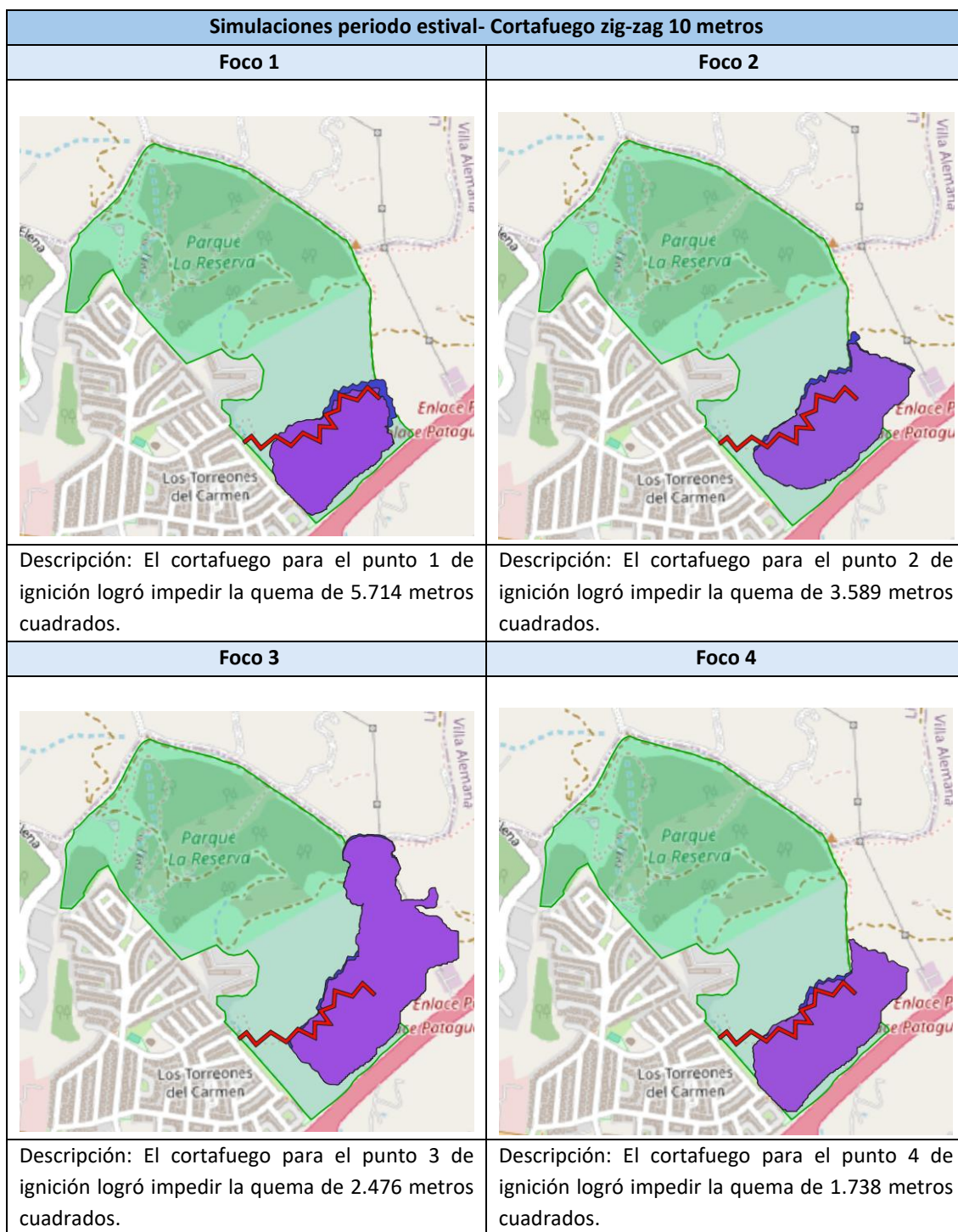


Figura 6.22: Simulaciones del cortafuego Diseño B de 10 metros de espesor.

- Espesor de 20 metros:** El cortafuego cuenta con una configuración zigzagueante que alcanza un total aproximado de 460 km y un ancho de 20 metros. A continuación, en la Figura 6.23 se presentan las simulaciones del cortafuego en zig-zag (B) con 20 metros de grosor.

Simulaciones periodo estival- Cortafuego zig-zag 20 metros	
Foco 1	Foco 2
<p>Descripción: El cortafuego para el punto 1 de ignición logró impedir la quema de 8.961 metros cuadrados.</p>	<p>Descripción: El cortafuego para el punto 2 de ignición logró impedir la quema de 7,618 metros cuadrados.</p>
Foco 3	Foco 4
<p>Descripción: El cortafuego para el punto 3 de ignición logró impedir la quema de 4.363 metros cuadrados.</p>	<p>Descripción: El cortafuego para el punto 4 de ignición logró impedir la quema de 3.386 metros cuadrados.</p>

Figura 6.23: Simulaciones del cortafuego Diseño B de 20 metros de espesor.

Resultados de Modelación: Escenario Invernal

La simulación se llevó a cabo el 7 de julio de 2024, entre las 10:00 y las 16:00 horas. Esta fecha fue seleccionada debido a que presentaba bajas temperaturas, altas velocidades de viento y escasas precipitaciones, condiciones típicas del período invernal, pero relevantes para la propagación de incendios. Se optó por un intervalo de simulación prolongado con el fin de permitir que los incendios alcanzaran e impactaran el cortafuego en algún punto del área de estudio.

Las variables climáticas a modelar se encuentran descritas en la Tabla 6.20 que se presenta a continuación:

Tabla 6.20: Valores climáticos a modelar en época invernal.

Hora	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (km/h)	Dirección del viento (°)	Precipitaciones (mm)
10:00	-0,1	92	19,312	157.5	0
11:00	-0,4	92	9,656	180	0
12:00	-0,8	93	9,656	180	0
13:00	-0,2	93	19,312	180	0,1
14:00	3,8	94	14,484	180	0,1
15:00	7,4	94	16,093	180	0,1
16:00	11,6	72	14,484	202.5	0,1

En las simulaciones se mantiene constante la información topográfica y las capas vegetacionales utilizadas para la validación del modelo de combustible y la prueba de cortafuegos en la época estival.

Los cortafuegos fueron sometidos a cuatro simulaciones, una por cada foco descrito en la Figura 6.18 al igual que en la época estival. El mismo caso ocurre para los puntos de ignición que fueron activados sin la presencia del cortafuego con el propósito de establecer el incendio de control de cada uno. En la Figura 6.24 se presenta la imagen de los incendios control representados en color celeste y en color verde el sector correspondiente al área del Parque la Reserva.

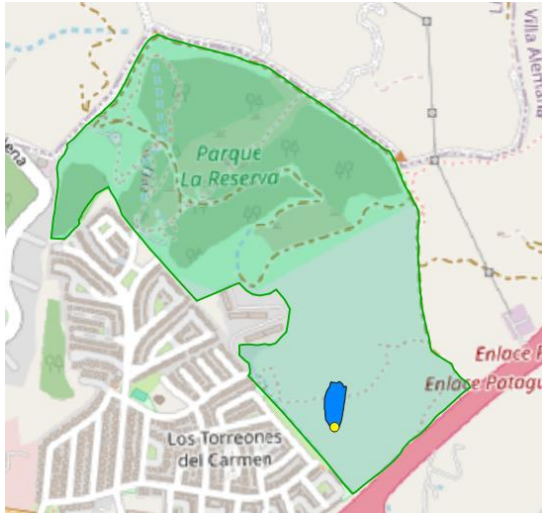
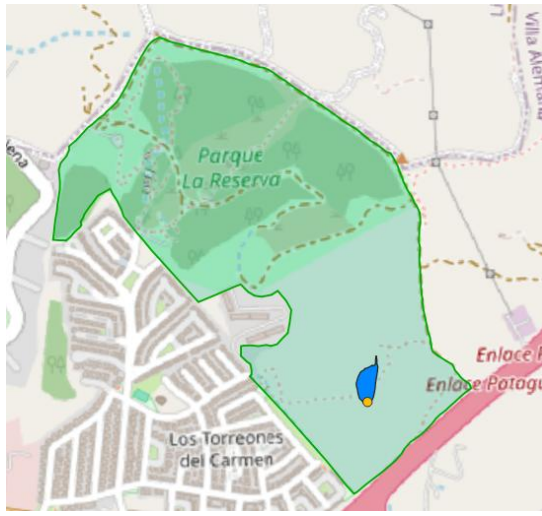
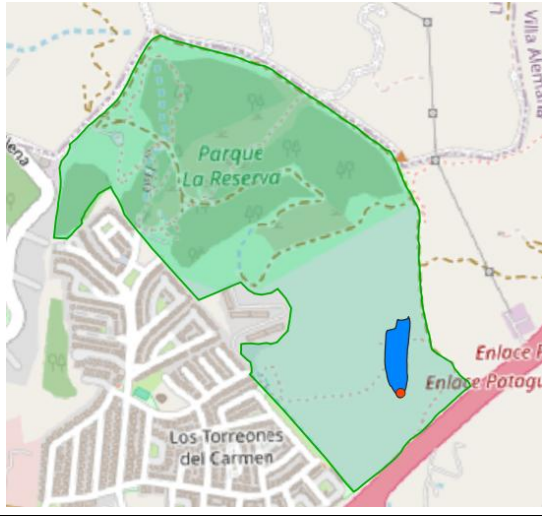
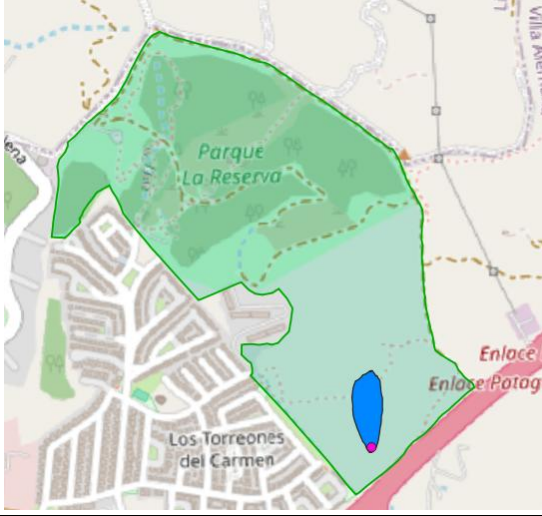
Simulaciones periodo invernal	
Área de control Foco 1	Área de control Foco 2
	
<p>Descripción: El color celeste representa el área que representa el incendio control generado por la activación del punto 1 de ignición (color amarillo).</p>	<p>Descripción: En color naranja se encuentra representado el punto 2 de ignición y en color celeste el área del incendio control para este foco.</p>
Área de control Foco 3	Área de control Foco 4
	
<p>Descripción: En color rojo se representa el punto 3 de ignición y en color celeste el respectivo polígono del incendio generado en la simulación.</p>	<p>Descripción: El punto 4 de ignición se encuentra representado en color rosado y en celeste el área generada en la simulación para el incendio control en este caso.</p>

Figura 6.24: Incendio control de los cuatro focos seleccionados.

