



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

# EVALUACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN ESPACIAL PARA LA SIMULACIÓN DE INCENDIOS FORESTALES EN CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

RENATO IGNACIO CERDA HERNÁNDEZ

PROFESOR GUÍA:  
Andrés Weintraub Pohorille

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
Jaime Carrasco Barra  
René Garreau Salazar

SANTIAGO DE CHILE  
2023

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL  
POR: RENATO IGNACIO CERDA HERNÁNDEZ  
FECHA: 2023  
PROF. GUÍA: ANDRÉS WEINTRAUB POHORILLE

## **EVALUACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN ESPACIAL PARA LA SIMULACIÓN DE INCENDIOS FORESTALES EN CHILE**

Chile es un país que se enfrenta constantemente al problema de los incendios forestales, teniendo que año a año gestionar recursos para su control y extinción. En general los incendios forestales traen consigo numerosos efectos negativos en el clima, suelo, vegetación, recursos hídricos, paisaje, biodiversidad, entre otros.

En la búsqueda de pasar de políticas de combate y extinción de este tipo de siniestros, a promover la prevención de incendios, es que nacen iniciativas para la simulación de incendios forestales, los cuales integrando variables de la topografía del terreno, el tipo de vegetación del sector (combustible) y variables meteorológicas permiten tener una predicción del avance de incendios, teniendo así una herramienta que permite anteponerse al siniestro, lo que resulta que el trabajo de prevención sea más eficaz.

En el presente trabajo se trabajará con el modelo de simulación de incendios forestales Cell2Fire, buscando representar de una manera realista las variables meteorológicas que este considera para realizar las simulaciones, habilitando al modelo de manera que de pasar de considerar la velocidad de viento, humedad relativa y temperatura como homogéneas, a campos meteorológicos heterogéneos. Este cambio busca representar de una mejor manera el ambiente en el cual se desarrollan los incendios, para de esta manera perfeccionar los parámetros de la simulación y finalmente evaluar si es posible la obtención de mejores cicatrices de incendio (cicatrices con mayor similitud a cicatrices reales) que se traduzcan en mejores políticas preventivas a futuro.

Para el desarrollo de este trabajo se harán uso de diferentes modelos de interpolación para la generación de estimaciones de datos meteorológicos, probando tanto su rendimiento en un punto en particular, como en la generación de cicatrices de incendio, comparando la simulación obtenida con la cicatrices de incendio reales, además de probar diferentes configuraciones que se habilitan al considerar las variables meteorológicas como campos heterogéneos.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Características del proyecto . . . . .	4
1.2. Descripción del problema . . . . .	5
1.3. Objetivos . . . . .	8
1.3.1. Objetivo General . . . . .	8
1.3.2. Objetivos Específicos . . . . .	8
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>9</b>
2.1. Tipos de Incendios Forestales . . . . .	10
2.2. Modelo de combustibles . . . . .	10
2.2.1. KITRAL . . . . .	11
2.3. Modelo Meteorológico . . . . .	13
2.4. Métodos de Interpolación . . . . .	14
2.4.1. Distancia Inversa Ponderada . . . . .	14
2.4.2. Simple Method for Spacial Interpolation of the Wind in Complex Terrain	15
2.4.3. Wind Ninja . . . . .	15
2.5. Cell2Fire . . . . .	16
2.6. Error Cuadrático Medio . . . . .	19
<b>3. Metodología y Desarrollo</b>	<b>21</b>
3.1. Modificaciones Código Cell2Fire . . . . .	21
3.2. Evaluacion Métodos de Interpolación Espacial . . . . .	23
3.3. Simulación de Incendios . . . . .	24
3.3.1. El Portillo . . . . .	25
3.3.2. Incendio Valparaíso . . . . .	25
3.3.3. Bosques Sintéticos: . . . . .	26
<b>4. Resultados y discusión</b>	<b>29</b>
4.1. Resultados Evaluacion Métodos de Interpolación Espacial . . . . .	29
4.1.1. Temperatura y Humedad Relativa . . . . .	29
4.1.2. Magnitud y Dirección del viento . . . . .	31
4.2. Resultados simulación en bosques . . . . .	33
4.2.1. Resultados El Portillo: Comparativa Cell2Fire Original vs Cell2Fire Modificado . . . . .	33
4.2.2. Resultados Valparaíso: Comparación de métodos de interpolación . .	37
4.2.3. Resultados Bosques Sintéticos: Influencia de variables meteorológicas heterogéneas en cicatriz incendio . . . . .	39

4.2.3.1.	Experimento 1: . . . . .	39
4.2.3.2.	Experimento 2: . . . . .	40
4.2.3.3.	Experimento 3: . . . . .	41
4.2.3.4.	Experimento 4: . . . . .	42
<b>5.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>44</b>
<b>6.</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>47</b>
<b>7.</b>	<b>Anexos</b>	<b>49</b>

# Índice de Tablas

2.1.	Tabla tipo de combustibles KITRAL: Pastizales . . . . .	11
2.2.	Tabla tipo de combustibles KITRAL: Matorrales, arbustos y renovales nativos	12
2.3.	Tabla tipo de combustibles KITRAL: Arbolado nativo . . . . .	12
2.4.	Tabla tipo de combustibles KITRAL: Plantaciones Forestales . . . . .	13
3.1.	Caracterización simulaciones de incendio El Portillo con Cell2Fire Original y versión modificada . . . . .	25
3.2.	Caracterización simulaciones de incendio Valparaíso con vientos generados por WindNinja, Inverse Distance Weighted y Palomino and Martin . . . . .	25
3.3.	Caracterización simulaciones de incendio Valparaíso con vientos generados por WindNinja, Inverse Distance Weighted y Palomino and Martin . . . . .	28

# Índice de Ilustraciones

1.1.	Ocurrencia Nacional Histórica 1964 - 2022. Fuente: CONAF . . . . .	1
1.2.	Daño Nacional Histórico 1964 - 2022. Fuente: CONAF . . . . .	3
1.3.	Ocurrencia y Daño Incendios Forestales Decenio 2013-2022. Fuente: CONAF . . . . .	3
1.4.	Ejemplos de configuraciones posibles a representar dirección de viento en Cell2Fire, con <b>A:</b> 0°, <b>B:</b> 315° y <b>C:</b> 53° . . . . .	6
1.5.	Ejemplos de configuraciones posibles a representar dirección de viento en Cell2Fire, con <b>A:</b> 0°, <b>B:</b> 315° y <b>C:</b> 53° . . . . .	7
2.1.	Modelo de Propagación Cell2Fire. De (Pais et al, 2019) . . . . .	18
3.1.	Ejemplo de archivo <b><i>Weather.csv</i></b> . . . . .	22
3.2.	Ubicación estaciones meteorológicas SINCA en Santiago de Chile . . . . .	23
3.3.	Estaciones utilizadas para simulación incendio Valparaíso y punto de ignición . . . . .	26
3.4.	Cicatriz Final Incendio Valparaíso con punto de ignición . . . . .	26
4.1.	RMSE registrado por Estación por método para Humedad Relativa . . . . .	29
4.2.	RMSE registrado por Estación por método para Temperatura . . . . .	30
4.3.	RMSE registrado por Estación para Distancia Inversa Ponderada, Palomino and Martin y WindNinja para Rapidez Viento . . . . .	31
4.4.	RMSE registrado por Estación por método para Dirección Viento . . . . .	32
4.5.	Cicatriz final incendio El Portillo Sim 1: Cell2Fire Original . . . . .	33
4.6.	Cicatriz final incendio El Portillo Sim 2: Cell2Fire Modificado . . . . .	34
4.7.	Árbol de propagación incendio El Portillo Sim 1: Cell2Fire Original . . . . .	35
4.8.	Árbol de propagación incendio El Portillo Sim 2: Cell2Fire Modificado . . . . .	35
4.9.	Cicatriz final incendio Valparaíso utilizando campos de viento generados por IDW . . . . .	37
4.10.	Cicatriz final incendio Valparaíso utilizando campos de viento generados por Palomino and Martin . . . . .	38
4.11.	Cicatriz final incendio Valparaíso utilizando campos de viento generados por WindNinja . . . . .	38
4.12.	Outputs generados Experimento 1: a la izquierda la cicatriz final en bosque homogéneo después de los 10 periodos de simulación; a la derecha el árbol de propagación correspondiente . . . . .	40
4.13.	Outputs generados Experimento 2: a la izquierda la cicatriz final en bosque homogéneo después de los 10 periodos de simulación; a la derecha el árbol de propagación correspondiente . . . . .	41
4.14.	Outputs generados Experimento 3: a la izquierda la cicatriz final en bosque homogéneo después de los 10 periodos de simulación; a la derecha el árbol de propagación correspondiente . . . . .	42

4.15.	Outputs generados Experimento 4: a la izquierda la cicatriz final en bosque homogéneo después de los 10 periodos de simulación; a la derecha el árbol de propagación correspondiente . . . . .	43
7.1.	Ubicación estaciones meteorológicas utilizadas para medir errores de mediciones en Santiago . . . . .	49
7.2.	Ubicación estaciones meteorológicas utilizadas para simular incendio Valparaíso	50

# Introducción

Cuantitativamente hablando, los incendios forestales en Chile constan de un problema con una tendencia a la alza con el paso de los años. Según la Dirección Meteorológica de Chile, la subida de la temperatura media en Santiago es de  $0,14\text{ }^{\circ}\text{C}$  por década. A nivel país, las máximas aumentaron  $0,11\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mientras que las mínimas  $0,10\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>1</sup>. Escenario que preocupa teniendo en cuenta que el cambio climático asoma como principal agente causante de las sequías y falta de precipitaciones en Chile, dos factores que favorecen la expansión de incendios forestales.



Figura 1.1: Ocurrencia Nacional Histórica 1964 - 2022. Fuente: CONAF

La **Figura 1** muestra la ocurrencia histórica de incendios forestales en Chile, lo que evidencia que el combatir y controlar este tipo de siniestros es una problemática constante a nivel país, haciendo imperativo el abordar la problemática desde una perspectiva que acepte la ocurrencia de incendios forestales y a su vez promueva políticas tanto reactivas a la aparición de siniestros como preventivas, poniendo un especial énfasis en estas últimas con el objetivo de minimizar los daños producidos por la propagación sin control del fuego.

Si bien en ocasiones los incendios pueden ser producidos de manera natural (por ejemplo por el impacto de un rayo) y finalmente contribuir al desarrollo de algunas formaciones vegetales, eliminando individuos sobremaduros, estimulando la semillación, abriendo espacios y creando condiciones para la regeneración natural; este no es el caso para Chile en donde

<sup>1</sup> Montes, C. (2019, 21 abril). Cambio climático: el implacable aumento de la temperatura en Chile. La Tercera



toda la vegetación es sensible al fuego y los daños causados por el fuego corresponden no solo a su quema y destucción, sino que terminan afectando al suelo, la fauna, el aire, el ciclo del agua y en general al entorno de del ser humano, siendo muchos y variados los impactos que generan los incendios forestales los cuales dependen de la intensidad, recurrencia y duración. A modo general los efectos negativos pueden separarse en dos categorías: Ecológicos y Socio-económicos.

En cuanto a los impactos ecológicos producidos por incendios se destacan: clima, suelo, vegetación, recursos hídricos, paisajes y biodiversidad. A continuación se presenta un listado que engloba diferentes efectos en estas categorías (Valenzuela & Bueno, 2012) :

**Clima (a pequeña y gran escala):**

- Cambios en los regímenes de vientos
- Aumento de la radiación solar y disminución de la humedad ambiental
- Reducción de la disponibilidad de oxígeno
- Contaminación atmosférica

**Suelo:**

- Erosión y pérdida de suelos
- Deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas de suelo
- Pérdida de nutrientes
- Destrucción de la microfauna

**Vegetación:**

- Muerte de tejidos vegetales, alteraciones fisiológicas y deformaciones
- Incremento de plagas y enfermedades
- Cambios en la sucesión vegetal y entrada de vegetación invasora
- Alteraciones y pérdidas en la regeneración natural

**Recursos hídricos:**

- Alteraciones en las relaciones hídricas
- Aumento de la escorrentía superficial
- Contaminación de las aguas
- Sedimentación y enbancamiento
- Desecación de acuíferos

**Paisaje:**

- Fragmentación
- Desertificación

**Biodiversidad:**

- Pérdida de especies de flora y fauna silvestre
- Migración de animales, aves e insectos
- Rupturas en las cadenas alimenticias y alteraciones en las sucesiones ecológicas

Por otro lado, entre los efectos socioeconómicos se encuentran efectos en la salud pública, con la contaminación de suelos, agua y atmosfera; daños en la propiedad pública y privada;

paralización de procesos productivos; disminución de fuentes de trabajo y pérdidas económicas directas, en donde se destacan el gran gasto que implica el combate de incendios forestales. El volumen de los daños socioeconómicos como ecológicos están directamente relacionados a la magnitud del incendio en cuestión, donde en general aquellos incendios que abarcan una mayor área, provocan daños más severos. En la **Figura 2** es posible evidenciar los daños producidos por incendios forestales, medido en hectáreas abarcadas por año.