- **Simulaciones Diseño A**

El diseño A corresponde al cortafuego lineal que sigue la dirección del sendero que divide la sección protegida del parque y la zona de interfaz urbano-forestal de menor control.

- **Espesor de 10 metros:** El cortafuego cuenta con una configuración lineal que alcanza un total aproximado de 460 km y un ancho de 10 metros. En la Figura 6.25 se presentan los resultados de las simulaciones del cortafuego lineal (A) con 10 metros de grosor.




Simulaciones periodo invernal- Cortafuego lineal 10 metros	
Foco 1	Foco 2
	
<p>Descripción: El cortafuego para el punto 1 de ignición logró impedir la quema de 318 metros cuadrados.</p>	<p>Descripción: El cortafuego para el punto 2 de ignición logró impedir la quema de 502 metros cuadrados.</p>
Foco 3	Foco 4
	
<p>Descripción: El cortafuego para el punto 3 de ignición logró impedir la quema de 858 metros cuadrados.</p>	<p>Descripción: El cortafuego para el punto 4 de ignición logró impedir la quema de 467 metros cuadrados.</p>

Figura 6.25: Simulaciones del cortafuego Diseño A de 10 metros de espesor.

- **Espesor de 20 metros:** El cortafuego cuenta con una configuración lineal que alcanza un total aproximado de 460 km y un ancho de 20 metros. A continuación, en la Figura 6.26 se presentan las simulaciones del cortafuego lineal (A) con 20 metros de grosor.

Simulaciones periodo invernal- Cortafuego lineal 20 metros	
Foco 1	Foco 2
	
<p>Descripción: El cortafuego para el punto 1 de ignición logró impedir la quema de 626 metros cuadrados.</p>	<p>Descripción: El cortafuego para el punto 2 de ignición logró impedir la quema de 1.245 metros cuadrados.</p>
Foco 3	Foco 4
	
<p>Descripción: El cortafuego para el punto 3 de ignición logró impedir la quema de 1.614 metros cuadrados.</p>	<p>Descripción: El cortafuego para el punto 4 de ignición logró impedir la quema de 1.097 metros cuadrados.</p>

Figura 6.26: Simulaciones del cortafuego Diseño A de 20 metros de espesor.

- **Simulaciones Diseño B**

El diseño B corresponde al cortafuego zigzagueante que sigue la dirección del sendero que divide la sección protegida del parque y la zona de interfaz urbano-forestal de menor control.

- **Esesor de 10 metros:** El cortafuego cuenta con una configuración zigzagueante que alcanza un total aproximado de 460 km y un ancho de 10 metros. A continuación, en la tabla Figura 6.27 se presentan las simulaciones del cortafuego en zig-zag (B) con 10 metros de grosor.

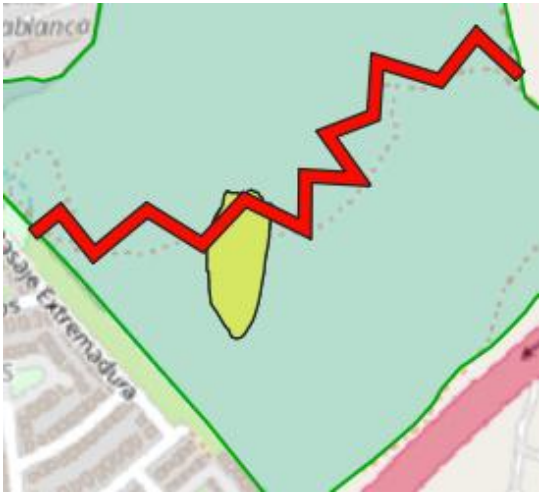

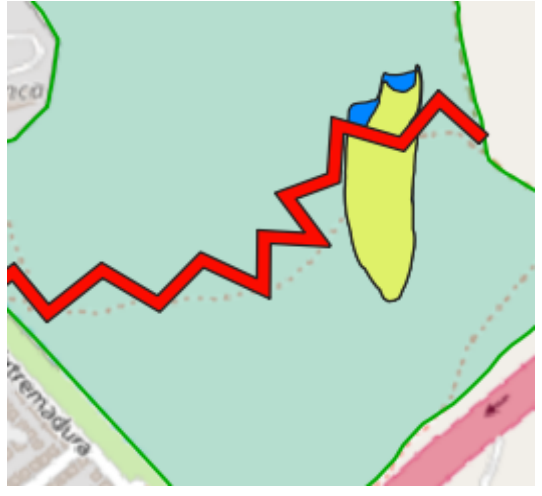
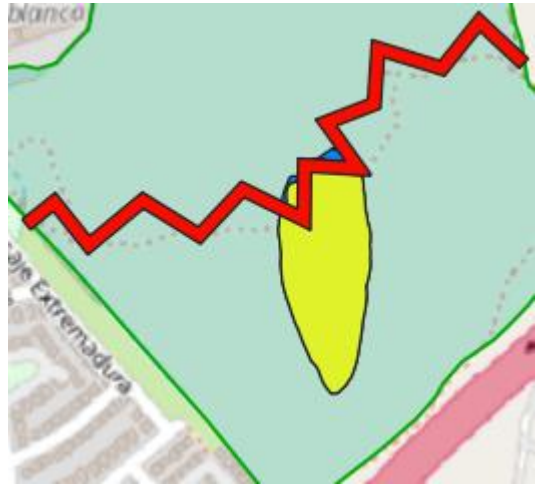
Simulaciones periodo invernal- Cortafuego zig-zag 10 metros	
Foco 1	Foco 2
	
<p>Descripción: El cortafuego para el punto 1 de ignición logró impedir la quema de tan solo 63 metros cuadrados, por lo que no se logra apreciar en la imagen.</p>	<p>Descripción: El cortafuego para el punto 2 de ignición logró impedir la quema de 590 metros cuadrados.</p>
Foco 3	Foco 4
	
<p>Descripción: El cortafuego para el punto 3 de ignición logró impedir la quema de 772 metros cuadrados.</p>	<p>Descripción: El cortafuego para el punto 4 de ignición logró impedir la quema de 453 metros cuadrados.</p>

Figura 6.27: Simulaciones del cortafuego Diseño B de 10 metros de espesor.

- Espeor de 20 metros:** El cortafuego cuenta con una configuración zigzagueante que alcanza un total aproximado de 460 km y un ancho de 20 metros. A continuación, en la Figura 6.28 se presentan las simulaciones del cortafuego en zig-zag (B) con 20 metros de grosor. Para el siguiente caso, los cortafuegos se muestran en capas inferiores para evidenciar la leve diferencia entre el incendio de control y las simulaciones con el cortafuego.

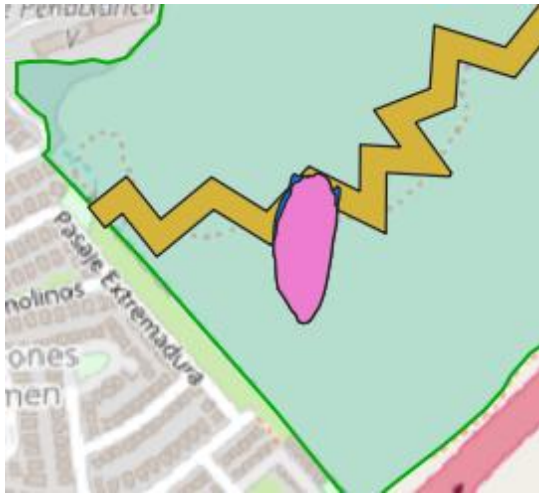
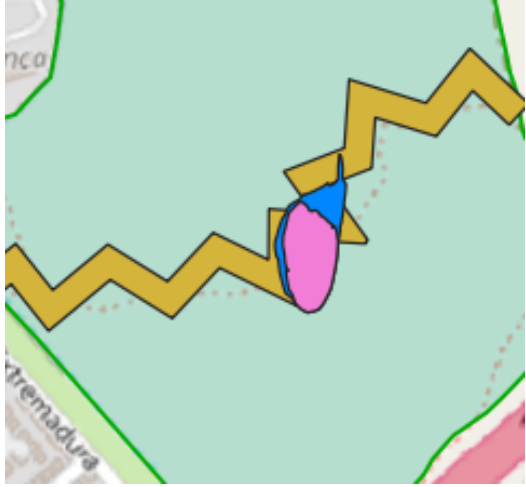


Simulaciones periodo invernal- Cortafuego zig-zag 20 metros	
Foco 1	Foco 2
	
<p>Descripción: El cortafuego correspondiente al punto de ignición 1 logró impedir la quema de 196 metros cuadrados.</p>	<p>Descripción: El cortafuego para el punto 2 de ignición logró impedir la quema de 955 metros cuadrados.</p>
Foco 3	Foco 4
	
<p>Descripción: El cortafuego para el punto 3 de ignición logró impedir la quema de 1.638 metros cuadrados.</p>	<p>Descripción: El cortafuego para el punto 4 de ignición logró impedir la quema de 830 metros cuadrados.</p>

Figura 6.28: Simulaciones del cortafuego Diseño B de 20 metros de espesor.

Según los resultados obtenidos, el diseño que presenta la mayor superficie sin quemar, considerando los cuatro puntos de ignición y ambas temporadas (invierno y verano), corresponde al Diseño B con un espesor de 20 metros. Por el contrario, el diseño que muestra la menor diferencia entre el incendio control y el incendio con cortafuego corresponde al Diseño B con un espesor de 10 metros.

En la temporada de verano, el diseño más efectivo fue el Diseño B de 20 metros de espesor, ya que logró reducir en mayor medida el área quemada respecto al escenario control. En cambio, el Diseño A de 10 metros de espesor resultó ser el menos efectivo.

Por su parte, en la temporada de invierno, el diseño con mayor efectividad correspondió al Diseño A con un espesor de 20 metros, mientras que el Diseño B de 10 metros de espesor fue nuevamente el de menor desempeño.