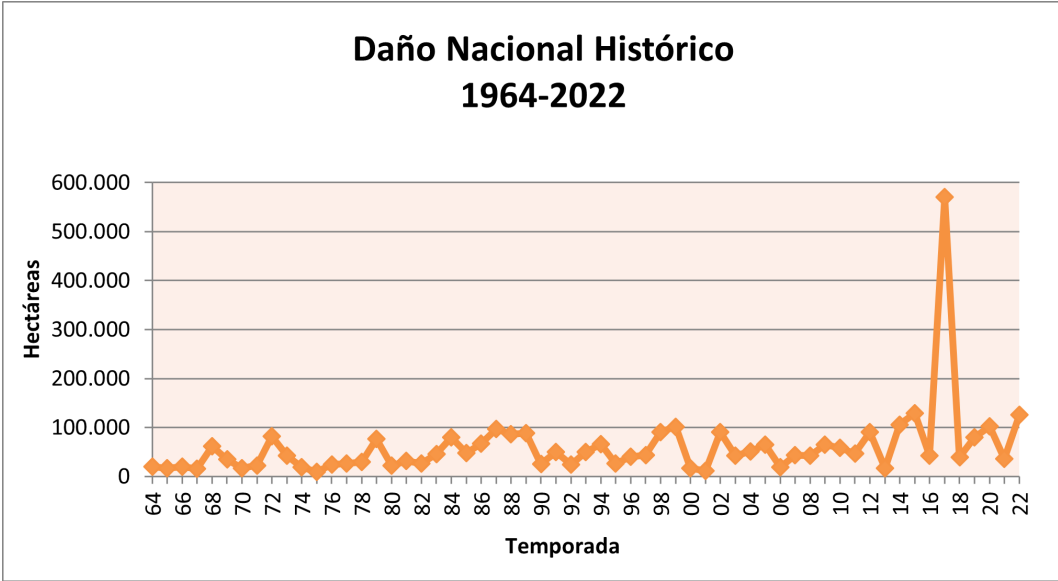


Figura 1.2: Daño Nacional Histórico 1964 - 2022. Fuente: CONAF

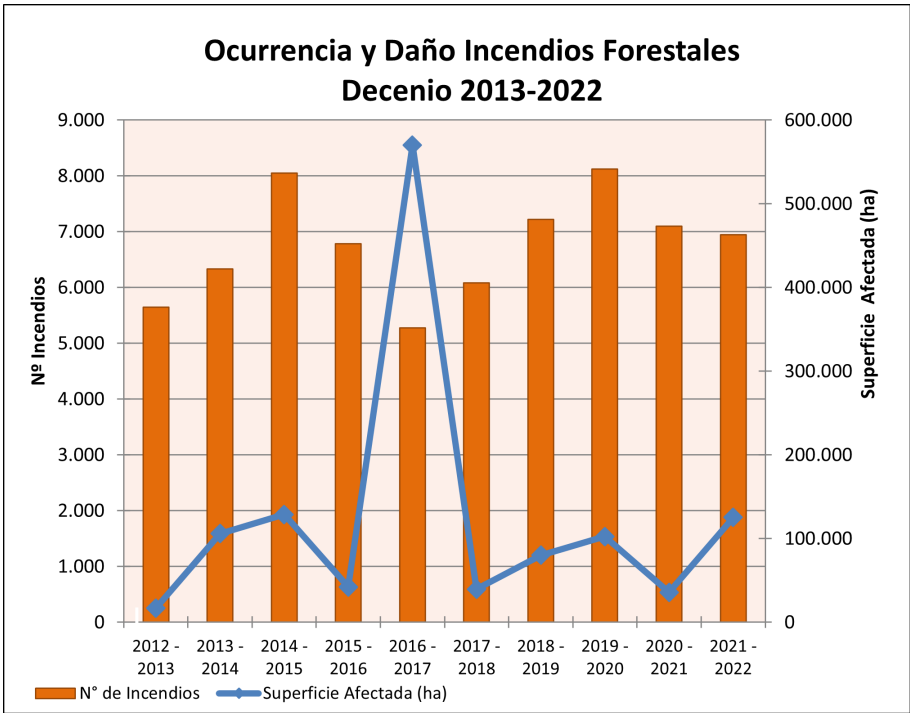


Figura 1.3: Ocurrencia y Daño Incendios Forestales Decenio 2013-2022. Fuente: CONAF

Si se observa la **Figura 1** para el año 2017 se tiene que el número de incendios forestales registrados por CONAF corresponde a  $N_{17} = 5274$ , inferior en relación al año siguiente 2018, registrando  $N_{18} = 6081$ . Sin embargo si se considera en la **Figura 2** el daño producido por los mismos la perspectiva cambia bastante, en donde el área abarcada por los siniestros corresponde a  $A_{17} = 570.197$  ha para el año 2017, cifra más de 14 veces superior a la registrada por CONAF para el año 2018 con  $A_{18} = 39.554$  ha afectadas por el fuego sin control. Esto entrega un indicio de lo variables que pueden ser las magnitudes de los incendios año a año y con ello los daños y costes asociados al combate y cobertura de pérdidas producto de los siniestros. En la **Figura 3** se muestra la comparativa entre la ocurrencia y el daño producido por los incendios forestales para el decenio 2013-2022.

El peak observado en la **Figura 2** corresponde a la denominada "Tormenta de Fuego", megaincendio forestal que se extendió entre el 18 de enero y el 5 de febrero del año 2017, principalmente en las regiones de O'Higgins, el Maule y el Biobío. Los costos directos en que incurrió el Estado durante los megaincendios 2017 bordearon los 243.000 millones de pesos chilenos, de los cuales casi el 78 % corresponde a costos asociados al combate y reconstrucción de viviendas, seguido por los costos del apoyo a la recuperación de sectores productivos. Este valor corresponde solo a una aproximación del verdadero costo económico, ya que sólo incluye los costos incurridos por el Estado (no considerando aportes de privados) y tampoco considera la pérdida de once vidas humanas, la disminución en la provisión de servicios exosistémicos, pérdidas de biodiversidad, y la interrupción en el desarrollo de actividades productivas.

Si bien los daños producidos en 2017 resultan ser un caso aislado teniendo en cuenta los registros históricos de daños de CONAF, si demuestran la gravedad y el profundo impacto negativo que pueden llegar a tener los incendios forestales en Chile. Lo anterior se suma a que a pesar de que sea a menores magnitudes, sí es un problema con el cual se debe lidiar año a año en el país, lo que hace necesaria la generación de políticas preventivas que se enfoquen en evitar la propagación de fuego y minimizar los daños producidos por incendios. Es en esta línea que nace el proyecto "ID20I10137 - Diseño de paisajes resistentes a incendios forestales integrando modelos de simulación, optimización e inteligencia artificial"

## 1.1. Características del proyecto

El presente trabajo de memoria de título está desarrollado dentro de un proyecto de investigación científica y tecnológica: "ID20I10137 - Diseño de paisajes resistentes a incendios forestales integrando modelos de simulación, optimización e inteligencia artificial", proyecto apoyado por el Concurso IDeA I+D el cual es convocado de manera anual por el Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico, Fondef.

Fondef fue creado en 1991 con el propósito de contribuir al aumento de la competitividad de la economía nacional y al mejoramiento de la calidad de vida de los chilenos, promoviendo la vinculación entre instituciones de investigación, empresas y otras entidades, en la realización de proyectos de investigación aplicada y desarrollo tecnológico. Las líneas de acción del fondo corresponden a:

- Apoyo a la generación de capacidades de emprendimiento basado en investigaciones innovadoras desarrolladas por estudiantes egresados de las universidades chilenas, a través

del financiamiento de proyectos basados en resultados de sus tesis de grado o posgrado

- Apoyo a proyectos de investigación y desarrollo aplicada, con alto contenido científico, orientados a generar impactos económicos y/o sociales. Estos proyectos son ejecutados por instituciones de investigación vinculadas con empresas u otras entidades que les otorgan pertinencia

Uno de los instrumentos de apoyo de Fondef corresponde al IDeA, Investigación y Desarrollo en Acción, el cual consta de dos concursos que se convocan anualmente: Concurso IDeA I+D, cuyo objetivo es apoyar proyectos de investigación científica y tecnológica que cuenten con antecedentes previos que sustenten una hipótesis de aplicación de una tecnología, producto o servicio, y que con el desarrollo de la investigación logren su validación a través de una prueba de concepto, modelo o prototipo evaluados en condiciones de laboratorio o pequeña escala en el plazo de dos años; y el Concurso de Investigación Tecnológica, el cual apoya proyectos de I+D orientados a mejorar y evaluar resultados en condiciones cercanas a la aplicación definitiva. Los proyectos deben contar con resultados previos que validen una prueba de concepto.

El proyecto “ID20I10137 - Diseño de paisajes resistentes a incendios forestales integrando modelos de simulación, optimización e inteligencia artificial” fue presentado al Concurso IDeA I+D por la Universidad de Chile, siendo uno de los proyectos escogidos dentro del concurso y cuyos objetivos se presentan a continuación:

**Objetivo general:** Desarrollar un sistema de apoyo a toma de decisiones en la localización de tratamientos de manejo de combustibles para el diseño de paisajes resistentes a incendios forestales integrando modelos de simulación, optimización e Inteligencia Artificial.

**Objetivos específicos:**

- Construir, analizar y preparar información histórica de incendios forestales ocurridos en Chile
- Desarrollar modelos de igniciones y propagación de incendios forestales en función de las condiciones territoriales y climatológicas del país
- Formular modelos de optimización que incluyan variables de decisión de manejo silvicultural y de cortafuegos, e información de riesgo de incendio
- Integrar modelos de ignición, propagación, modelos de decisión y tecnologías SIG, en un sistema para tomar decisiones de diseño de paisaje
- Validar las soluciones propuestas por el sistema integrado en áreas piloto mediante la comparación con otro tipo de soluciones

## 1.2. Descripción del problema

Cell2Fire es un Simulador de incendios forestales que permite predecir el crecimiento de incendios reales y sintéticos. Como se verá mas adelante, para la realización de las simulaciones, el programa necesita de un conjunto de datos que describan el terreno (latitud, longitud, pendiente, tipo de combustible, etc) y las condiciones bajo las cuales se simulará la propagación de fuego, como velocidad del viento, dirección del viento, temperatura, entre otros parámetros. Estas variables describen cada una de las celdas que representan el bosque y sus condiciones, de manera que existen parámetros que se mantienen “constantes” a lo largo de la simulación, las medidas que describen el terreno, y por otro lado magnitudes que varían

en cada periodo de la simulación, las cuales corresponden a las condiciones meteorológicas.

La versión actual de Cell2Fire permite que en cada paso de tiempo simulado cambien estas condiciones, sin embargo dentro de un mismo instante la magnitud del parámetro en cuestión será la misma para cada una de las celdas, por lo que se para cada periodo de simulación sólo se consideran campos homogéneos para cada medida meteorológica utilizada, lo que deriva en que configuraciones del tipo donde cierta porción del bosque el viento tenga una magnitud y sentido y en la restante tenga otra magnitud y sentido completamente diferente, no puedan ser representadas dentro de un mismo periodo de simulación. Este supuesto de viento homogéneamente distribuido funciona de una buena manera en terrenos llanos con una topografía poco variable, caso contrario al de Chile en donde se destacan tres regiones principales: la cordillera de los Andes al este, la costa del Pacífico al oeste y la depresión intermedia entre ellas, que suponen terrenos complejos y con una alta diversidad de paisajes, que influyen muchas veces en la magnitud y sentido de los vientos (pudiendo ocurrir cambios radicales en este último) como en otras magnitudes meteorológicas.

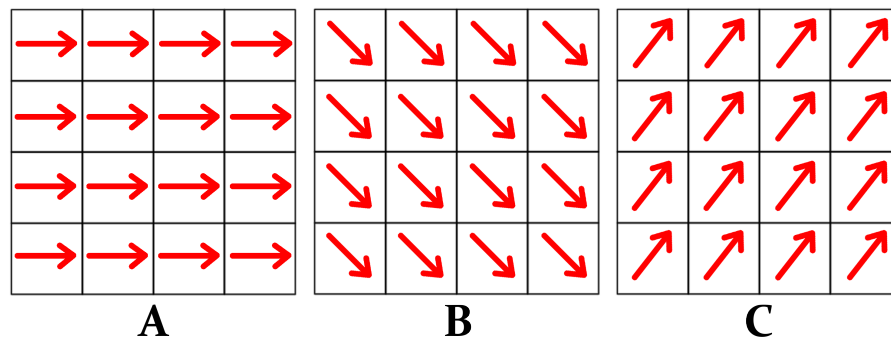


Figura 1.4: Ejemplos de configuraciones posibles a representar dirección de viento en Cell2Fire, con **A**:  $0^\circ$ , **B**:  $315^\circ$  y **C**:  $53^\circ$

Si se observa la **Figura 1.4**, esta puede ser una representación de la dirección del viento en una simulación de la versión actual de Cell2Fire, la cual oscila entre  $0^\circ$  y  $359^\circ$ , donde **A**, **B** y **C** representan 3 periodos en donde la dirección de viento es diferente, pero igual en magnitud para cada celda del mismo periodo. Un ejemplo de configuración interesante a simular, pero incapaz de ser realizada en la versión actual de Cell2Fire, sería el caso de un bosque en donde una sección del bosque posea una montaña con considerable mayor elevación. Para este ejemplo, el viento no puede traspasar la montaña, por lo que la presencia de esta última provocará cambios en la dirección de viento. En la **Figura 1.5** es posible ver un ejemplo de configuración deseada a poder ser representada para este tipo de casos, en donde el terreno influye en la dirección de viento, lo que eventualmente impacta en la propagación de fuego al ser este un importante controlador de la expansión del siniestro.

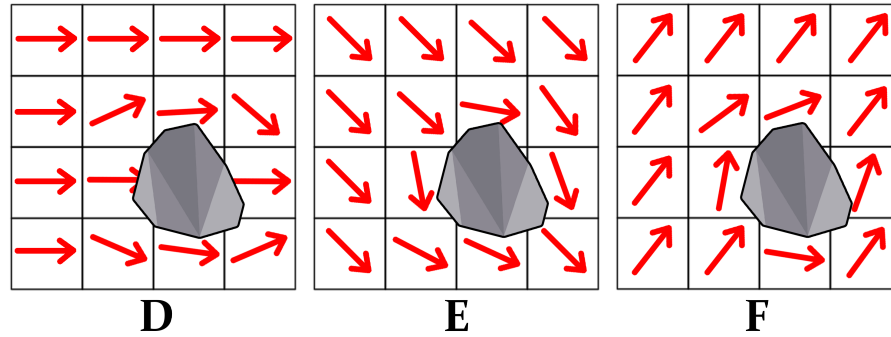


Figura 1.5: Ejemplos de configuraciones posibles a representar dirección de viento en Cell2Fire, con **A**:  $0^\circ$ , **B**:  $315^\circ$  y **C**:  $53^\circ$

Además de la influencia del terreno en el viento, existen distintas condiciones que afectan a las condiciones meteorológicas, como la presencia de cuerpos de agua, como lagos, ríos o el mar, que pueden afectar la temperatura y la humedad de la zona circundante; deforestación que puede afectar la humedad y la temperatura de una zona al cambiar la cantidad de sombra y tipo de suelo; lluvias intensas o sequías prolongadas, que pueden afectar la cantidad de agua en el suelo y en el aire, lo que a su vez puede cambiar la temperatura y humedad de la zona; la urbanización y construcción de edificios y carreteras, que pueden crear islas de calor en áreas urbanas, donde la temperatura es más alta que en las áreas circundantes debido a la acumulación de calor en las superficies urbanas. La presencia de estas condiciones a lo largo del territorio chileno son evidencia de la variabilidad en cuanto a diferentes parámetros meteorológicos.

Teniendo en cuenta los factores anteriormente mencionados, se busca representar de la mejor manera posible las condiciones meteorológicas y su variación en el espacio, esto con el fin de obtener datos de entrada con la mayor exactitud posible para su uso en la simulación de incendios forestales en Chile, que finalmente deriven en una precisa representación de cicatrices de incendio, permitiendo predecir el comportamiento del fuego y por consecuencia idear formas eficientes de combate y prevención que generen valor en cuanto a reducir los costos asociados al control de estos siniestros y toma de acciones expedita e inteligente.

Otros dos factores claves que deben ser tomados en cuenta, son la disponibilidad de registros históricos de datos meteorológicos en periodos de tiempo en donde a la vez se tenga registro de cicatrices de incendio, para eventualmente utilizar Cell2Fire y evaluar el rendimiento de este. Y como segundo factor el establecer un conjunto de procedimientos ordenados y sistemáticos para generar campos heterogéneos de mediciones meteorológicas, de manera de representar de forma lo más cercana a la realidad posible estas condiciones y generar eventualmente mejores cicatrices de incendio. Se busca simular de una manera más fiel a la realidad tanto el avance de los incendios como la cicatriz final de estos pues esto permite plantear políticas tanto preventivas como reactivas que sean efectivas, basando las mismas en una simulación de incendios con un buen grado de confianza, gestionando así de una mejor manera los recursos en la problemática de incendios forestales en Chile.

En cuanto a registros históricos de datos atmosféricos, esto supone distintas dificultades como la disponibilidad o acceso mismo a los datos, valores faltantes en los registros, valores atípicos y presencia de valores atípicos, además de la necesidad de contar con un formato

tanto en la estructura misma de los datos, como para el formato del archivo en sí mismo, que permita trabajar con el simulador.

Finalmente, en cuanto a generar campos homogéneos, se debe tener en cuenta que los modelos más sofisticados para predecir datos atmosféricos implican un gran gasto computacional y tiempo, por lo que es necesario encontrar otro tipo de solución que modele de una forma óptima y con resultados realistas, aquellas condiciones meteorológicas que controlan en mayor parte la propagación de los siniestros: velocidad del viento, dirección del viento, temperatura, humedad relativa y precipitaciones. A lo que se suma que la distribución de estaciones meteorológicas en Chile es escasa y no homogénea, lo que recae en una mayor dificultad a la hora de representar de una manera exacta los datos.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo General**

Integración de campos meteorológicos heterogéneos generados a partir de métodos de interpolación, en la simulación de incendios forestales utilizando Cell2Fire.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

1. Entender el funcionamiento del simulador de propagación de incendios forestales Cell2Fire y su utilidad en la gestión de paisajes ante incendios forestales.
2. Generar simulaciones de propagación de incendio, identificando inputs relacionados con meteorología necesarios para la simulación, cómo afectan estos últimos en los resultados finales (outputs) del modelo de propagación y comprensión de los resultados obtenidos por el mismo.
3. Generar mapas de propagación de incendio, comprendiendo los valores de entrada y salida del modelo y evaluación de los resultados obtenidos por este.
4. Implementación valores de dirección y velocidad de viento heterogéneos
5. Generar simulaciones de propagación de incendio con variables de dirección y velocidad de viento heterogéneas.
6. Evaluación de modelo que integra valores heterogéneos en las variables de velocidad y dirección de viento y comparación de su rendimiento con modelo con dirección y velocidad homogéneas.

# Marco Teórico

Un incendio forestal es un fuego que, cualquiera sea su origen y con peligro o daño a las personas, la propiedad o el ambiente, se propaga sin control en terrenos rurales, a través de vegetación leñosa, arbustiva o herbácea, viva o muerta. Es decir, es un fuego injustificado y descontrolado en el cual los combustibles son vegetales y que, en su propagación, puede destruir todo lo que encuentre a su paso.

El Decreto Supremo N° 733 de 1982 del Ministerio del Interior en Chile establece que la prevención y combate de incendios forestales es responsabilidad del Ministerio de Agricultura, quien delega su ejecución a la Corporación Nacional Forestal (CONAF). CONAF se encarga de garantizar el desarrollo de actividades de protección contra incendios forestales, mientras que a Carabineros de Chile le corresponde la fiscalización y control de todas las normas que regulan estas materias, así como la investigación de las causas de este tipo de siniestros.

En materia de prevención de Incendios Forestales en Chile, CONAF es quien impulsa políticas educativas e impositivas. Para ello establece un conjunto de actividades destinadas a evitar que, por acción u omisión de las personas, se originen incendios forestales, y a intervenir previamente la vegetación para impedir o retardar la propagación del fuego, en el caso que se produzca un incendio. Para ello, CONAF se enfoca en las siguientes áreas de trabajo: investigación, educación y difusión, regulación, protección SNASPE (Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Estado), silvicultura preventiva y quemas controladas.

Misma institución es quien desarrolla actividades de presupresión con el fin de prepararse y actuar en el incendio. Las principales actividades de presupresión son:

- a) Disponer de un sistema de pronóstico del grado de peligro.
- b) Organizar los sistemas de detección de incendios forestales.
- c) Gestionar un sistema de despacho y de coordinación para el combate.
- d) Organizar, equipar y capacitar a la fuerza de combate.

La capacidad operativa que presenta CONAF es de 1.575 brigadistas (temporada 2016-2017). Respecto al ataque aéreo CONAF cuenta con 6 aviones y 1 helicóptero. Además de CONAF, Chile cuenta con sistemas de protección privado, constituido por grandes empresas (CELCO, Forestal Mininco, MASISA y Bosques Cautín), que protegen con recursos propios las plantaciones forestales, principalmente desde la Región del Maule a la de La Araucanía.



## 2.1. Tipos de Incendios Forestales

Se identifican 3 tipos de incendios forestales:

**Incendio de Suelo:** Combustión sin llama o incandescente que consume la capa que se encuentra por debajo de la superficie de hojas recién caídas y suelos orgánicos profundos que resultan de la acumulación de vegetación en descomposición que a menudo ocurre en ambientes con poco oxígeno como humedales y escombros leñosos gruesos. (Reardon, 2019).

**Incendio Superficial:** Incendios que queman combustibles superficiales como hojarasca, restos leñosos caídos y plantas vivas de bajo nivel. Los incendios de superficie son los más comunes, ya que los combustibles superficiales son los más propensos a estar disponibles para la combustión debido a sus características de humedad, cantidad y disposición. La actividad del fuego en la superficie depende de las características del combustible, el clima y la topografía. (Heward, 2019).

**Incendio de Copa:** Incendio que ha ascendido desde el suelo hasta la copa del bosque y se está propagando a través de ella, a menudo en combinación con los combustibles superficiales. En climas templados, suelen ocurrir en bosques de coníferas, pero también son muy comunes en los bosques de eucaliptos de las regiones tropicales y subtropicales. Los incendios de copa son uno de los problemas más graves a los que tienen que enfrentarse los bomberos forestales. Su comportamiento, incluyendo su velocidad de propagación y longitud de la llama, es tan intenso que generalmente impide atacar directamente las llamas en su frente. (Xanthopoulos & Athanasiou, 2020).

## 2.2. Modelo de combustibles

Los modelos de combustible forestal permiten predecir el comportamiento del fuego definiendo, entre otros parámetros, la velocidad de propagación y la longitud de llama. Para ello, se realiza una clasificación según el tipo de flora (combustible) presente en las áreas de estudio de interés, para luego definir según cada tipo de combustible a representar, poder calcular el rate of spread (velocidad de propagación) y la longitud de llama, que dependen de condiciones de humedad, estación del año, condiciones climáticas y topográficas, además del tipo de vegetación que se está quemando.

Dentro de esta memoria se utilizará el simulador de propagación de fuego Cell2Fire (Definido en 2.4) desarrollado dentro del proyecto, y en el cual está implementado el modelo de combustibles KITRAL, desarrollado por el Laboratorio de Incendios Forestales de la Universidad de Chile, con lo cual se han generado tablas y coeficientes específicos que dan cuenta del valor de la velocidad de propagación del fuego en cada tipo de vegetación, y también el grado de dificultad o resistencia al control que expone cada tipo vegetal frente a la realización de una línea de control. A continuación se presentan las correspondientes tablas con las categorías mencionadas y los tipos de vegetación que KITRAL considera.

### 2.2.1. KITRAL

El modelo de combustibles KITRAL (Castillo Soto & Garfias Salinas, 2014) es un modelo de simulación de incendios forestales utilizado en Chile, que permite estimar la propagación del fuego y la intensidad del mismo, en función de las características de los combustibles y las condiciones meteorológicas.

El modelo se basa en una clasificación de los combustibles en tres estratos: herbáceo, arbustivo y arbóreo. Cada estrato se subdivide en clases de diámetro, densidad y altura. Además, se tienen en cuenta factores como la humedad de los combustibles, la velocidad y dirección del viento, la topografía del terreno y la temperatura ambiental.

Para la estimación de la velocidad de propagación del fuego, se utiliza la ecuación de Rothermel, que considera la densidad aparente de los combustibles, la humedad y la velocidad del viento. La intensidad del fuego se calcula a partir de la velocidad de propagación y la energía liberada por unidad de área. A continuación se presenta una tabla con el listado de combustibles considerados por el modelo y sus categorías:

Tabla 2.1: Tabla tipo de combustibles KITRAL: Pastizales

<b>Código</b>	<b>Valor del ráster</b>	<b>Descripción</b>
PCH1	1	Pastizales mesomórficos densos
PCH2	2	Pastizales mesomórficos dispersos
PCH3	3	Pastizales hidromórficos densos
PCH4	4	Pastizales hidromórficos dispersos
PCH5	5	Frutales, viñedos y huertas

Tabla 2.2: Tabla tipo de combustibles KITRAL: Matorrales, arbustos y renovales nativos

Código	Valor del ráster	Descripción
MT01	6	Matorrales y arbustos nativos mesomórficos densos. <sup>a</sup>
MT02	7	Matorrales y arbustos nativos mesomórficos de densidad media a rala
MT03	8	Matorrales y arbustos higromórficos densos
MT04	9	Matorrales y arbustos higromórficos de densidad media a rala
MT05	10	Formaciones con dominancia de colihue o quila ( <i>Chusquea</i> sp.)
MT06	11	Matorrales con dominancia de <i>Ulex</i> , aliaga marina o espino ( <i>Ulex</i> sp.)
MT07	12	Renovales nativos distintos al tipo forestal siempreverde
MT08	13	Renovales nativos del tipo forestal siempreverde

<sup>a</sup> Comprende formaciones compuestas por especies tales como: Litre, Boldo, Quillay, Maqui, Arrayán, Espino, Peumo, Colliguay, Avellano, *Baccharis* spp, Mosqueta.