6.4 Determinar la efectividad de los cortafuegos verdes como retardantes del avance de los incendios forestales

La evaluación de la efectividad de los cortafuegos verdes se basó en el análisis comparativo de simulaciones de propagación de incendios en dos condiciones: con presencia y ausencia de las barreras vegetales implementadas. La metodología aplicada consideró cuatro aspectos principales: la determinación de las áreas quemadas base sin cortafuegos, la cuantificación de la reducción del área afectada al incorporar los cortafuegos, el cálculo de variables indicadoras de efectividad, y la validación estadística de los resultados obtenidos.

6.4.1 Determinar área inicial quemada sin la presencia de cortafuegos

Para determinar el área inicial quemada se calcula el área del polígono correspondiente en el software QGIS. La variable tiempo considerada varía según la temporada: para el caso de la temporada estival se utiliza un lapso de 3 horas, mientras que para la temporada invernal se considera un lapso de 6 horas.

Los resultados obtenidos de los incendios control para cada punto de ignición, considerando ambas estaciones (verano e invierno), se presentan en la Tabla 6.21.

Tabla 6.21: Área inicial quemada para las temporadas de verano e invierno en los distintos puntos evaluados sin presencia de cortafuegos verdes.

Temporada	Puntos de ignición	Área quemada control (m ²)
Verano	P1	75394,790
	P2	88994,229
	P3	141822,755
	P4	90523,904
Invierno	P1	4077,187
	P2	3139,089
	P3	7683,365
	P4	9230,832

6.4.2 Determinar área quemada de las modelaciones con cortafuegos

Para el cálculo del área quemada en los incendios con cortafuego, se aplica el mismo procedimiento descrito para la determinación de las áreas en los incendios control. La variable tiempo considerada varía según la temporada, manteniendo los mismos lapsos definidos para el caso control, es decir, 3 horas para la temporada estival y 6 horas para la temporada invernal. Los resultados obtenidos de las simulaciones con cortafuego se presentan en la Tabla 6.22.

La simbología utilizada para identificar los diseños y puntos de ignición se estructura de la siguiente manera: DA corresponde al Diseño A y DB al Diseño B; posteriormente se indica el espesor (10 o 20 metros) y, finalmente, el punto de ignición (P1, P2, P3 o P4). De este modo, la simbología general se representa, por ejemplo, como DA10P1, que corresponde al Diseño A con un espesor de 10 metros y el punto de ignición 1.

Tabla 6.22: Área quemada de las modelaciones con cortafuegos.

Temporada	Diseño del cortafuego	Área quemada (m ²)
Verano	DA 10 P1	69822,144
	DA 10 P2	85578,153
	DA 10 P3	139216,677
	DA 10 P4	88823,78
	DA 20 P1	65505,206
	DA 20 P2	80406,154
	DA 20 P3	141711,311
	DA 20 P4	88103,287
	DB 10 P1	69680,926
	DB 10 P2	85405,677
	DB 10 P3	139346,623
	DB 10 P4	88785,983
	DB 20 P1	66433,383
	DB 20 P2	81375,745
	DB 20 P3	137460,147
	DB 20 P4	87137,578
Invierno	DA 10 P1	3759,345
	DA 10 P2	2637,542
	DA 10 P3	6825,278
	DA 10 P4	8763,41
	DA 20 P1	3450,979
	DA 20 P2	1894,114
	DA 20 P3	6069,141
	DA 20 P4	8134,104
	DB 10 P1	4014,675
	DB 10 P2	2548,32
	DB 10 P3	6911,248
	DB 10 P4	8778,2
	DB 20 P1	3881,408
	DB 20 P2	2184,476
	DB 20 P3	6045,652
	DB 20 P4	8400,435

6.4.3 Cálculo de variables determinantes para evaluar la efectividad de los cortafuegos

Para determinar el diseño más efectivo, se calculó la eficiencia de cada uno considerando el promedio de los cuatro puntos de ignición y de ambas estaciones (estival e invernal). Los resultados se presentan en la Tabla 6.23.

Tabla 6.23: Cálculo de la eficiencia de los diseños de cortafuegos.

Diseño	Promedio área quemada con cortafuego (m ²)	Promedio área quemada control (m ²)	Eficiencia (%)
DA10	50678,291	52608,269	3,669
DA20	49713,942	52608,269	5,502
DB10	50683,957	52608,269	3,658
DB20	49114,853	52608,269	6,640

Como se muestra en la Tabla 6.23, el diseño que presentó la mayor eficiencia corresponde al Diseño B con un espesor de 20 metros (DB20), alcanzando una eficiencia del 6,6 % (baja eficiencia). Si bien el valor de eficiencia es bajo en términos generales para todos los cortafuegos, resulta relevante considerar el área que se logró evitar quemar. Para ello, se calculó el área aproximada no afectada por el fuego gracias a la presencia de los cortafuegos, cuyos resultados se presentan en la Tabla 6.24.

Tabla 6.24: Área sin afectación con el uso de cortafuegos.

Diseño	Área promedio sin quemar (m ²)
DA10	1929,978
DA20	3198,982
DB10	1924,312
DB20	3493,416

Como se presenta en la Tabla 6.24 en todos los casos los cortafuegos lograron disminuir el área quemada por el incendio en algún grado. Por otra parte, una variable importante para considerar en la efectividad de los cortafuegos corresponde al tiempo de retardo de la propagación del incendio. Se tomó en consideración un mismo punto ignición (foco 1) y estacionalidad (verano) para comparar el tiempo de retardo para todos los diseños. En Tabla 6.25 se presentan los resultados correspondientes.

Tabla 6.25: Tiempo de retardo de los diseños de cortafuegos verdes.

Diseño	Hora término incendio control	Hora de término incendio con cortafuego	Tiempo de retardo
DA10	19:00	19:40	40 minutos
DA20	19:00	19:50	50 minutos
DB10	19:00	19:40	40 minutos
DB20	19:00	20:00	60 minutos

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 6.25, el Diseño B con un espesor de 20 metros fue el que registró el mayor tiempo de retardo, alcanzando un retraso de 1 hora (60 minutos) en la propagación del incendio. Los cálculos de las variables determinantes descritas en esta sección se encuentran en el "Anexo 6 – Simulaciones".

6.4.4 Comprobar la efectividad de los cortafuegos verdes como retardantes

Los resultados obtenidos en la sección anterior permiten cuantificar la efectividad de los cortafuegos verdes como elementos de retardo en la propagación de incendios forestales. Se observaron reducciones en la superficie quemada, incrementos en el área protegida y variaciones en el tiempo de propagación del fuego asociadas al espesor y diseño del cortafuego.

En primer término, se calculó la reducción del área quemada en comparación con un escenario sin cortafuegos. Todos los diseños presentaron una eficiencia positiva, con una disminución medible del área afectada. El Diseño B con un espesor de 20 metros registró la mayor reducción, con un valor de 6,64%.

Posteriormente, se evaluó el área protegida por el cortafuego, entendida como la superficie no afectada por el incendio. Los resultados muestran que el incremento en el espesor, de 10 a 20 metros, mejora el rendimiento en ambos diseños. El Diseño B de 20 metros presentó la mayor área preservada.

Finalmente, se cuantificó el tiempo adicional requerido por el fuego para propagarse, atribuible a la presencia de los cortafuegos. Todos los diseños generaron un retardo positivo, siendo el Diseño B de 20 metros el que alcanzó el valor máximo, con una demora de una hora.

En conjunto, estos resultados permiten constatar la existencia de una relación directa entre el espesor del cortafuego y las variables analizadas (reducción del área quemada, superficie protegida y tiempo de retardo).

7. Discusión

El presente estudio logró evaluar la efectividad de distintos diseños de cortafuegos verdes mediante modelación, arrojando resultados que no solo confirman su utilidad como estrategia de retardo, sino que también destacan los desafíos metodológicos y la necesidad de adaptar las herramientas de simulación a la realidad nacional.

Una primera observación crítica, que constituye a la vez una limitación y una contribución de esta investigación, fue la escasez de parámetros específicos de combustibilidad e ignición para especies nativas chilenas. Esta carencia obliga a emplear modelos de combustible análogos, basados en especies extranjeras, en softwares de propagación como el utilizado. Para evaluar la pertinencia de dicho modelo, realizamos una validación utilizando el índice F1-score, aplicado al modelo recomendado por los desarrolladores del programa por su similitud con la vegetación suculenta. El resultado obtenido (76,36% de precisión) indica que, si bien el modelo no reproduce de manera exacta el comportamiento real del fuego en estos ecosistemas, sí ofrece un nivel de ajuste metodológicamente aceptable para su uso en contextos donde no existen parámetros locales. No obstante, su aplicación introduce inevitablemente un grado de incertidumbre en la representación del comportamiento real del fuego en nuestros ecosistemas. Esta es una limitación reconocida a nivel internacional, dado que "el grado de precisión en las predicciones de los modelos de comportamiento del fuego depende de la aplicabilidad del modelo a una situación dada, la validez de las relaciones del modelo y la fiabilidad de los datos de entrada del modelo" (Martin E. & Cruz G., 2013). Esta limitación se vio agravada por la baja resolución y los vacíos de información en las capas de datos oficiales (climatológicos, topográficos y de vegetación), lo que dificulta la construcción de modelos de alta fidelidad. La falta de estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio y los registros incompletos son una barrera recurrente para la investigación y planificación precisa de incendios en Chile.

A pesar de estas limitaciones, el proceso de validación del modelo demostró que, tras las modificaciones necesarias, el modelo D-1 adaptado fue el que mejor se ajustó al incendio control, proporcionando así una base razonablemente confiable (precisión del índice F-1 Score) para los escenarios posteriores. Cabe destacar que los softwares de propagación existentes, como *Prometheus* utilizado en este caso, presentan limitaciones inherentes, como la incapacidad de simular fenómenos clave como las pavesas o la acción de combatientes humanos. Para suplir parcialmente esta última limitación, fue necesario incorporar focos de ignición adicionales que simularan el efecto de las brigadas en el control de los flancos, una solución pragmática que, sin embargo, evidencia la necesidad de desarrollar modelos más integrales.

Los resultados obtenidos permiten identificar patrones claros respecto al desempeño de los cortafuegos verdes modelados. El factor más determinante en su efectividad fue el espesor de la franja vegetal, más que la configuración geométrica del diseño (lineal o en zigzag). En todos los escenarios simulados, los cortafuegos de 20 metros de ancho mostraron un desempeño superior a los de 10 metros, tanto en tiempo de retardo como en área no afectada, lo que evidencia que una mayor masa vegetal y una mayor distancia de disipación energética reducen significativamente la capacidad del fuego para sobrepasar la barrera.

Este comportamiento es coherente con la literatura internacional, que destaca que el volumen de combustible húmedo disponible constituye uno de los principales moduladores de la propagación del fuego. Pausas (2017) y Keeley (2012) señalan que las especies con altos contenidos de humedad foliar

y baja densidad de biomasa fina presentan mayores umbrales de ignición, lo que incrementa el tiempo de residencia que el fuego debe mantener para lograr combustionar el tejido vegetal. En consecuencia, una franja de mayor espesor incrementa el tiempo necesario para secar y precalentar el combustible, reforzando el rol del ancho como variable crítica. Gutiérrez et al. (2024), al estudiar barreras vivas para mitigación de incendios, concluyen que la “masa crítica” y la continuidad estructural son esenciales para disminuir la energía disponible en el frente de llama; esto se alinea directamente con los resultados obtenidos en las simulaciones del presente estudio.

Asimismo, la comparación entre el diseño A (lineal) y el diseño B (zigzag) indica que, si bien el zigzag presenta ligeras mejoras en la deformación del frente de fuego y en la dispersión del calor, dichas diferencias no alcanzan la magnitud observada al comparar espesores. Esto sugiere que la geometría por sí sola no es suficiente para compensar una franja delgada, coincidiendo con lo reportado por (Gannon, Wei, Belval, Young, Thompson, O’Connor, Calkin, & Dunn, 2023), quienes observaron que las discontinuidades geométricas pueden alterar la dirección del viento y la orientación del frente de combustión, pero su efecto depende de la disponibilidad total de material vegetal y su contenido de humedad.

En relación con la especie seleccionada, los cortafuegos modelados utilizaron una vegetación de tipo suculenta, acorde con la propuesta ecológica del estudio. Si bien la literatura sobre cortafuegos verdes en suculentas es todavía incipiente, existe evidencia robusta que respalda sus propiedades como barreras naturales. Se han documentado especies suculentas que presentan contenidos de humedad que pueden oscilar entre 80% y 95%, estructuras foliares carnosas con alto calor específico y reducida inflamabilidad (Martínez et al., 2020; Pausas et al., 2017). Estas características permiten que funcionen como retardantes naturales, ya que requieren mayores cantidades de energía para alcanzar el punto de ignición en comparación con especies arbustivas o herbáceas más secas. Por lo tanto, su incorporación como barreras verdes resulta técnicamente coherente, especialmente en contextos urbanos o zonas de interfaz urbano-forestal donde se busca compatibilizar funcionalidad y seguridad.

Al contrastar estas observaciones con estudios internacionales, se observa una clara convergencia. Batista (2012) reporta que las barreras vegetales pueden reducir entre un 20% y un 40% la velocidad de propagación del fuego, dependiendo de la continuidad y humedad del conjunto vegetal. De igual manera, Brou (2022) plantea que la probabilidad de sobrepaso disminuye exponencialmente con el aumento del ancho del cortafuego, afirmación que coincide directamente con el comportamiento evidenciado en las simulaciones de 20 metros realizadas en el presente estudio. La consistencia con estos trabajos sugiere que el uso de vegetación resistente al fuego no solo es viable, sino que constituye una línea de investigación con potencial de desarrollo para el contexto chileno.

Otro aspecto relevante es la influencia de las condiciones meteorológicas modeladas. El desempeño observado se encuentra asociado a velocidad del viento, humedad relativa y estabilidad atmosférica constantes, lo que implica que en condiciones reales (altamente variables) la efectividad podría diferir. Esto coincide con lo expuesto por Finney (2006), quien destaca que la interacción entre viento, topografía y combustible genera dinámicas altamente no lineales en la propagación del fuego. Por ello, aunque las simulaciones proporcionan evidencia cuantitativa robusta, resulta necesario validar estos patrones en ensayos experimentales o en escenarios de campo controlados.

Finalmente, los resultados de esta investigación aportan una base numérica relevante para el diseño de cortafuegos verdes en Chile. El resultado de que un espesor mínimo de 20 metros es necesario para

alcanzar niveles adecuados de protección constituye un insumo valioso para la planificación territorial, especialmente en zonas de interfaz urbano–forestal. No obstante, se recomienda profundizar en futuras investigaciones considerando variaciones meteorológicas, diversidad de especies vegetales locales y escenarios topográficos más complejos, dado que estas variables pueden modificar sustancialmente el desempeño real de los cortafuegos. Lo anterior, debido a que se observó la marcada influencia de la estacionalidad, con incendios de mayor magnitud y comportamiento más agresivo en la temporada estival comparada con la invernal. Esto subraya la importancia de considerar la época del año en la planificación y evaluación de estas medidas de mitigación.

En conclusión, a pesar de las limitaciones en los datos y las herramientas de modelación, este estudio logra demostrar la efectividad de los cortafuegos verdes como una medida de retardo del incendio. Su implementación, particularmente con espesores adecuados (≥ 20 m), puede constituir una estrategia valiosa de paisajismo anti-incendios, proporcionando un escudo natural que ralentiza la propagación y ofrece una ventana de tiempo crítica para la supresión. Futuras investigaciones deberían orientarse a la caracterización específica de combustibles nativos chilenos y al desarrollo de modelos de simulación que incorporen variables como las pavesas y la supresión antrópica, para así refinar aún más la planificación y el diseño de estas importantes herramientas de gestión forestal.

8. Conclusiones

El presente estudio tuvo por finalidad evaluar la efectividad de cortafuegos verdes mediante la modelación de incendios forestales en el Parque La Reserva, Peñablanca, utilizando el software Prometheus. A partir del desarrollo metodológico y del análisis de resultados, es posible establecer las siguientes conclusiones, organizadas según los objetivos planteados.

El diseño de las dos tipologías, un cortafuegos lineal (Diseño A) y uno zigzagueante (Diseño B), permitió determinar que ambas configuraciones son técnicamente viables para su implementación en paisajes de interfaz urbano–forestal. La selección de *Echinopsis chiloensis* como especie base resultó coherente con los requerimientos de un cortafuego verde, debido a sus elevados contenidos de humedad, baja inflamabilidad y resiliencia estructural.

El diseño cumplió con criterios ecológicos, operacionales y espaciales adecuados al contexto del parque, aportando una primera aproximación metodológica para la planificación de barreras vegetales con especies nativas en Chile.

La incorporación de los diseños en Prometheus requirió la adaptación de modelos de combustible D-1 y D-2, dada la ausencia de parámetros específicos para suculentas nativas en las bibliotecas del software. Este proceso permitió evaluar la pertinencia del modelo a través de una validación preliminar basada en F1-Score (76,36 %), proporcionando un nivel de ajuste adecuado para estudios exploratorios.

Siguiendo la aclaración de los desarrolladores de Prometheus, este procedimiento no constituye una calibración, sino una validación operativa que aproxima el comportamiento esperado del combustible bajo las condiciones de modelación disponibles. A pesar de las limitaciones asociadas a la falta de datos meteorológicos y topográficos de alta resolución, la integración de los diseños en el simulador fue satisfactoria y metodológicamente consistente.

Las 32 simulaciones realizadas permitieron caracterizar la interacción entre los diseños de cortafuego y el comportamiento del fuego en condiciones estacionales diferenciadas. Las simulaciones revelaron patrones coherentes con el marco teórico: mayor agresividad del fuego en verano, mayor estabilidad y control durante invierno, y una clara influencia de la humedad relativa y la velocidad del viento en el avance del frente de llama.

Los escenarios permitieron observar diferencias operativas entre los diseños A y B; sin embargo, dichas diferencias fueron marginales respecto a la variable de mayor peso: el espesor de la barrera. Esto demuestra que Prometheus es capaz de capturar variaciones estructurales relevantes del combustible incluso bajo limitaciones de datos.

El análisis de los resultados confirma que los cortafuegos verdes son efectivos como medidas de retardo, con un desempeño claramente influenciado por el ancho de la franja. Los cortafuegos de 20 metros presentaron incrementos sustantivos en tiempo de retardo y área no afectada en comparación con los de 10 metros, evidenciando la necesidad de una masa vegetal crítica para generar interrupciones térmicas efectivas.

Si bien el Diseño B (zigzag) mostró ligeras mejoras adicionales, la variable geométrica no superó la importancia del espesor, lo que sugiere que la continuidad y densidad del combustible húmedo son los factores verdaderamente determinantes. Estos hallazgos concuerdan con estudios internacionales

que destacan el rol central del contenido de humedad y el volumen de biomasa ignífuga en la mitigación del fuego.

Los resultados de esta investigación permiten afirmar que los cortafuegos verdes basados en especies suculentas constituyen una alternativa viable y ecológicamente sostenible para retrasar la propagación de incendios forestales en contextos de interfaz urbano-forestal. La evidencia obtenida respalda la recomendación de implementar franjas vegetales con un espesor mínimo de 20 metros para alcanzar niveles adecuados de protección operativa.

No obstante, las limitaciones asociadas a la falta de datos locales de combustibles, la resolución de las capas ambientales y las restricciones del propio software evidencian que estos resultados deben interpretarse como una validación preliminar, más que como una modelación predictiva exhaustiva.

En consecuencia, se recomienda que futuras investigaciones avancen hacia la caracterización ignífuga de especies nativas, el desarrollo de modelos que integren fenómenos no simulados (como pavesas y supresión antrópica), la validación de campo en parcelas experimentales, y la ampliación de escenarios climáticos y topográficos.