<sup>b</sup> Comprende formaciones compuestas por las siguientes especies principales: Litre, Boldo, Quillay, Peumo, Maqui, Arrayán, Espino, Colliguay, Avellano, *Baccharis* spp, Mosqueta y Aromo.

<sup>c</sup> Comprende formaciones compuestas principalmente por Radal, Avellano, Pichi, Retamo, Ñirre, Maqui, Quila, Colihue, *Ulex*, Canelo, Roble, Coihue, Tineo, Lingue, Taihuén, Zarzamora y Chaura.

<sup>d</sup> Comprende formaciones compuestas principalmente por Ñirre y Lenga.

Tabla 2.3: Tabla tipo de combustibles KITRAL: Arbolado nativo

Código	Valor del ráster	Descripción
BN01	14	Formación con dominancia de Alerce ( <i>Fitzroya cupressoides</i> )
BN02	15	Formación con dominancia de Araucaria ( <i>Araucaria araucana</i> )
BN03	16	Arbolado nativo denso
BN04	17	Arbolado Nativo de Densidad Media
BN05	18	Arbolado Nativo Ralo

<sup>a</sup> Bosques de tipo RO-RA-CO, Siempreverde, Roble hualo, Lenga, Coihue-Lenga, CO-RA-TE, Alerce-Coihue-Tineo.

<sup>b</sup> Formaciones tales como RO-RA-CO, CO-RA-TE, Siempreverde, Lenga y Coihue-Lenga.

<sup>c</sup> Formaciones tales como Lenga, CO-RA-TE, Siempreverde y Alerce-Canelo-Coihue.

Tabla 2.4: Tabla tipo de combustibles KITRAL: Plantaciones Forestales

Código	Valor del ráster	Descripción
PL01	19	Plantaciones Nuevas de Coníferas (0 a 3 años), sin manejo
PL02	20	Plantaciones Jóvenes de Coníferas (4 a 11 años), sin manejo
PL03	21	Plantaciones Adultas de Coníferas (12 a 17 años), sin manejo
PL04	22	Plantaciones Mayores de Coníferas (sobre 17 años), sin manejo
PL05	23	Plantaciones Jóvenes de Coníferas (4 a 11 años), con manejo
PL06	24	Plantaciones Adultas de Coníferas (12 a 17 años), con manejo
PL07	25	Plantaciones Mayores de Coníferas (sobre 17 años), con manejo
PL08	26	Eucaliptus spp (0 a 3 años)
PL09	27	Plantaciones Jóvenes de Eucaliptus spp (4 a 10 años)
PL10	28	Plantaciones Eucalipto Adultas (>10)
PL11	29	Plantaciones Latifoliadas y Mixtas
DX01	30	Desechos Explotación a Tala Rasa de Plantaciones
DX02	31	Desechos Explotación a Tala Rasa de Bosque Nativo

## 2.3. Modelo Meteorológico

Los modelos numéricos de predicción meteorológica son el núcleo de los pronósticos meteorológicos modernos. Estos corresponden a simulaciones del estado futuro de la atmosfera a lo largo del tiempo, para lo cual se utilizan millones de observaciones a modo de condiciones iniciales para billones de calculos que permiten producir una imagen tridimensional de cómo se verá la atmosfera en algún momento del futuro. Para realizar dichos cálculos se utilizan computadoras masivas que permiten realizarlos a velocidades increíblemente rápidas, lo que habilita generar simulaciones que cubren todo el mundo y pudiendo predecir las condiciones de hasta dos semanas a futuro.

Existen dos tipos de modelos meteorológicos, los modelos regionales y modelos globales. Los primeros de estos cubren un área más amplia y periodos de tiempo más largos, pero generalmente tienen una resolución más baja en comparación con modelos regionales, tanto espacialmente (menos puntos de pronóstico por área determinada) como temporalmente (pronosticos son generados en ventanas de tiempo mayores).

Un modelo meteorológico facilita el pronóstico de las condiciones meteorológicas a futuro y así conocer el tiempo que va a hacer a futuro. Para ello, los modelos meteorológicos emplean programas para analizar una multitud de variables meteorológicas, como temperatura, humedad, nubosidad, viento, radiación solar, presión atmosférica, entre otras.

Por otro lado, los modelos regionales permiten resoluciones mucho más altas y en regiones más reducidas en comparación con modelos globales, además de generar pronósticos para sólo un par de días a futuro. La principal ventaja de este tipo de modelos con una mayor resolución es que permiten observar características que los modelos globales no logran captar.

Ya sea para el caso de modelos globales o regionales, existen diferentes modelos meteorológicos que utilizan diferentes maneras para calcular un pronóstico del tiempo según quien lo desarrolla, lo que a su vez conlleva a que tengan resoluciones diferentes o incluso que la fuente de datos con la que alimentan sus modelos difiera entre modelos.

Considerando que la atmosfera es un sistema caótico, pequeños errores de pronóstico en un futuro cercano, se vuelven en exponencialmente mayores para el largo plazo, haciendo que el pronóstico dentro de una semana del tiempo sea menos preciso que el pronóstico para dentro de unos días. Para controlar esto, se intenta modelar el caos mediante ligeros cambios en las condiciones iniciales ocupadas, realizando múltiples pronósticos para diferentes condiciones iniciales, generando así diferentes escenarios de clima asociados a una correspondiente probabilidad, ayudando a mostrar la incertidumbre en el pronóstico del tiempo.

## 2.4. Métodos de Interpolación

La interpolación espacial es un procedimiento que permite calcular el valor de una variable en una posición del espacio, conociendo los valores de esa variable en otras posiciones del espacio. A continuación se presentan los métodos de interpolación que se utilizarán en este trabajo:

### 2.4.1. Distancia Inversa Ponderada

Inverse Distance Weighting (IDW) es un método de interpolación espacial que se ha utilizado para realizar simulación espacial de viento (Yong et al., 2011; Ozelkan et al., 2016) en puntos en los que no se han hecho mediciones. El método se basa en la idea de que los valores de una variable están más correlacionados con los valores de las ubicaciones cercanas que con los valores de ubicaciones más lejanas.

El proceso de interpolación comienza con la selección de un conjunto de puntos de muestra que tienen valores conocidos de la variable que se está interpolando. Para estimar el valor de la variable en una ubicación no muestreada, el método IDW calcula un valor ponderado de los valores conocidos de la variable en los puntos de muestra cercanos a la ubicación objetivo. La ponderación se realiza en función de la distancia euclidiana entre la ubicación objetivo y los puntos de muestra.

La fórmula general para el método IDW es:

$$\hat{Z}(u_0) = \frac{\sum_{i=1}^N Z(u_i)W_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (2.1)$$

Con  $i = 1, \dots, N$  y  $W_i = d_{0,i}^{-p}$ ,  $i = 1, \dots, N$ .

Donde  $u_0$  es la localización del punto a estimar, y  $u_i$  son las ubicaciones de los puntos conocidos. El valor a estimar  $\hat{Z}(u_0)$  es el promedio ponderado de  $N$  valores conocidos  $Z(u_i)$ . El 'peso' o influencia de cada dato conocido se calcula:  $W_i = d_{0,i}^{-p}$ , donde  $W$  es el peso,  $d$  es la distancia euclidiana entre la ubicación del dato a estimar y los puntos conocidos ( $i$ ), y  $p$  es

un parámetro que controla la forma en que se ponderan los valores de la variable en función de la distancia. Si  $p$  es igual a 1, la ponderación es inversamente proporcional a la distancia; si  $p$  es mayor que 1, la ponderación se vuelve más fuerte para los puntos de muestra cercanos y más débil para los puntos de muestra lejanos. Usualmente se considera  $p = 2$  valor que se utilizará en este trabajo.

En resumen, Inverse Distance Weighting es un método de interpolación espacial que utiliza la distancia euclidiana y la ponderación inversamente proporcional a la distancia para estimar valores de una variable en ubicaciones no muestreadas.

### 2.4.2. Simple Method for Spatial Interpolation of the Wind in Complex Terrain

Método propuesto para la interpolación espacial de campos de viento que considera la elevación del terreno como una variable importante a la hora de realizar la estimación de parámetros en terrenos con una topografía compleja (Palomino & Martín, 1995).

En general este método es una variación de Distancia Inversa Ponderada, pero modificando la función de pesos que define  $W_i$  de forma que se considere la elevación como parámetro en la estimación:

$$\hat{Z}(u_0) = \frac{\sum_{i=1}^N Z(u_i)W_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (2.2)$$

Con  $i = 1, \dots, N$  y la nueva función de pesos:

$$W_i = \frac{1}{|\Delta H(i)|} \quad (2.3)$$

Donde  $|\Delta H(i)| = |H(0) - H(i)|$  con  $H(0)$  la elevación del punto a estimar y  $H(i)$  la elevación de la localización con el valor de viento conocido.

### 2.4.3. Wind Ninja

Windninja corresponde a un programa computacional que permite simular campos de viento. Para ello utiliza un modelo de conservación de masa, el cual busca minimizar el cambio en un campo de viento inicial, por lo que plantea una función que compara las velocidades ajustadas (predicciones) con las velocidades iniciales de los campos de viento. Esta función mide la diferencia al cuadrado entre las dos velocidades en cada punto del espacio en el cual se trabaja. El objetivo es encontrar el mínimo valor posible de esta función, lo que significa que las velocidades ajustadas serán lo más parecidas posibles a las velocidades iniciales (Forthofer et al., 2014).

El modelo utiliza unos parámetros llamados módulos de precisión de Gauss, que controlan la cantidad de cambio que se permite en las direcciones horizontal y vertical. En este caso, se utilizó un valor igual a 1 para ambos módulos, lo que significa que los cambios en el flujo afectaran de igual manera tanto en dirección horizontal como vertical. Sin embargo, también se impone la restricción de que el campo de viento ajustado debe conservar masa.

Esto significa que la suma de las velocidades en cada dirección debe ser constante en todo el espacio considerado. Para resolver este problema, WindNinja utiliza multiplicadores de Lagrange, modifica la función original para tener en cuenta esta restricción adicional, y se busca el mínimo valor de la función modificada. Una vez que se encuentra el campo de ajuste, se calculan las velocidades ajustadas del viento en cada punto del espacio.

En el límite del suelo, se impone una condición de Neumann, lo que significa que la velocidad normal a la superficie del suelo no se ajusta desde su valor inicial, esto se debe a que las velocidades en los nodos del suelo se inicializan en cero, por lo que las velocidades ajustadas también son cero, creando un límite 'impermeable'. Finalmente, para obtener la solución numérica, se utilizan técnicas de elementos finitos, que son un conjunto de métodos matemáticos para resolver ecuaciones diferenciales. Estos métodos descomponen el terreno considerado en pequeñas regiones y calculan las velocidades ajustadas en cada región. De esta manera, se obtiene una solución aproximada del problema original.

En resumen, WindNinja es un modelo avanzado de simulación de flujo de aire que utiliza técnicas de modelado numérico de fluidos para simular el comportamiento del viento en diferentes áreas de interés. El modelo además cuenta con una variedad de factores ambientales y utiliza técnicas avanzadas de modelado para simular con precisión la interacción del flujo de aire con la topografía, la vegetación y otros factores ambientales.

## 2.5. Cell2Fire

Cell2Fire es un simulador de incendios forestales de código abierto desarrollado en Python y C++ que permite al usuario simular la propagación del fuego a través de una cuadrícula que representa el paisaje de un bosque real utilizando variables de entorno del incendio, como el tipo de combustible o elevación de cada celda, puntos de ignición y clima. (Pais et al., 2021)

El paisaje del bosque a simular se mapea como una región rectangular compuesta por N filas y M columnas divididas en una serie de celdas cuadradas de área idéntica donde el tamaño de cada celda depende de la resolución espacial deseada según la escala espacial. Cada celda representa una porción específica del bosque y tiene información con sus características topográficas y del combustible correspondiente.

Cell2Fire simula la propagación del fuego mediante un algoritmo que consulta el estado de todas las celdas a medida que avanza el tiempo, el cual está definido a través de periodos equidistantes. Al final de paso, el estado del incendio y todas las celdas que describen el bosque se actualizan.