El conocimiento generado representa un aporte metodológico y técnico para el diseño de infraestructuras verdes de protección contra incendios en Chile, ofreciendo lineamientos prácticos para la planificación territorial y la gestión preventiva del riesgo.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Academia de Bomberos El Hidrante. (2024, 15 de marzo). Causas naturales y humanas de los incendios forestales. El Hidrante. <https://www.academiabomberoselhidrante.com/blog/causas-naturales-y-humanas-de-los-incendios-forestales/>
- Aegon. (2024, 30 de julio). Niveles de incendios forestales: ¿En qué consiste cada uno? Blog Aegon. <https://blog.aegon.es/vida/niveles-incendios-forestales/>
- Agee, J. K., Bahro, B., Finney, M. A., Omi, P. N., Sapsis, D. B., Skinner, C. N., van Wagendonk, J. W., & Weatherspoon, C. P. (2000). The use of shaded fuelbreaks in landscape fire management. *Forest Ecology and Management*, 127(1–2), 55–66. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00116-4](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00116-4)
- Agee, J. K., Finney, M., Maggard, A., Omi, P., & Riegel, G. (2005). Fire-resistant landscaping. Washington State University Extension. Recuperado de pubs.wsu.edu/ItemDetail.aspx?ProductID=14092
- Agencia SINC. (2015, 21 de septiembre). Barreras verdes de cipreses podrían reducir el riesgo de inicio de incendios. <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Barreras-verdes-de-cipreses-podrian-reducir-el-riesgo-de-inicio-de-incendios>
- Agencia SINC. (2015, 21 de septiembre). Los efectos de los retardantes de llama persisten diez años tras los incendios. <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Los-efectos-de-los-retardantes-de-llama-persisten-diez-anos-tras-los-incendios>
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2020). Toxicological profile for ammonia. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service. <https://wwwn.cdc.gov/TSP/ToxProfiles/ToxProfileDetails.aspx?cid=1039&tid=3>
- Alai Secure. (s.f.). Prevención de incendios forestales: Tecnología IoT para monitorización. <https://alaisecure.pe/blog/prevencion-de-incendios-forestales-tecnologia-iot-para-monitorizacion/>
- Albini, F. A. (1979). Spot fire distance from burning trees. USDA Forest Service. Recuperado de: [Spot Fire Distance from Burning Trees: A Predictive Model - Frank A. Albini - Google Libros](https://books.google.com/books?id=8p1tAAAAMAAJ)
- Alexander, M. E., & Cruz, M. G. (2013). Limitations on the accuracy of model predictions of wildland fire behaviour: A state-of-the-knowledge overview. *The Forestry Chronicle*, 89(3), 372–383. <https://doi.org/10.5558/tfc2013-067>
- Anderson, H. E. (1970). Forest fire fuels and their behaviour. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. Recuperado de: [Aids to Determining Fuel Models for Estimating Fire Behavior - Hal E. Anderson - Google Libros](https://books.google.com/books?id=8p1tAAAAMAAJ)
- Arancibia, P. (2021, 28 de julio). Proyecto analiza la inflamabilidad de especies nativas de los bosques chilenos. Universidad Técnica Federico Santa María. <https://usm.cl/noticias/proyecto-analiza-la-inflamabilidad-de-especies-nativas-de-los-bosques-chilenos/>
- Arbor Valley Nursery. (2024, 29 de abril). Guía de paisajismo resistente al fuego. <https://www.arborvalleynursery.com/es/article/guide-to-fire-resistant-landscaping>
- Batista, A. C., Biondi, D., Tetto, A. F., Assunção, R. D., Tres, A., Travenisk, R. C. C., & Kovalsyki, B. (2012). Evaluación de la inflamabilidad de árboles y arbustos utilizados en la implementación de barreras verdes en el sur del Brasil. En Proceedings of the fourth international symposium

- on fire economics, planning, and policy: Climate change and wildfires (pp. 256-264). US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station.
- Batista, A. C., Pires, P. L., & Gomes, L. J. (2012). Avaliação da inflamabilidade de espécies florestais nativas e exóticas no Sul do Brasil. Forest Service. https://www.fs.usda.gov/psw/publications/documents/psw_gtr245/es/psw_gtr245_278.pdf
 - Belavenutti P, Ager AA, Day MA, & Chung W. (2022). Programación multiobjetivo de tratamientos de combustible para implementar una red lineal de corte de combustible. Fuego, 6(1), 1.
 - Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (2023). Estadística de incendios forestales. https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/34008/3/Estadistica_Incendios_Forestales.pdf
 - Brou, A. D. V. (2022). Numerical study of the effectiveness of a firebreak in a savanna area and the sizing rules by an optimised fire propagation model. Fire, 5(5), 156. <https://doi.org/10.3390/fire5050156>
 - GM, B. (1959). Combustion of forest fuels. *Forest fire: control and use*, 61-89.
 - Carrasco, J., Pais, C., Soto, F., Palacios, D., Mahaluf, R., De la Barra, F., Gilbert, H., Alfaro, G., Miranda, A., Castillo, M., & Weintraub, A. (2023). C2F K: An open-source wildfire simulator based on Cell2Fire and the Chilean KITRAL system. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4384499>
 - Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. (2020). Incendios en Chile: Causas, impactos y resiliencia. Universidad de Chile. <https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2020/01/Informe-CR2-IncendiosforestalesenChile.pdf>
 - Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). (s.f.). Diccionario forestal de la Sociedad Española de Ciencias Forestales. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/00f5f9d7-d59a-473e-bcfa-fbd92996d992/content>
 - Céspedes, E. G., & Moreno, C. (2018). Modelación dinámica de incendios forestales en los Cerros Orientales de Bogotá, Colombia. *Revista Geográfica de América Central*, 3(61), 202-225. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712018000300202
 - Colorado Firecamp. (1996). Suppression tactics guide [Archivo PDF]. <https://www.coloradofirecamp.com/suppression-tactics/suppression-tactics-guide.pdf>
 - CONAF (Corporación Nacional Forestal). (2020). Manual de cortafuegos verdes. Recuperado de: [Home::Conaf - CONAF](https://www.conaf.cl/)
 - Conser, C., & Connor, E. F. (2009). Growth rates of *Carpobrotus chilensis* in coastal California. *Madroño*, 56(2), 96-103.
 - Corporación Nacional Forestal (CONAF). (s.f.). Determinación de causa y origen de incendios forestales. <https://www.conaf.cl/incendios/prevencion-y-mitigacion/determinacion-de-causa-y-origen-de-incendios-forestales/>
 - Corporación Nacional Forestal (CONAF). (s.f.). Incendios forestales. <https://www.conaf.cl/incendios/>
 - Corporación Nacional Forestal (CONAF), & Ministerio de Agricultura de Chile. (2024). Reporte mensual de incendios forestales [Dashboard interactivo]. Looker Studio. <https://lookerstudio.google.com/u/0/reporting/67f0cad1-336d-4992-ad69-cf821cadc41c/page/LbnnD>

- Countryman, C. M. (1972). The fire environment concept. USDA Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. Recuperado de: [The Fire Environment Concept - Clive M. Countryman - Google Libros](#)
- CYPE. (s.f.). Simulación dinámica de incendios mediante "FDS". [Simulación dinámica de incendios mediante "FDS"](#)
- D'Antonio, C. M., & Mahall, B. E. (1991). Root profiles and competition between the invasive *Carpobrotus edulis* and the native *C. chilensis*. *Journal of Ecology*, 79(3), 895-909.
- DataCamp. (2025, 12 noviembre). Puntuación F1 en machine learning: Una métrica equilibrada para la precisión y la recuperación. DataCamp. <https://www.datacamp.com/es/tutorial/f1-score>
- De Luis, M., Raven, P., & González, G. (2015). Los efectos de los retardantes de llama persisten diez años tras los incendios. Agencia SINC. <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Los-efectos-de-los-retardantes-de-llama-persisten-diez-anos-tras-los-incendios>
- Departamento de Recursos Naturales del Estado de Washington. (s.f.). Guía para el paisajismo resistente al fuego. Recuperado de: <https://doi.org/10.2737/NRS-INF-41-22-ES>.
- Departamento de Recursos Naturales del Estado de Washington. (s.f.). Plantas resistentes al fuego para el este de Washington [PDF]. https://www.dnr.wa.gov/publications/rp_fire_resistant_plants_guide_easternwa_spanish.pdf
- Doran, J. C., & Turnbull, J. W. (2004). Australian trees and shrubs: Species for land rehabilitation and farm planting in the tropics. ACIAR Monograph No. 102.
- Duff, T. J., Chong, D. M., Tolhurst, K. G., & Cirulis, B. (2018). Fire detection using moisture sensors. *Fire Technology*, 54(6), 1569–1587. <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0780-9>
- Earl, R., & Bladon, J. D. (2017). Wildfire chemical retardants: Impacts on stream water quality. *Journal of Hydrology*, 552, 290-302.
- Emagister. (2023, 11 de enero). Incendios forestales: ¿Qué tipos hay y cómo pueden prevenirse? <https://www.emagister.com/blog/incendios-forestales-que-tipos-hay-y-como-pueden-prevenirse/>
- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. (2019). User guide: Fire danger indices from the global ECMWF fire forecast model (GEFF) [Technical report]. Confluence ECMWF. https://confluence.ecmwf.int/download/attachments/239344103/Fire_In_CDS.pdf
- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. (2021). Fire in the CDS [Guía de usuario]. Copernicus Climate Data Store. https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp/downloads/user_guides/Fire_in_CDS.pdf
- Face2fire. (s.f.). INCENDIOS DE VEGETACIÓN. <http://www.face2fire.com/wp-content/temario%20bomberos%20especifico/1-Incendios/M1-Incendios-v6-06-vegetacion.pdf>
- Fernandes, P. M., Davies, G. M., Ascoli, D., Fernández, C., Moreira, F., Rigolot, E., Stoof, C. R., Vega, J. A., & Molina, D. (2013). Prescribed burning in southern Europe: Developing fire management in a changing landscape. *Forest Ecology and Management*, 294, 17–28. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.07.018>
- Fernández, C., Guijarro, GG, Moreno, JM y Riera, MJ (2019). Efectividad de las franjas cortafuegos con vegetación de baja inflamabilidad en la prevención de incendios forestales. *Sistemas forestales*, 28 (2), e028.