Una celda que describe el bosque puede estar en uno de los siguientes estados:

- **Available:** Indica que la celda contiene algún tipo de combustible inflamable (Disponible)
- **Burning:** Representa que la celda tiene fuego activo (Quemándose)
- **Burned:** Celdas por las cuales el incendio ya ha pasado (Quemado)
- **Harvested:** : Representa celdas las cuales son entregadas por el usuario al simulador y no pueden ser quemadas por el incendio (Cortafuego)

- **Non-Fuel:** Celdas cuya superficie es no inflamable, como rios, lagos o rocas (Sin combustible)

Inicialmente, el incendio parte con un punto de ignición. Desde este y en cada período, el fuego puede propagarse a celdas adyacentes (asumiendo que una celda tiene a lo más 8 celdas "vecinas") desde del centro de la celda hasta el centro de una celda vecina. Para determinar esta probabilidad se utilizan las 3 métricas:

- **HROS** Tasa de propagación en la misma dirección del viento *Head Rate of Spread*
- **FROS** Tasa de propagación hacia los costados *Flank Rate of Spread*
- **BROS** Tasa de propagación en la dirección contraria al viento *Back Rate of Spread*

Con dichas métricas se construye un modelo elipsoidal de propagación de fuego, el cual permite determinar mediante su geometría, si el fuego proveniente desde del centro de una celda alcanza a tocar el centro de otra celda vecina, evento que puede cambiar el estado de la segunda a **Burning** (ver Figura 2.1 para observar este modelo de propagación). Para la versión utilizada en el desarrollo de este trabajo, los valores HROS, FROS y BROS son calculados a partir del modelo de combustibles KITRAL, los cuales a su vez definen la forma de la elipse mediante las siguientes ecuaciones:

$$a(W S, t) = \frac{HROS(W S) + BROS(W S)}{2} \cdot t \quad (2.4)$$

$$b(W S, t) = FROS(W S) \cdot t \quad (2.5)$$

$$c(W S, t) = \frac{HROS(W S) - BROS(W S)}{2} \cdot t \quad (2.6)$$

$$e(W S, t) = \frac{c(W S, t)}{a(W S, t)} \quad (2.7)$$

Donde  $a$  corresponde al semieje mayor,  $b$  semieje menor,  $c$  semidistancia focal,  $e$  la excentricidad de la elipse,  $W S$  la velocidad del viento y  $t$  el tiempo transcurrido en cada periodo de la simulación.



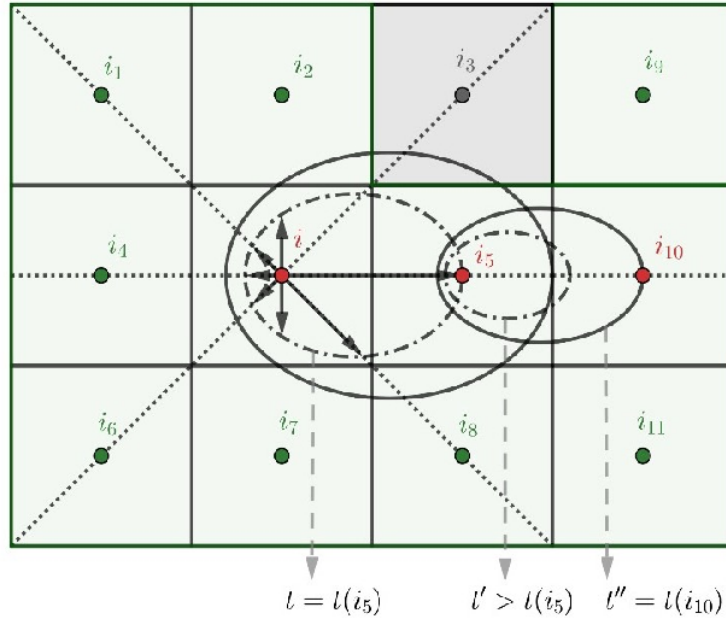


Figura 2.1: Modelo de Propagación Cell2Fire. De (Pais et al, 2019)

El fuego se extiende desde el borde de una celda hasta el centro, cuando llega a este, en caso de que su estado sea **Available** se calcula el ROS en función de las características que definen la celda, si este valor es mayor que un valor especificado por el usuario, la celda pasa al estado **Burning**. El estado del fuego se calcula en cada periodo en función de las celdas **Burning**. En el momento en que  $i$  no existen celdas vecinas en estado **Available** a una celda en estado **Burning**; o  $ii$  valores FROS, BROS Y HROS son menores al parámetro  $\delta > 0$ ; o  $iii$  el combustible de la celda no es suficiente para propagar el incendio; o  $iv$  la intensidad delantera del incendio ( $HROS \cdot t$ ) es menor a un valor dado por el usuario, entonces la celda pasa del estado **Burning** a **Burned** y ya no es tomada en cuenta para el simulador. Este procedimiento continúa durante el tiempo señalado por el usuario o hasta que ya no queden celdas en estado **Available**.

A continuación se presentan los supuestos con los que trabaja el modelo utilizado por Cell2Fire:

1. La propagación del incendio depende del ROS del fuego de una celda hacia otra celda vecina. Se asume que una celda se enciende cuando el fuego alcanza su centro y se cumplen las condiciones de combustión descritas en el punto 5. Además cada celda tiene un máximo de 8 vecinos
2. Las tasas de propagación HROS, FROS Y BROS se calculan en base al modelo de combustibles KITRAL, donde HROS corresponde a la dirección hacia a donde apunta el viento, BROS a la dirección contraria y FROS apunta hacia las direcciones perpendiculares al viento
3. Cada celda que se quema sirve como una nueva fuente de ignición. La propagación del fuego ocurre a un nivel de celdas cuyo tamaño depende de la resolución espacial y los datos disponibles
4. El efecto de supresión del fuego no se modela
5. Existen dos formas para finalizar el crecimiento del fuego dentro del simulador Cell2Fire: A nivel celular y según las condiciones generales de la evolución del incendio. A nivel

celular, una celda termina de quemarse, o pasa a un estado **Burned** si cumple con las siguientes condiciones:

- a) Ya no existen celdas vecinas en estado **Available** a una celda en estado **Burning**
- b) FROS, BROS Y HROS son menores al valor empírico  $\delta > 0$
- c) El combustible de la celda ya no es suficiente para propagar el incendio
- d) La intensidad delantera del incendio ( $HROS \cdot t$ ) es menor a un valor dado por el usuario

A pesar de esto, si la simulación lleva más del tiempo de incendio determinado por el usuario o si ya no quedan celdas combustibles (es decir, no hay celdas en estado **Available**) en el bosque, entonces la simulación se concluye.

Una vez terminada la simulación, Cell2Fire produce 3 resultados: *Burn-Grids*, gráficos y estadísticas.

- **Burn-Grids:** Archivos que representan el bosque simulado en los que indican 1 para las celdas quemadas y 0 para aquellas celdas que no se quemaron o están disponibles para quemar al acabar la simulación. Permiten hacer comparaciones estadísticas con los resultados de otros simuladores o generar mapas de probabilidad de ignición.
- **Gráficos:** Gráficos de estado inicial del bosque y la evolución de la cicatriz de incendio, además de gráficas de comunicación entre celdas quemadas, útiles para identificar qué celdas fueron las que más propagaron el fuego.
- **Estadísticas:** Información sobre el estado final del bosque, como momento de ignición, evolución del fuego (Rate of Spread) número promedio de celdas quemadas/disponibles, porcentaje de celdas no quemadas en una serie de simulaciones, etc.

## 2.6. Error Cuadrático Medio

El error cuadrático medio es una medida utilizada para evaluar la precisión de un estimador, se calcula tomando el promedio de la diferencia al cuadrado entre los valores estimados y los valores reales:

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - Y_i)^2 \quad (2.8)$$

Donde  $ECM$  es el error cuadrático medio,  $n$  el número total de observaciones,  $Y_i$  es el valor real o observado y por último  $\hat{Y}_i$  es el valor predicho por el estimador.

En este trabajo se utilizará el RMSE, que corresponde a la raíz cuadrada del error cuadrático medio, pues tiene la ventaja de estar en las mismas unidades que el valor predicho. Esta medida de error será usada debido a que da un mayor peso a las discrepancias significativas entre las predicciones y los valores reales, pues al elevar al cuadrado se enfatizan y penalizan más los errores grandes. Además, al producir siempre valores no negativos facilita la interpretación y comparación entre los distintos modelos que se utilizarán a lo largo del trabajo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - Y_i)^2} \quad (2.9)$$

# Metodología y Desarrollo

La metodología de este trabajo se separa en una fase de comprensión de Cell2Fire tanto a nivel de modelo como el código desarrollado, de manera de permitirle al mismo recibir grillas de datos meteorológicos. Posterior a esto se evalúan métodos de generación de campos meteorológicos que no impliquen un alto coste computacional, con esto último se descarta la posibilidad de trabajar con modelos meteorológicos como tal, por lo que se pondrán a prueba otros métodos de interpolación espacial de datos meteorológicos. Finalmente se procederá a medir el desempeño de los métodos desempeño por sí mismos en la generación de grillas de datos y en la simulación en sí comparando cicatrices de incendio reales con las generadas. En la sección 3.1 se presentan los principales cambios que se realizaron dentro del código de Cell2Fire, mientras que en la sección 3.2 se expone la manera de evaluar el rendimiento de los modelos por sí mismos. Finalmente en 3.3 se presentan bosques que se utilizarán para generar simulaciones de incendio y evaluar tanto el rendimiento de los modelos para la generación de cicatrices como la sensibilidad de las cicatrices generadas por Cell2Fire a las variables meteorológicas.

## 3.1. Modificaciones Código Cell2Fire

Dentro de los diferentes archivos de entrada que recibe el simulador Cell2Fire se encuentra ***Weather.csv***, donde cada fila corresponde a un periodo de simulación. El archivo contiene la información de las 4 variables meteorológicas utilizadas por el simulador: Velocidad del viento (WS), Dirección del viento (WD), Temperatura (TMP) y Humedad relativa (HR). Además de dos columnas llamadas instancia (variable utilizada sólo en versiones anteriores de C2F) y datetime, que representa la fecha y hora correspondiente a cada entrada de ***Weather.csv***.

Scenario	datetime	WS	WD	TMP	RH
ERA	27-01-2021 14:00	85.389	115.86	20.436	41.722
ERA	27-01-2021 15:00	89.708	112.31	20.824	39.302
ERA	27-01-2021 16:00	75.434	112.46	20.887	37.93
ERA	27-01-2021 17:00	77.556	113.55	20.825	37.807
ERA	27-01-2021 18:00	7.839	103.57	20.211	40.213
ERA	27-01-2021 19:00	67.187	91.915	19.089	45.616
ERA	27-01-2021 20:00	52.168	86.155	17.688	51.684
ERA	27-01-2021 21:00	32.434	87.593	16.255	57.737
ERA	27-01-2021 22:00	1.418	77.617	15.284	61.075
ERA	27-01-2021 23:00	1.096	355.43	14.87	62.205
ERA	28-01-2021 0:00	18.621	297.64	14.005	66.948
ERA	28-01-2021 1:00	22.258	283.97	13.852	65.766
ERA	28-01-2021 2:00	21.133	278.13	13.678	65.542
ERA	28-01-2021 3:00	20.507	277.85	13.358	65.951
ERA	28-01-2021 4:00	3.008	277.73	12.788	68.546
ERA	28-01-2021 5:00	24.677	274.56	12.75	67.56
ERA	28-01-2021 6:00	20.214	277.45	12.685	66.969
ERA	28-01-2021 7:00	26.122	256.97	12.405	67.123
ERA	28-01-2021 8:00	14.291	261.38	12.516	66.764
ERA	28-01-2021 9:00	18.317	141.34	14.126	62.976
ERA	28-01-2021 10:00	43.912	127.79	16.306	49.089
ERA	28-01-2021 11:00	65.858	117.04	17.723	45.059
ERA	28-01-2021 12:00	81.082	113.62	18.429	43.308
ERA	28-01-2021 13:00	83.885	114.62	18.015	45.307
ERA	28-01-2021 14:00	85.594	120.51	18.083	45.24
ERA	28-01-2021 15:00	93.094	121.79	18.495	42.718
ERA	28-01-2021 16:00	75.665	115.72	17.669	45.872
ERA	28-01-2021 17:00	6.84	115.8	16.6	49.994
ERA	28-01-2021 18:00	55.162	116.3	15.631	54.446
ERA	28-01-2021 19:00	47.139	108.62	15.048	57.5
ERA	28-01-2021 20:00	36.765	93.874	13.827	70.74

Figura 3.1: Ejemplo de archivo *Weather.csv*

Como punto de partida dentro de la modificación del código se escoge un formato de disposición de los datos que pueda ser leído por el simulador y que permita que su integración dentro del mismo compatibilice de una buena manera con las funciones descritas en el código, a modo que la alteración del programa no signifique una rectificación completa. De esta manera se optó por trabajar con archivos de texto CSV (Comma-Separated Values) en donde cada fila representa una celda en específico del bosque a simular y cada columna un periodo o 'datetime' donde es registrado el valor de la variable meteorológica. Notar que la implementación de esto significa que se trabajará con 4 archivos distintos, que se corresponde a las 4 mediciones meteorológicas utilizadas, además de que el número de valores a considerar es sustancialmente mayor, pues se pasa de 1 valor para cada  $T$  periodo de simulación, a  $N \cdot T$  valores, y esto para cada variable meteorológica con  $N$  el número de celdas dispuestas en el bosque. Si bien el número de celdas y los periodos de simulación definen la dimensión de

datos que se utilizarán, se destaca que otra medida importante en la simulación es el tamaño de las celdas (cellsize) que representa la longitud del lado de la celda cuadrada y por ende define la resolución con la que se trabajará, la cual normalmente dentro de este trabajo ronda entre los 30 y 100 metros.