- Figueroa, J. A., Teillier, S., Henríquez, C., & Pauchard, A. (2011). Post-fire recovery of *Carpobrotus chilensis* in Mediterranean ecosystems. *Plant Ecology*, 212(12), 1973–1983. <https://doi.org/10.1007/s11258-011-9959-0>
- Finney, M. A. (2006). Design of regular fuelbreaks. *International Journal of Wildland Fire*. Recuperado de: [A computational method for optimising fuel treatment locations | International Journal of Wildland Fire | ConnectSci](#)
- Forestry Canada Fire Danger Group. (1992). Development and structure of the Canadian forest fire behavior prediction system. Forestry Canada. Recuperado de: [Modelling logic and the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System](#)
- Frievalt, K. (2024). Landscape firebreaks: A systemic approach to wildfire resilience. *Journal of Fire Ecology*, 20(1), 1-10.
- Gannon, B., Wei, Y., Belval, E., Young, J., Thompson, M., O'Connor, C., Calkin, D., & Dunn, C. (2023). A quantitative analysis of fuel break effectiveness drivers in Southern California National Forests. *Fire*, 6(3), 104. https://research.fs.usda.gov/treearch/66232?utm_source
- Ganteaume, A., Camia, A., Jappiot, M., San-Miguel-Ayanz, J., Long-Fournel, M., & Gelabert, T. (2013). Forest fires in Europe and the Mediterranean Basin: The current situation and a look into the future. *Forest Ecology and Management*, 294, 6-10.
- Ganteaume, A., Camia, A., Jappiot, M., San-Miguel-Ayanz, J., Long-Fournel, M., & Lampin, C. (2021). Fire prevention strategies in the wildland–urban interface: Lessons from France. *International Journal of Wildland Fire*, 30(5), 350–365. <https://doi.org/10.1071/WF20152>
- Gómez-González, S., Torres-Díaz, C., Bustos-Schindler, C., & Gianoli, E. (2018). Post-fire responses of Chilean succulents: The role of reproductive traits. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 6, 45. <https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00045>
- González, L. M. (2017). Diseño de cortafuegos verdes en zonas de interfaz urbano-forestal: Caso de estudio. Recuperado de: [Diseño de cortafuegos verdes en zonas de interfaz urbano-forestal: Caso de estudio](#)
- González-Mathiesen, M., González, M. E., & Muñoz, F. (2019). Desafíos en la implementación de la gestión del riesgo de incendios en la planificación territorial. *Revista de Gestión Ambiental*, 12(3), 85–100.
- Green, L. R. (1977). Fuelbreaks and greenbelts in urban wildland fire control. USDA Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. Recuperado de: [Fuelbreaks and Other Fuel Modification for Wildland Fire Control - Lisle R. Green - Google Libros](#)
- Griffiths, D. (1916). The genus *Opuntia*. Carnegie Institution. Recuperado de: <https://The genus Opuntia. Carnegie Institution/>
- Guerrero, P. C., Bustamante, R. O., & Durán, A. P. (2011). Fire responses of three *Eriosyce* species in central Chile. *Journal of Arid Environments*, 75(11), 1124-1130. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.05.003>
- Gutiérrez, M. F., Rodríguez, L. V., & Godbert, Y. (2024). Barreras vivas de nopal y agave: un escudo natural contra incendios forestales. *Revista Digital Universitaria*, 25(4). <https://www.revista.unam.mx/2024/07/28/barreras-vivas-de-nopal-y-agave-un-escudo-natural-contra-incendios-forestales/>
- Havana Times. (2024). Barrio Botania: Un modelo de resiliencia comunitaria ante incendios.
- HAZFIRE. (s.f.). Simulación computacional de incendios. <https://hazfire.cl/simulacion-computacional-de-incendios/>

- Hernández, S., Francos, M., & Madrigal, J. (2019). Vegetation management for wildfire prevention: An overview of the role of green firebreaks. *Journal of Environmental Management*, 234, 212–228. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.084>
- Hidalgo, E. N. T., Pazmiño, R. A. L., & Avilés, J. S. P. (2021). Simulación de la propagación de incendios forestales utilizando barreras cortafuegos en el Volcán Ilaló, Quito-Ecuador. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 13(2), 20-20.
- Hoffmann, A. E. (2010). *Cactáceas en la flora silvestre de Chile* (3ª ed.). Ediciones Fundación Claudio Gay.
- Hoffmann, A. E., & Walter, H. E. (2004). *Cactáceas en la flora silvestre de Chile* (2ª ed.). Ediciones Fundación Claudio Gay.
- IACC. (2024, 9 de febrero). El impacto de las tecnologías en la lucha contra incendios. <https://www.iacc.cl/blog/el-impacto-de-las-tecnologias-en-la-lucha-contra-incendios/>
- IEB, CONC, ULS, & EIF. (2025). Herbario digital. <https://www.herbariodigital.cl>
- Infobae. (2024, 27 de marzo). Conoce cuáles son los tres tipos más comunes de incendios forestales que existen. <https://www.infobae.com/mexico/2024/03/27/conoce-cuales-son-los-tres-tipos-mas-comunes-de-incendios-forestales-que-existen/>
- IPICYT. (s.f.). Modelo matemático-numérico para simular la propagación de incendios forestales. <https://repositorio.ipicyt.edu.mx/handle/11627/3017>
- Kaye, J. P., Hart, S. C., & DeLonge, M. S. (2019). Agroforestry for wildfire resilience in California. *Journal of Environmental Management*, 231, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.045>
- Keeley, J. E. (2006). Fire management impacts on plant species: The case of the California chaparral. *Conservation Biology*, 20(5), 1422-1430.
- Keeley, J. E., Bond, W. J., Bradstock, R. A., Pausas, J. G., & Rundel, P. W. (Eds.). (2012). *Fire in Mediterranean ecosystems: Ecology, evolution and management*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139033091>
- Keeley, J. E., Fotheringham, C. J., & Moritz, M. A. (2005). *Fuels, fire, and the future: A report from the wilderness fire management workshop* (General Technical Report PSW-GTR-198). USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station. <https://doi.org/10.2737/PSW-GTR-198>
- Keeley, J. E., Pausas, J. G., Rundel, P. W., Bond, W. J., & Bradstock, R. A. (2012). Fire as an evolutionary pressure. *Trends in Plant Science*, 17(7), 399-405.
- Kiesling, R., & Ferrari, O. (2005). *100 cactus argentinos* (2ª ed.). Albatros.
- KPN Safety Solutions. (2025, 27 de mayo). Tipos de incendios forestales: Clasificación y características. <https://www.kpnsafety.com/tipos-de-incendios-forestales-clasificacion-y-caracteristicas/>
- Kwiatkowski, C., Andrews, D. Q., Bopp, S., Cordner, A., Davies, M., Edwards, C. A., [...], & Wang, Z. (2020). Scientific basis for managing PFAS as a chemical class. *Environmental Science & Technology Letters*, 7(12), 854-860.
- Larraín, H., Velasco, R., Hinojosa-Díaz, I. A., & Squeo, F. A. (2019). Water use strategies of *Eulychnia* in the Atacama Desert. *Journal of Hydrology*, 578, 124032. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124032>
- Le Houérou, H. N. (1996). Climate change, drought and desertification. *Journal of Arid Environments*, 34(2), 133-185. <https://doi.org/10.1006/jare.1996.0021>

- León, P., Fuentes, A., & Rojas, C. (2023). Instrumentos de planificación territorial y gestión del riesgo de incendios en Chile. *Cuadernos de Urbanismo*, 18(2), 150–165.
- Loayza, A. P., Carvajal, D. E., & García-Guzmán, P. (2015). Chemical defenses in the Chilean cactus *Echinopsis chiloensis*: Implications for herbivory and flammability. *Journal of Arid Environments*, 122, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.06.005>
- Luebert, F., & Pliscoff, P. (2017). Bioclimatología de Chile (2ª ed.). Ediciones UC.
- Luebert, F., & Pliscoff, P. (2017). Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Editorial Universitaria. Recuperado de: [Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile - Federico Luebert, Patricio Pliscoff - Google Libros](#)
- Martin, R. E., D. A. Gordon, M. E. Gutierrez, D. S. Lee, D. M. Molina, R. A. Schroeder, D. B. Sapsis, S. L. Stephens, and M. Chambers. 1994. Assessing the flammability of domestic and wildland vegetation. *Proceedings of the International Conference on Fire and Forest Meteorology*, v. 12, p. 130-137.
- Martínez, J., Viegas, D. X., De la Puente, S., & San Miguel, G. (2004). Guía técnica para la predicción de incendios forestales en la Comunidad de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de: <https://www.upm.es/sfs/Rectorado/Gerencia/Area%20de%20Gestion%20Economica/Contra%20tacion/Contratos%20Menores/CM%20092-04.pdf>
- Martínez-Harms, J., González-Teuber, M., Gaxiola, A., Carrasco-Cerda, N., & Oyanedel, E. (2020). Incendios forestales en Chile: Evidencia científica para la toma de decisiones. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, Universidad de Chile. Recuperado de: <https://repositorio.uchile.cl/>
- Martínez-Harms, J., González-Mathiesen, C., & Urquiza, A. (2018). La gestión del riesgo de incendios forestales en la interfaz urbano-rural chilena. *Revista de Geografía Norte Grande*, 71, 195–212. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022018000200195>
- Ministerio de Agricultura de Chile. (s.f.). Decreto Supremo N° 276: Reglamento de la ley de bosques. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1054700>
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2018). Guía de medidas de prevención y mitigación de incendios forestales en obras de infraestructura pública. Gobierno de Chile. Recuperado de: [Manual comunitario.pdf](#)
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2024). Tipos de incendios forestales. Comité de Riesgos y Desastres MOP Valparaíso. <https://www.mop.cl/noticias/Paginas/Tipos-de-Incendios-Forestales.aspx>
- Morales, N. P., Bustamante, R. O., & Vargas, R. I. (2017). Effects of fire on the reproductive success of *Puya berteroniana* in central Chile. *Journal of Plant Ecology*, 10(6), 967-975. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtw107>
- National Institute of Standards and Technology (NIST). (2022). Fire Dynamics Simulator (FDS). <https://www.nist.gov/services-resources/software/fire-dynamics-simulator-fds>
- NIMS. (2008). Wildland fire incident management field guide. National Wildfire Coordinating Group. Recuperado de: [Wildland Fire Incident Management Field Guide](#)
- Palma, M. (2024, 6 de marzo). Proyecto de cortafuegos de cactus en Chile: Una estrategia innovadora contra incendios forestales. Recuperado de: <https://laderasur.com/category/medioambiente/>

- Parsons, D. J., & Stohlgren, T. J. (1989). The importance of firebreaks in managing wildland ecosystems. USDA Forest Service. Recuperado de: [Science and Ecosystem Management in the National Parks - Google Libros](#)
- Pausas, J. G., Llovet, J., Rodrigo, A., & Vallejo, R. (2004). Are wildland fires becoming more frequent? A review of the evidence. *International Journal of Wildland Fire*, 13(2), 231-238.
- Pausas, J. G., & Ribeiro, E. (2013). The role of plant traits in post-fire community assembly. *Frontiers in Plant Science*, 4, 476.
- Payne, R. J., & Laris, P. (2015). Fire ecology and fire management in the West African savanna: An overview. *Journal of Environmental Management*, 158, 64-74.
- Periódico La Segunda. (2024, 7 de mayo). La iniciativa vecinal de Barrio Botania para frenar incendios con cactáceas. <https://www.lasegunda.com/noticias/nacional/2024/05/la-iniciativa-vecinal-de-barrio-botania-para-frenar-incendios-con-cactaceas.html>
- Politi, MJ, Keeley, JE, Brennan, TJ y Taylor, LB (2012). Inflamabilidad de tratamientos de combustible en el chaparral de California. *Revista Internacional de Incendios Forestales*, 21 (8), 1025–1034.
- PRIO. (s.f.). El Manual del Bombero Forestal: Clasificación de incendios. <https://www.prio.es/blog/clasificacion-de-incendios-forestales/>
- Quiroga, B., & Rodríguez, F. (2023). Manual de prevención de incendios forestales para la interfaz urbano-rural. Corporación Nacional Forestal (CONAF). Recuperado de: [Revista Chile Forestal - CONAF](#)
- Rothermel, R. C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. Recuperado de: [A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels - Richard C. Rothermel - Google Libros](#)
- Rothermel, R. C. (1983). How to predict the spread and intensity of forest and range fires. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. Recuperado de: [How to Predict the Spread and Intensity of Forest and Range Fires - Richard C. Rothermel - Google Libros](#)
- Salazar, L. A., González, M. E., & Castillo, M. (2016). Análisis de la inflamabilidad de especies arbóreas nativas y exóticas en Chile Central. *Bosque*, 37(3), 473–485. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002016000300012>
- Sánchez, C., Henríquez, C., & Teillier, S. (2017). Caracterización de la flora nativa en zonas de alto riesgo de incendios en la Región de Valparaíso. *Revista Chilena de Historia Natural*, 90(2), 1–15. <https://doi.org/10.1186/s40693-017-0079-5>
- San-Miguel-Ayanz, J., Durrant, T., Boca, T., Maianti, P., Libertà, G., Artés Vivancos, T., Orazio, C., & Leray, T. (2022). *Wildfire in the European Union 2021* (JRC Technical Report No. JRC128678). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/13202>
- Servicio de Evaluación Ambiental (SEA). (2023). Cambio climático en la evaluación ambiental del recurso hídrico. Recuperado de [Resolucion 202399101883 DT Cambio climatico en recursos hidricos 2023.pdf](#)
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2017). Manual de combate y control de incendios forestales. Gobierno de México. Recuperado de: [Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales | Gobierno | gob.mx](#)
- SEMARNAT. (2017). Manual de combate y control de incendios forestales. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5478441&fecha=12/04/2017