## 3.2. Evaluación Métodos de Interpolación Espacial

Para la evaluación de los distintos métodos de interpolación espacial revisados, se utilizaron 100 mediciones consecutivas (1 medición cada una hora, desde 1 de Enero del 2012 a las 1 AM, hasta el 5 de Enero del 2012 a las 4 AM) de 9 estaciones meteorológicas pertenecientes a SINCA (Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire) ubicadas en las comunas de Cerrillos, Cerro Navia, El Bosque, Independencia, La Florida, Pudahuel, Puente Alto y Quilicura, además de otra ubicada en Parque O'Higgins.

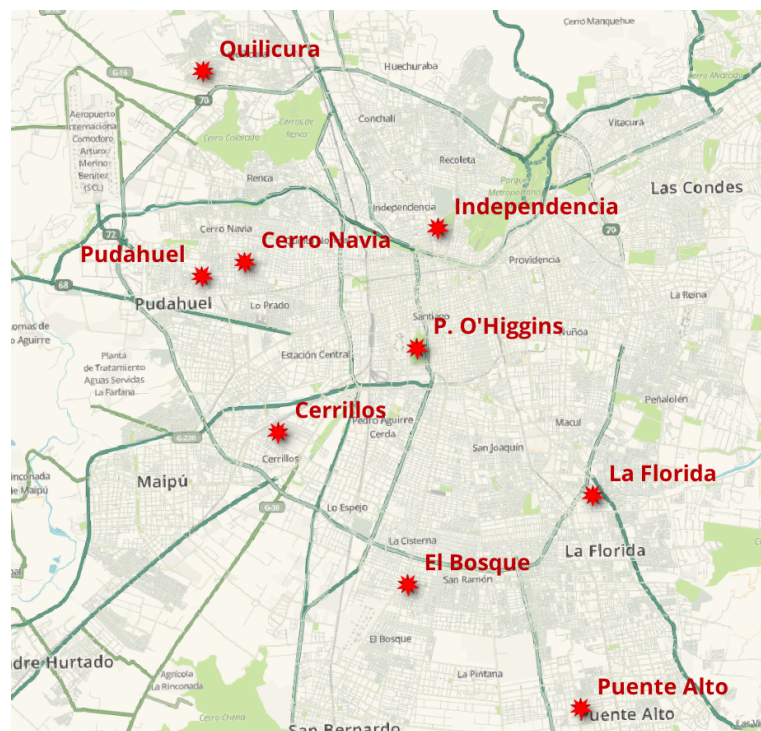


Figura 3.2: Ubicación estaciones meteorológicas SINCA en Santiago de Chile

El proceso para la evaluación de los valores predichos se separó para las variables temperatura y humedad relativa, y para aquellas que describen el viento (Rapidez y dirección de viento) debido a que WindNinja sólo predice el viento. Para la comparación de cada método, se utilizará la raíz del error cuadrático medio, el cual penaliza más errores más grandes. Los distintos métodos se utilizarán de para simular las variables meteorológicas en las ubicaciones respectivas de cada estación meteorológica (Ver Figura 3.2) utilizando para la generación de predicciones las 5 estaciones más cercanas a la ubicación correspondiente, para su posterior comparación con los datos obtenidos por la estación en sí (validación cruzada).

### 3.3. Simulación de Incendios

Se diseñaron tres configuraciones para evaluar las modificaciones realizadas en Cell2Fire y los campos meteorológicos creados. La primera configuración comparará las simulaciones de un siniestro proporcionado por Cell2Fire para generar cicatrices de incendio: 'El Portillo', en Valparaíso, donde para la primera iteración se utilizará Cell2Fire original, el cual no considera campos meteorológicos y la segunda considerándolos como interpolaciones de los mismos datos registrados generados por WindNinja, utilizando Cell2Fire modificado. Se compararán las cicatrices de incendio generadas y los tiempos de ejecución. En este apartado, se limitó la simulación a 50 periodos y no se utilizaron grillas de temperatura y humedad relativa debido al alto de memoria que significó la integración de campos de viento heterogéneo, haciendo imposible abordar más periodos de simulación o considerar temperatura y humedad relativa con el hardware utilizado (procesador AMD Ryzen 5 3500X 6-Core Processor 3.59 GHz y 16 GB de RAM).

En la segunda configuración, se llevará a cabo otra comparación de cicatrices de incendio en la región de Valparaíso. En este caso, se utilizaron las estaciones meteorológicas más cercanas al punto de ignición (Colmo, Viña del Mar, Las Gaviotas, Junta de Vecinos y Concon) para interpolar y generar campos de viento en el bosque considerado con los 3 métodos revisados. Además, se utilizaron variables homogéneas de temperatura y humedad relativa generadas por IDW (método escogido de manera arbitraria) con respecto al punto de ignición. Finalmente se evaluarán los resultados obtenidos por los tres métodos además de su correspondiente comparación.

Finalmente se optó por agregar una última configuración que permitiera ilustrar de manera simple el efecto que tienen las diferentes variables meteorológicas en el avance de incendios, mostrando 4 experimentos en donde en cada uno se considerará una variable meteorológica como campo heterogéneo mientras que las demás serán homogéneas. La meteorología se establecerá invariante a lo largo de los periodos de simulación. El propósito de esta configuración es lograr observar el efecto de cada variable meteorológica por separado a la vez que se ilustran configuraciones que en la versión de Cell2Fire sin modificar no eran posibles de realizar. Además de que debido a las limitaciones computacionales, no fue posible trabajar en los experimentos anteriores con campos meteorológicos para temperatura y humedad relativa. Los bosques utilizados en esta parte serán homogéneos (un sólo tipo de combustible para todas las celdas) y se utilizó PCH5 - Frutales, viñedos y huertas. A continuación se detalla en mayor profundidad las distintas configuraciones:

### 3.3.1. El Portillo

Tabla 3.1: Caracterización simulaciones de incendio El Portillo con Cell2Fire Original y versión modificada

<b>Característica</b>	<b>Sim 1: C2F Original</b>	<b>Sim 2: C2F Modificado</b>
Inicio Simulación	27/01/2021 14:00:00	27/01/2021 14:00:00
Término Simulación	29/01/2021 15:00:00	29/01/2021 15:00:00
Pasos de tiempo	50	50
Resolución bosque	500 x 500 celdas	500 x 500 celdas
Tamaño celdas	30 metros	30 metros
Dirección viento	Homogéneo	Heterogéneo (WindNinja)
Magnitud viento	Homogéneo	Heterogéneo (WindNinja)
Temperatura	Homogénea	Homogénea
Humedad relativa	Homogénea	Homogénea

### 3.3.2. Incendio Valparaíso

Tabla 3.2: Caracterización simulaciones de incendio Valparaíso con vientos generados por WindNinja, Inverse Distance Weighted y Palomino and Martin

<b>Característica</b>	<b>WindNinja</b>	<b>IDW</b>	<b>P&amp; M</b>
Inicio Simulación	17/11/2016 12:00:00	17/11/2016 12:00:00	17/11/2016 12:00:00
Término Simulación	24/11/2016 00:00:00	24/11/2016 00:00:00	24/11/2016 00:00:00
Pasos de tiempo	157	157	157
Resolución bosque	60 x 60 celdas	60 x 60 celdas	60 x 60 celdas
Tamaño celdas	100 metros	100 metros	100 metros
Dirección viento	Heterogéneo	Heterogéneo	Heterogéneo
Magnitud viento	Heterogéneo	Heterogéneo	Heterogéneo
Temperatura	Homogénea	Homogénea	Homogénea
Humedad relativa	Homogénea	Homogénea	Homogénea

Temperatura y humedad relativa homogéneas generadas mediante distancia inversa ponderada. Interpolaciones utilizando registros de estaciones meteorológicas más cercanas con respecto al punto de ignición.

A continuación se presenta un mapa en donde se observa el punto de ignición del incendio en color verde, y en color rojo se observan las estaciones meteorológicas de las cuales se tenía disponibilidad de datos para realizar la interpolación de los mismos para la generación de campos de vientos.





Figura 3.3: Estaciones utilizadas para simulación incendio Valparaíso y punto de ignición

Finalmente se presenta la cicatriz final del incendio, donde la estrella roja corresponde al punto de ignición y el área en café representa las zonas que fueron afectadas por el fuego.

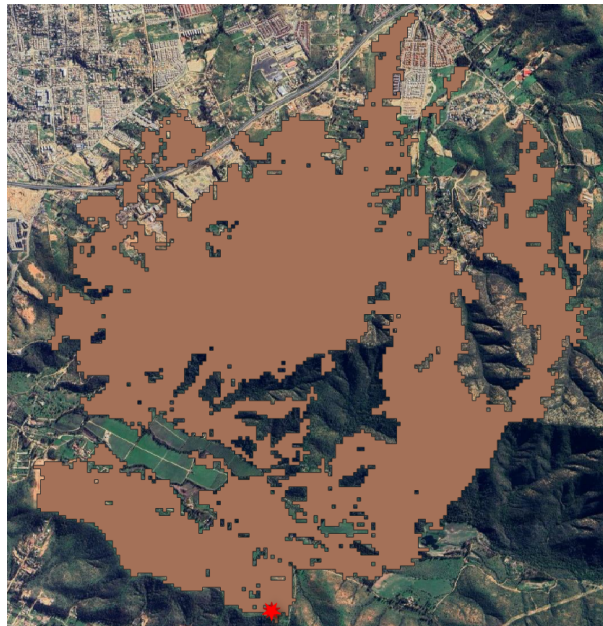


Figura 3.4: Cicatriz Final Incendio Valparaíso con punto de ignición

### 3.3.3. Bosques Sintéticos:

A continuación se presenta el conjunto de 4 configuraciones que servirán para probar la capacidad del simulador Cell2Fire modificado para trabajar con campos meteorológicos, utilizando grillas de temperatura, humedad relativa y viento (dirección y rapidez). Por sim-

plicidad dichos campos meteorológicos serán invariantes en el tiempo. Además se establecerán en general una o dos variables heterogéneas con una estructura simple en donde se dividirá el campo en dos mitades, coincidiendo dentro de una misma mitad todos los valores, pero difiriendo de la otra mitad del campo en cuestión. El resto de variables se considerará como homogénea, todo esto con el objetivo de ilustrar configuraciones imposibles de lograr utilizando campos homogéneos, observar el comportamiento del simulador con campos heterogéneos y finalmente identificar cómo y en qué medida afecta el viento, humedad relativa y temperatura en la propagación de incendios, contemplando el avance de la cicatriz de incendio. Los resultados se muestran en la sección 4.2.3.

1. **Experimento 1:** Simulación durante 10 periodos de bosque de 50x50 celdas, tamaño celda 100 metros, con punto de ignición en la mitad del bosque. Condiciones homogéneas e invariantes en los periodos: humedad relativa (35%), temperatura (30°C) y rapidez del viento ( $30 \frac{km}{h}$ ). Durante todos los periodos en la mitad izquierda del bosque el viento irá de Sur a Norte, mientras que la mitad derecha irá de Norte a Sur. Se busca observar y analizar las cicatrices de incendio generadas.
2. **Experimento 2:** Simulación durante 10 periodos de bosque de 50x50 celdas, tamaño celda 100 metros, con punto de ignición en la mitad del bosque. Condiciones homogéneas e invariantes en los periodos: humedad relativa (35%), temperatura (30°C). Durante todos los periodos en la mitad izquierda del bosque el viento irá de Sur a Norte a  $30 \frac{km}{h}$ , mientras que la mitad derecha irá de Norte a Sur a  $5 \frac{km}{h}$ . Se busca observar y analizar las cicatrices de incendio generadas.
3. **Experimento 3:** Simulación durante 10 periodos de bosque de 50x50 celdas, tamaño celda 100 metros, con punto de ignición en la mitad del bosque. Condiciones homogéneas e invariantes en los periodos: temperatura (30°C), viento de Sur a Norte a  $30 \frac{km}{h}$ . Durante todos los periodos en la mitad izquierda del bosque la humedad relativa se fijará al 35%, mientras que la mitad derecha estará al 70%. Se busca observar y analizar las cicatrices de incendio generadas.
4. **Experimento 4:** Simulación durante 10 periodos de bosque de 50x50 celdas, tamaño celda 100 metros, con punto de ignición en la mitad del bosque. Condiciones homogéneas e invariantes en los periodos: humedad relativa (35%), viento de Sur a Norte a  $30 \frac{km}{h}$ . Durante todos los periodos en la mitad izquierda del bosque la temperatura será de 30°C, mientras que la mitad derecha estará a 60°C. Se busca observar y analizar las cicatrices de incendio generadas.