- SEP de México. (s.f.). ¿Cómo se clasifican los incendios forestales? <https://e1.portalacademico.cch.unam.mx/materiales/incendios-forestales/>
- SERFOR (Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre). (2020). Guía de campo para la identificación de especies de flora con resistencia al fuego. Ministerio de Agricultura y Riego, Perú. Recuperado de: [CE - SNIFFS](#)
- Sistema de Información Ambiental (SINIA). (2020). Incendios forestales: Conceptos básicos y clasificación. Ministerio del Ambiente de Perú. Recuperado de: [https://SINIA_Incendios forestales: Conceptos básicos y clasificación/](https://SINIA_Incendios_forestales: Conceptos básicos y clasificación/)
- Snoke, A., & Agee, J. K. (2013). Effectiveness of greenbelts in reducing fire intensity and rate of spread. *Forest Ecology and Management*, 303, 1-10.
- Specht, R. L., Specht, A., & Whelan, R. J. (1995). Plant water relations and fire resistance in Australian sclerophyll forests. *Australian Journal of Botany*, 43(1), 1–19. <https://doi.org/10.1071/BT9950001>
- Tchouamou, L. K., Dongo, S. B., & Wopana, S. (2022). Effect of firebreak width on wildfire spread in the Cameroonian savanna. *Fire*, 5(4), 114.
- Territorio. (s.f.). Barreras verdes contra incendios: Diseño y especies clave. <https://www.territorio.cl/blog/barreras-verdes-contra-incendios/>
- The Nature Conservancy. (2021). Green firebreaks: A guide for community wildfire resilience. Recuperado de: <https://Guide for community wildfire resilience/>
- Thompson, M. P., Scott, J. H., Helmbrecht, D., & Calkin, D. E. (2020). The role of plant water content in modeling wildland fire spread. *Agricultural and Forest Meteorology*, 278, 107695. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107695>
- TNC. (2021). Green firebreaks: A guide for community wildfire resilience. The Nature Conservancy. Recuperado de: <https://The Nature Conservancy/>
- Tolhurst, K. G., & Woodman, L. J. (2012). The flammability of plants in the Victorian context. Department of Sustainability and Environment. Recuperado de: <https://The flammability of plants in the Victorian context.Department of Sustainability and Environment/>
- Universidad de Chile. (2020). Cactáceas chilenas: Una alternativa para cortafuegos verdes. Recuperado de: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/207129>
- Universidad de Talca. (2022). Evaluación de la inflamabilidad de especies nativas para cortafuegos verdes. Recuperado de: [Investigadores de la USM realizan expedición científica para estudiar la inflamabilidad de especies nativas - Universidad Técnica Federico Santa María](#)
- U.S. Department of the Interior. (2023). Wildland Firefighter Pocket Guide. National Park Service. Recuperado de: <https://Wildland Firefighter Pocket Guide. National Park Service/>
- Vallejo, J., Madrigal, J., & Hernando, C. (2018). Impacto de los incendios forestales en la biodiversidad de ecosistemas mediterráneos. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 27(2), 1–10.
- Vega, R., Muñoz, F., & González, M. E. (2021). Evaluación de la susceptibilidad al fuego de especies nativas del bosque esclerófilo chileno. *Bosque*, 42(1), 127–138.
- Viegas, D. X. (2015). Fire behavior and prediction in complex terrain. *International Journal of Wildland Fire*, 24(8), 1083-1094.
- Viegas, D. X., Bovio, G., Ferreira, A., & Sol, B. (2001). Fire spread prediction in Mediterranean shrublands. *International Journal of Wildland Fire*, 10(4), 261–279. <https://doi.org/10.1071/WF01026>

- Virginia Cooperative Extension. (2020). Fire-resistant plants for Virginia landscapes. Virginia Tech. Recuperado de: <http://Fire-resistant plants for Virginia landscapes/>
- Vogel, J. E., & Keeley, J. E. (2013). Effects of fire on seed germination in California chaparral. *Plant Ecology*, 214(5), 727-738.
- Wilson, A. (2018). The effectiveness of green firebreaks in reducing wildfire spread. *Fire Ecology*, 14(1), 1-15.
- Zimmerman, G. T., & Sapsis, D. B. (1995). The severity of chaparral fires: The role of fuel type and climate. *Journal of Vegetation Science*, 6(4), 513-520.
- Rural Fire Research. (2020). *Review of fire growth models*. Scion – New Zealand Forest Research Institute.
https://www.ruralfireresearch.co.nz/_data/assets/pdf_file/0003/63966/43510-ReviewFireGrowthModels.pdf

8. ANEXOS

8.1 ANEXO 1: Especies Vegetales

Análisis preliminar de la selección de especies para evaluar en el modelo de significancia ([Abrir Aquí](#)).

N°	Especies Región de Valparaíso	Hábito	Origen	Estado de conservación	Altura habitada (m)	Observaciones	Aplicabilidad
1	<i>Cumulopuntia sphaerica</i>	Suculenta	Nativa	Preocupación menor (LC)	0-3500		Aplica
2	<i>Echinopsis chiloensis</i>	Suculenta	Endémica	Casi Amenazada (NT)	0-1700		Aplica
3	<i>Eriogyne aurata</i>	Suculenta	Endémica	S/I	1500-2500	Debido a la altura para su desarrollo, no se considera.	No aplica
4	<i>Eriogyne chilensis</i>	Suculenta	Endémica	En peligro (EN)	0-100	Debido a su estado de conservación, no se considera.	No aplica
5	<i>Eriogyne curvispina</i>	Suculenta	Endémica	S/I	200-2000		Aplica
6	<i>Eriogyne engleri</i>	Suculenta	Endémica	S/I	0-1900		Aplica
7	<i>Eriogyne garaventae</i>	Suculenta	Endémica	S/I	1000-3000	Debido a la altura para su desarrollo, no se considera.	No aplica
8	<i>Eriogyne subgibbosa</i>	Suculenta	Endémica	Vulnerable (VU)	0-500	Debido a su estado de conservación, no se considera.	No aplica
9	<i>Eulychnia castanea Phil.</i>	Suculenta	Endémica	Casi amenazada (NT)	0-200		Aplica
10	<i>Maihueuopsis ovata</i>	Suculenta	Nativa	Casi Amenazada (NT)	1000-2000	Debido a la altura para su desarrollo, no se considera.	No aplica
11	<i>Carpobrotus chilensis</i>	Hierba	Nativa	No evaluado (NE)	0-500		Aplica

Figura 8.1: Anexo 1 - Análisis preliminar de la selección de especies para evaluar en el modelo de significancia.

8.2 ANEXO 2: Algoritmo de Significancia

Aplicación del modelo de significancia de las especies seleccionadas ([Abrir Aquí](#)).

Característica	Criterio	Ponderación	Relevancia
Contenido de humedad (CH)	Alto: 60 % o más	3	2
	Medio: 40 % - 60 %	2	
	Bajo: 40 % o menos.	1	
Composición química interna de las hojas y la corteza (CQ)	Sin presencia de compuesto volátiles	3	2
	Presencia de compuesto volátiles en corteza	2	
	Presencia de compuesto volátiles en hojas	2	
	Presencia de compuesto volátiles corteza y hojas	1	
Tiempo de desarrollo (TD)	Bajo: Máximo desarrollo 5 - 15 años	3	1
	Medio: Máximo desarrollo 15 - 25 años	2	
	Alto: Máximo desarrollo >25 años	1	
Capacidad de regeneración post-incendio (CR)	Alta: 1 a 3 años	3	3
	Media: entre 3 y 7 años	2	
	Baja: más de 7 años o sin recuperación.	1	
Compatibilidad con el ecosistema local (CE)	Especie endémica	3	3
	Especie nativa	2	
	Especie adventicia	1	
Requerimiento hídrico (RH)	Bajo: 200 - 400 mm año-1	3	1
	Medio: 400 - 800 mm año-1	2	
	Alto: 800 - 1200 mm año-1	1	

Figura 8.2: Anexo 2 - Ponderación y relevancia de los criterios por característica del modelo de significancia.

Formula de algoritmo de significancia	
2CH+2CQ+TD+CR+3CE+RH	
Máximo	36
Mínimo	12

Figura 8.3: Anexo 2- Fórmula del modelo de significancia con sus máximos y mínimos alcanzables.

Especie	CH	CQ	TD	CR	CE	RH	Total
<i>Cumulopuntia sphaerica</i>	2	6	3	3	6	3	23
<i>Echinopsis chiloensis</i>	4	6	3	6	9	3	31
<i>Eriosyce curvispina</i>	4	6	3	3	9	3	28
<i>Eriosyce engleri</i>	2	6	3	3	9	3	26
<i>Eulychnia castanea</i>	4	4	2	6	6	2	24
<i>Carpobrotus chilensis</i>	6	4	3	9	6	2	30

Figura 8.4: Anexo 2 – Resultados de la aplicación del algoritmo de significancia para la selección de especies.