En la Tabla 3.3 se presenta un resumen de las características de cada uno de los experimentos anteriormente descritos:

Tabla 3.3: Caracterización simulaciones de incendio Valparaíso con vientos generados por WindNinja, Inverse Distance Weighted y Palomino and Martin

<b>Característica</b>	<b>Exp 1</b>	<b>Exp 2</b>	<b>Exp 3</b>	<b>Exp 4</b>
Pasos de tiempo	10	10	10	10
Resolución bosque	50 x 50 celdas	50 x 50 celdas	50 x 50 celdas	50 x 50 celdas
Tamaño celdas	100 metros	100 metros	100 metros	100 metros
Dirección viento	Heterogénea*	Heterogénea*	Homogénea*	Homogénea*
Magnitud viento	Homogénea( $30 \frac{km}{h}$ )	Heterogénea*	Homogénea( $30 \frac{km}{h}$ )	Homogénea( $30 \frac{km}{h}$ )
Temperatura	Homogénea( $30^{\circ}C$ )	Homogénea( $30^{\circ}C$ )	Homogénea( $30^{\circ}C$ )	Heterogénea*
Humedad relativa	Homogénea(35 %)	Homogénea(35 %)	Heterogénea*	Homogénea(35 %)

\* Configuración de la característica explicada en sección 3.3.3.

# Resultados y discusión

## 4.1. Resultados Evaluacion Métodos de Interpolación Espacial

### 4.1.1. Temperatura y Humedad Relativa

En la figura de acontinuación se ilustrarán los resultados de los rendimientos obtenidos para los métodos Distancia Inversa Ponderada y Palomino and Martin al utilizarse para estimar la humedad relativa.

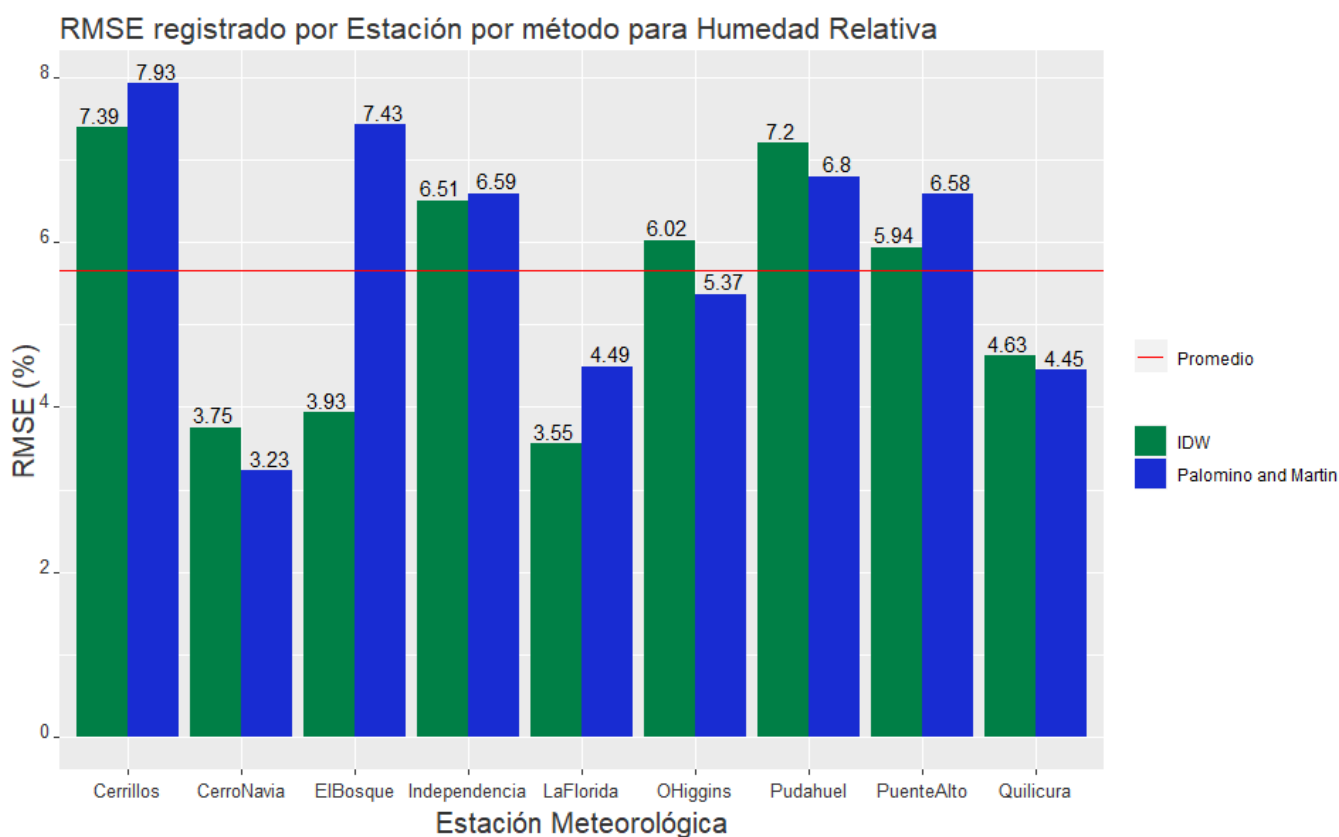


Figura 4.1: RMSE registrado por Estación por método para Humedad Relativa

Para las estimaciones realizadas por IDW se observa que el mayor error registrado es de un 7,39% en la comuna de Cerrillos y alcanza su mínimo en la comuna de La Florida con un valor de 3,55%. Los valores estimados por su contraparte, Palomino and Martin, presentan

un error máximo de 7,93 % en Cerrillos y un mínimo en Cerro Navia con 3,23 %. En general se observa que los rendimientos de ambos métodos para predecir la humedad relativa tienen resultados similares, obteniendo para algunas comunas mejores predicciones IDW y para otras el método desarrollado por Palomino and Martin. Se destaca que la humedad relativa es una variable meteorológica que va desde 0 % hasta un 100 %, por lo que errores de medición del orden de un 8 % si pueden resultar significativos, sin embargo considerando un enfoque de simulación de incendios forestales, los pronósticos de humedad relativa, obtenidos tanto para IDW como Palomino and Martin, pueden resultar en estimaciones útiles.

En la siguiente figura pueden observarse los resultados de rendimiento obtenidos para la variable meteorológica temperatura.

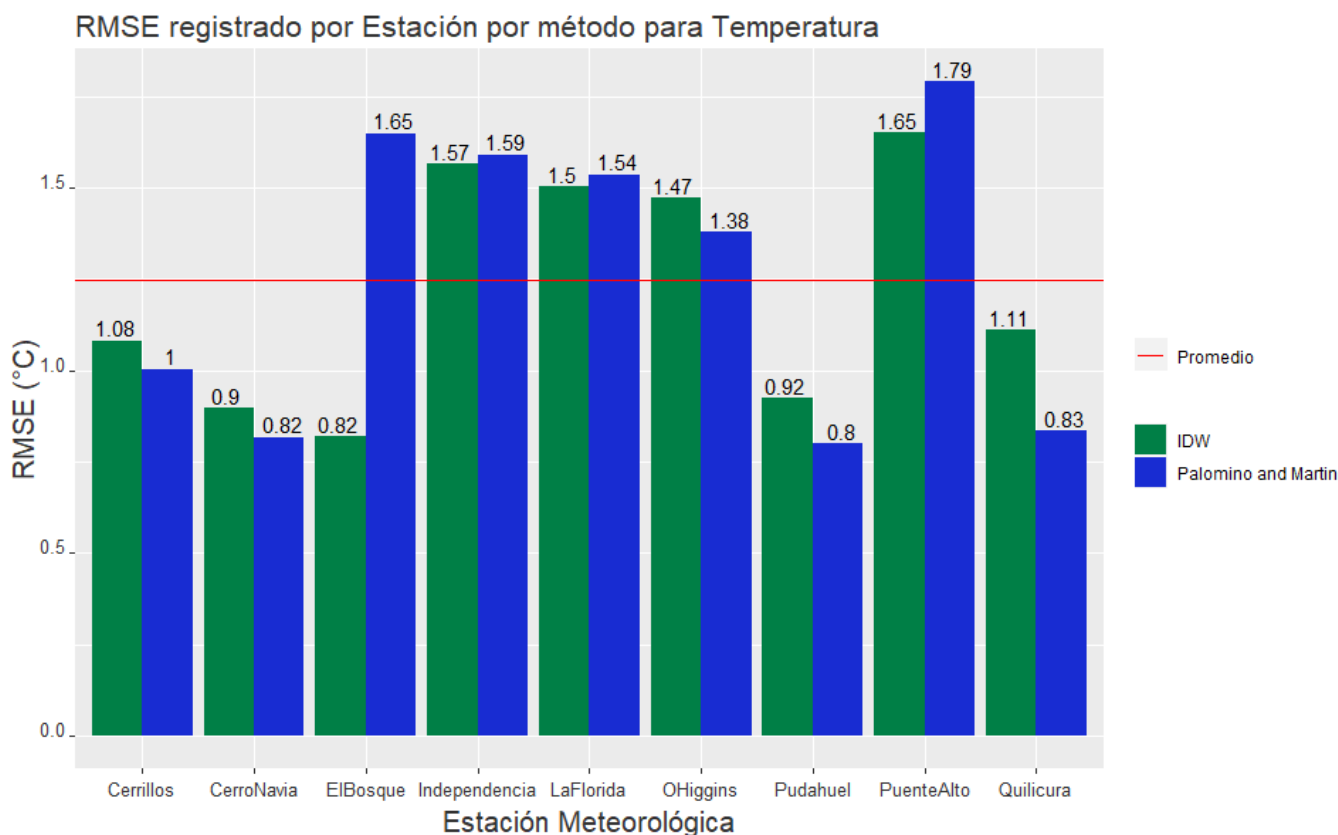


Figura 4.2: RMSE registrado por Estación por método para Temperatura

Para este caso se observa que los máximos errores registrados se obtuvieron ambos en la comuna de Puente Alto (1,65°C para IDW y 1,79°C para Palomino and Martin) y alcanzando errores mínimos cercanos a 0,8°C. En general estos resultados pueden considerarse como buenas aproximaciones de la temperatura considerando que al menos para el caso de Santiago de Chile las temperaturas normalmente varían de 3°C hasta 30°C en el transcurso de un año, convirtiendo a ambos métodos en estimadores aceptables para la generación de campos de temperatura en la simulación de incendios forestales.

### 4.1.2. Magnitud y Dirección del viento

Para el caso de las variables meteorológicas que describen el comportamiento del viento (magnitud/rapidez y dirección) también se consideró como método de estimación WindNinja. A continuación se presentan los errores obtenidos por cada método para la variable rapidez del viento. Las barras de color verde corresponden a los errores registrados utilizando Distancia Inversa Ponderada, en color azul los resultados para el método propuesto por Palomino & Martin y finalmente en color amarillo los registros de WindNinja.

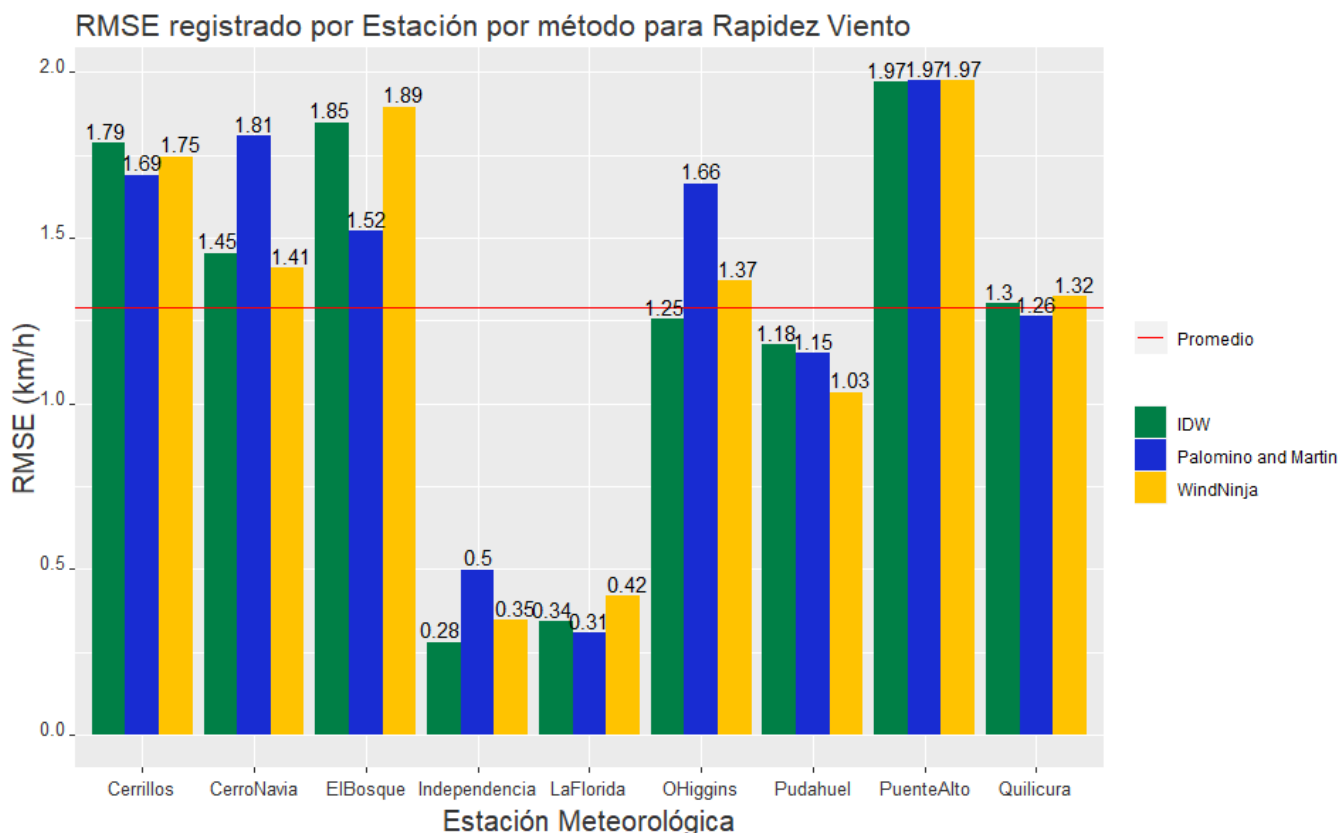


Figura 4.3: RMSE registrado por Estación para Distancia Inversa Ponderada, Palomino and Martin y WindNinja para Rapidez Viento