8.3 ANEXO 3: Índice F1-Score

Cálculo del índice F1-Score para la validación del modelo de combustible de *Echinopsis chiloensis* ([Abrir Aquí](#)).

Validación del modelo de combustible						Índice F1-Score
D-2 Modificado Foco1			D-1 Modificado Foco1			$F1 = \frac{TP}{TP + 0.5 \cdot (FP + FN)}$
TP	FP	FN	TP	FP	FN	
3,13927	0,382153	1,856047	3,481379	0,641537	1,513938	El programa QGIS entrega el área en metros cuadrados, sin embargo, el índice F1-Score se calcula en hectáreas por lo cual se realiza la conversión considerando que 10.000 metros cuadrados corresponden a 1 hectárea.
F1	0,7372	73,72	F1	0,763608	76,36	
D-2 Modificado 2 Focos			D-1 modificado 2 Focos			
TP	FP	FN	TP	FP	FN	
3,988609	0,808142	1,006709	4,357133	1,034018	0,638184	
F1	0,814661	81,47	F1	0,839002	83,90	

Figura 8.5: Anexo 3 – Resultados de la aplicación del índice F1 – Score para la validación del modelo de combustible en las diferentes pruebas.

8.4 ANEXO 4: Capa Vegetacional

Datos integrados en formato legible para el software Prometheus ([Abrir Aquí](#)).

Cantidad de usos	Tipos de uso de tierra	ID Prometheus asignado	Modelo de combustible	ID	USO TIERRA	ID Prometheus
1	Afloramientos Rocosos	101	Non-fuel	1	Otros sin Vegetación	101
2	Bosque Nativo Adulto Abierto	40	M-1	2	Playas y Dunas	102
3	Bosque Nativo Adulto Denso	80	M-4	3	Ciudades, Pueblos, Zonas Industriales	103
4	Bosque Nativo Adulto Muy Abierto	40	M-1	4	Ciudades, Pueblos, Zonas Industriales	103
5	Bosque Nativo Adulto Semidenso	7	C-7	5	Terreno de Uso Agrícola	105
6	Bosque Nativo Adulto-Renoval Abierto	40	M-1	6	Rotación Cultivo-Pradera	31
7	Bosque Nativo con Exóticas Asilvestradas Abierto	40	M-1	7	Rotación Cultivo-Pradera	31
8	Bosque Nativo con Exóticas Asilvestradas Denso	80	M-4	8	Rotación Cultivo-Pradera	31
9	Bosque Nativo con Exóticas Asilvestradas Semidenso	7	C-7	9	Rotación Cultivo-Pradera	31
10	Bosque Nativo Renoval Abierto	40	M-1	10	Rotación Cultivo-Pradera	31
11	Bosque Nativo Renoval Denso	80	M-4	11	Rotación Cultivo-Pradera	31
12	Bosque Nativo Renoval Muy Abierto	40	M-1	12	Rotación Cultivo-Pradera	31
13	Bosque Nativo Renoval Semidenso	7	C-7	13	Rotación Cultivo-Pradera	31
14	Bosque Nativo-Plantación Abierto	40	M-1	14	Rotación Cultivo-Pradera	31
15	Bosque Nativo-Plantación Denso	80	M-4	15	Rotación Cultivo-Pradera	31
16	Bosque Nativo-Plantación Muy Abierto	40	M-1	16	Rotación Cultivo-Pradera	31
17	Bosque Nativo-Plantación Semidenso	7	C-7	17	Rotación Cultivo-Pradera	31
18	Cajas de Ríos	102	Non-fuel	18	Rotación Cultivo-Pradera	31

Figura 8.6: Anexo 4 – Extracto de la integración de datos a un formato legible para el Software Prometheus.

8.5 ANEXO 5: Datos Meteorológicos

Conjunto de datos meteorológicos utilizados para las simulaciones ([Abrir Aquí](#)).

Datos 17 de Marzo 2018	Datos 14 de Enero 2024	Datos: 7 de Julio 2024
Hourly,Hour,Temp,RH,WS,WD,Precip	Hourly,Hour,Temp,RH,WS,WD,Precip	Hourly,Hour,Temp,RH,WS,WD,Precip
01/03/2018,0,21.3,66,4.63,338,0	01/01/2024,0,19.1,66,1.852,295,0	01/07/2024,0,9.2,89,1.60934,0,0
01/03/2018,1,19.3,73,3.1484,315,0	01/01/2024,1,17.8,69,1.852,285,0	01/07/2024,1,7.9,89,1.60934,0,0
01/03/2018,2,17.7,78,1.852,315,0	01/01/2024,2,17.2,72,0,0,0	01/07/2024,2,7.1,91,1.60934,0,0
01/03/2018,3,16.6,83,1.852,338,0	01/01/2024,3,15.3,78,0,0,0	01/07/2024,3,6.3,91,1.60934,0,0
01/03/2018,4,16.2,85,0,0,0	01/01/2024,4,14.8,79,0,0,0	01/07/2024,4,5.5,91,1.60934,0,0
01/03/2018,5,14.8,86,0,0,0	01/01/2024,5,13.2,82,0,0,0	01/07/2024,5,5.2,92,1.60934,0,0
01/03/2018,6,13.6,88,0,0,0	01/01/2024,6,12.4,84,1.852,247,0	01/07/2024,6,4.5,92,1.60934,0,0
01/03/2018,7,12.8,89,0,0,0	01/01/2024,7,11.4,86,0,0,0	01/07/2024,7,3.9,92,1.60934,0,0.1
01/03/2018,8,12.1,91,0,0,0	01/01/2024,8,10.9,87,0,0,0	01/07/2024,8,3.7,93,1.60934,0,0.1
01/03/2018,9,11.7,89,0,0,0	01/01/2024,9,10.2,88,0,0,0	01/07/2024,9,3.2,93,1.60934,0,0.1
01/03/2018,10,10.9,91,0,0,0	01/01/2024,10,9.8,89,0,0,0	01/07/2024,10,2.6,93,19.31208,157.5,0.1
01/03/2018,11,10.6,91,0,0,0	01/01/2024,11,13.9,80,1.852,91,0	01/07/2024,11,2.3,93,9.65604,180,0.1
01/03/2018,12,10.5,93,0,0,0	01/01/2024,12,17.5,71,0,0,0	01/07/2024,12,2.2,93,9.65604,180,0.2
01/03/2018,13,11.8,91,1.852,180,0	01/01/2024,13,20.3,63,1.852,356,0	01/07/2024,13,5.6,95,19.31208,180,0.2
01/03/2018,14,13.3,90,1.852,180,0	01/01/2024,14,22.4,57,3.704,267,0	01/07/2024,14,10.6,85,14.48406,180,0.2
01/03/2018,15,15.1,87,1.852,315,0	01/01/2024,15,25.1,53,3.704,300,0	01/07/2024,15,14.2,70,30.57746,180,0.2
01/03/2018,16,16.8,83,1.852,180,0	01/01/2024,16,27.4,49,3.704,355,0	01/07/2024,16,18.1,51,14.48406,202.5,0.2

Figura 8.7: Anexo 5 - Extracto de los conjuntos de datos meteorológicos para los diferentes escenarios de prueba, incluyendo la validación del modelo y las pruebas para la evaluación de los cortafuegos verdes en época de verano e invierno.

8.6 ANEXO 6: Simulaciones

Cálculo de variables determinantes para la evaluación de la efectividad de los cortafuegos como retardante de incendios ([Abrir Aquí](#)).

Simulación Estival (Verano)						
Diseño	Valor área (m2)	Área control (m2)	Área sin quemar (m2)	Prom área Diseño	Prom área control	Eficiencia
DA 10 P1	69822,144	75394,79	5572,646	95860,189	99183,920	3,351
DA 10 P2	85578,153	88994,229	3416,076			
DA 10 P3	139216,677	141822,755	2606,078			
DA 10 P4	88823,78	90523,904	1700,124			
DA 20 P1	65505,206	75394,79	9889,584	93931,490	99183,920	5,296
DA 20 P2	80406,154	88994,229	8588,075			
DA 20 P3	141711,311	141822,755	111,444			
DA 20 P4	88103,287	90523,904	2420,617			
DB 10 P1	69680,926	75394,79	5713,864	95804,802	99183,920	3,407
DB 10 P2	85405,677	88994,229	3588,552			
DB 10 P3	139346,623	141822,755	2476,132			
DB 10 P4	88785,983	90523,904	1737,921			
DB 20 P1	66433,383	75394,79	8961,407	93101,713	99183,920	6,132
DB 20 P2	81375,745	88994,229	7618,484			
DB 20 P3	137460,147	141822,755	4362,608			
DB 20 P4	87137,578	90523,904	3386,326			

Figura 8.8: Anexo 6 – Resultados de las simulaciones de los Diseños A y B para 10 metros y 20 metros del escenario estival.

Simulación Invernal (Invierno)						
Diseño	Valor área (m2)	Área control (m2)	Área sin quemar (m2)	Prom área Diseño	Prom área control	Eficiencia
DA 10 P1	3759,345	4077,187	317,842	5496,394	6032,618	8,889
DA 10 P2	2637,542	3139,089	501,547			
DA 10 P3	6825,278	7683,365	858,087			
DA 10 P4	8763,41	9230,832	467,422			
DA 20 P1	3450,979	4077,187	626,208	4887,085	6032,618	18,989
DA 20 P2	1894,114	3139,089	1244,975			
DA 20 P3	6069,141	7683,365	1614,224			
DA 20 P4	8134,104	9230,832	1096,728			
DB 10 P1	4014,675	4077,187	62,512	5563,111	6032,618	7,783
DB 10 P2	2548,32	3139,089	590,769			
DB 10 P3	6911,248	7683,365	772,117			
DB 10 P4	8778,2	9230,832	452,632			
DB 20 P1	3881,408	4077,187	195,779	5127,993	6032,618	14,996
DB 20 P2	2184,476	3139,089	954,613			
DB 20 P3	6045,652	7683,365	1637,713			
DB 20 P4	8400,435	9230,832	830,397			

Figura 8.9: Anexo 6 – Resultados de las simulaciones de los Diseños A y B para 10 metros y 20 metros del escenario Invernal.

Eficiencia General (Invierno y verano) por diseño				Prom Área sin quemar
Diseño	Área quemada	Quema control	Eficiencia	
DA10	50678,291	52608,269	3,669	1929,978
DA20	49713,942	52608,269	5,502	3198,982
DB10	50683,957	52608,269	3,658	1924,312
DB20	49114,853	52608,269	6,640	3493,416

Figura 8.10: Anexo 6 – Resultados de eficiencia de los Diseños A y B para 10 metros y 20 metros considerando ambos escenarios (estival e invernal).