En general los valores de RMSE obtenidos considerando todos los métodos, rondan entre  $0,28 \frac{km}{h}$  y  $1,97 \frac{km}{h}$ . Para las diferentes ubicaciones consideradas se observan distintos comportamientos, donde se destacan bajos valores de error para las estaciones ubicadas en Independencia y La Florida, siendo en conjunto con Pudahuel las únicas estaciones con RMSE menor a la media cercana a los  $1,29 \frac{km}{h}$ . Es posible identificar diferencias en los errores registrados para los distintos métodos y para las distintas ubicaciones, sin embargo estas son pequeñas y no se observa una tendencia que logre posicionar un método como mejor estimador por sobre otro, ejemplo de esto es la comparación de los resultados para Cerro Navia y El Bosque, en donde para Cerro Navia el mejor método considerando los valores obtenidos de RMSE resulta ser Windninja ( $1,41 \frac{km}{h}$ ) seguido por IDW ( $1,45 \frac{km}{h}$ ) y finalmente Palomino and Martin ( $1,81 \frac{km}{h}$ ); mientras que en El Bosque la mejor aproximación se obtiene utilizando Palomino and Martin ( $1,52 \frac{km}{h}$ ), en segundo lugar se tiene IDW ( $1,85 \frac{km}{h}$ ) y por último WindNinja ( $1,89 \frac{km}{h}$ ).

Considerando lo anterior, no se destaca un método por sobre otro en la estimación de la magnitud del viento, siendo los tres métodos considerados como predictores aceptables para modelar la rapidez de viento, sin embargo es importante contemplar que es necesario modelar de una buena manera la par de la magnitud, la dirección de viento, pues es precisamente esta última variable la que define en gran medida en que sentido se expande el fuego en un incendio forestal.

Los siguientes gráficos representan los rendimientos obtenidos en la predicción de la dirección de viento para los métodos seleccionados. Se destaca que para el análisis de dirección de viento es necesario considerar la diferencia mínima que existe entre el ángulo predicho y el ángulo observado, garantizando que esta diferencia esté en el rango  $[-180^\circ, 180^\circ]$ , para no tener incongruencias en el cálculo de RMSE debido a la medida angular con la que se trabaja.

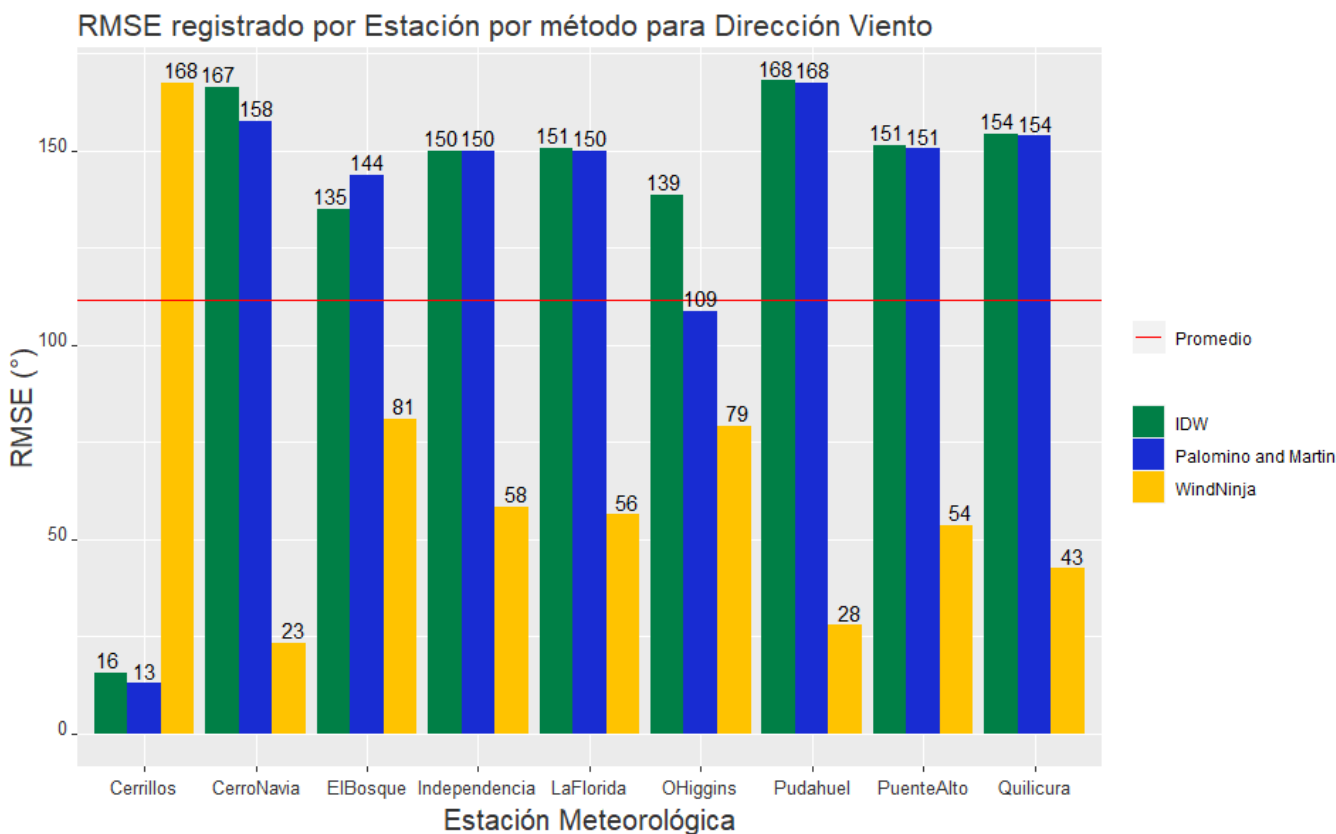


Figura 4.4: RMSE registrado por Estación por método para Dirección Viento

Destaca que de manera general los valores predichos por WindNinja presentan errores considerablemente inferiores en comparación con los otros métodos, lo anterior sucede en todas las estaciones consideradas a excepción de la que se encuentra ubicada en Cerrillos, sin considerar esta última, el RMSE obtenido por los métodos IDW y Palomino and Martin poseen rendimientos deficientes, donde la medida de los errores sobrepasa los  $100^\circ$ , prediciendo así direcciones de viento que llegan a ser perpendiculares a las direcciones de viento observadas. Por otro lado, salvo el caso particular de la estación Cerrillos, destaca el rendimiento obtenido por WindNinja en la predicción de dirección de viento, teniendo todos sus valores

de RMSE por debajo de los  $90^\circ$ , demostrando ser el mejor método en cuanto a la predicción de dirección de viento.

Considerando los resultados obtenidos tanto para la rapidez de viento como para la dirección, WindNinja se posiciona como el método para generar campos de viento, debido a que si bien considerando solo la magnitud del mismo no se destaca un método por sobre otro, el hecho de que determine de una manera considerablemente mejor la dirección de viento distingue a WindNinja por sobre Distancia Inversa ponderada o Palomino and Martin.

## 4.2. Resultados simulación en bosques

### 4.2.1. Resultados El Portillo: Comparativa Cell2Fire Original vs Cell2Fire Modificado

A continuación se presentan los resultados de la cicatriz de incendio después de 50 periodos de simulación. La **Figura 4.5** corresponde a la cicatriz generada considerando campos de viento homogéneos, mientras que la **Figura 4.6** se realizó utilizando una herramienta proporcionada por WindNinja, la cual permite utilizar vientos homogéneos para crear campos de viento heterogéneos considerando una fecha de inicio y término y la elevación del terreno.

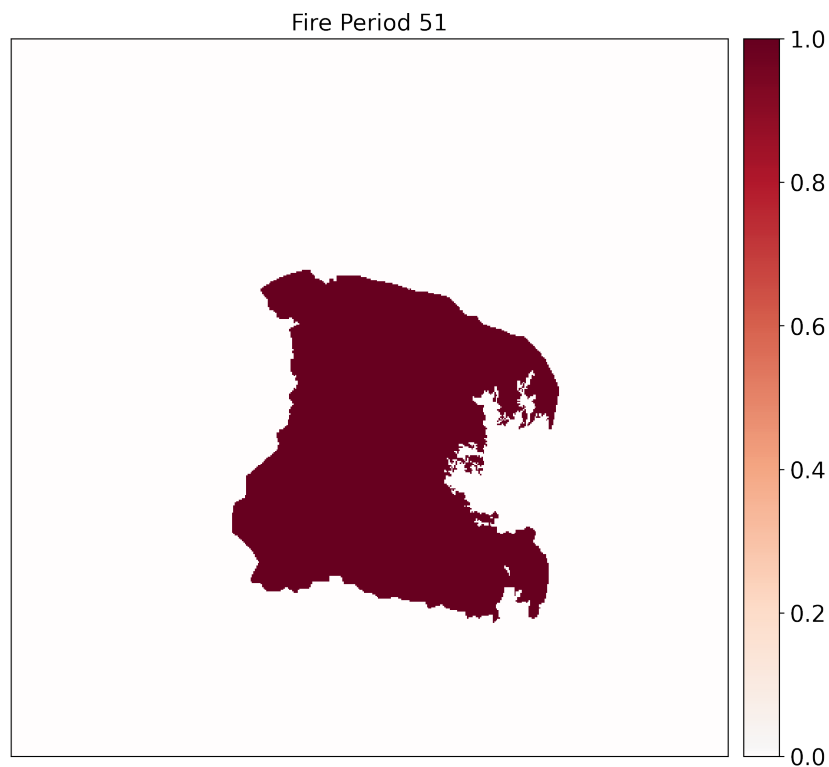


Figura 4.5: Cicatriz final incendio El Portillo Sim 1: Cell2Fire Original



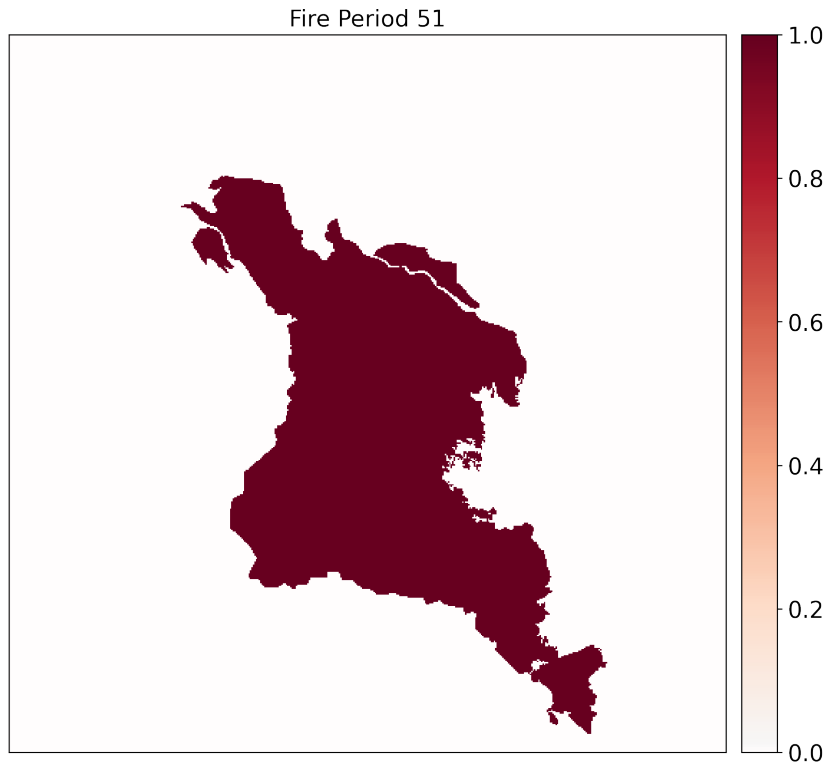


Figura 4.6: Cicatriz final incendio El Portillo Sim 2: Cell2Fire Modificado

Si bien existe una clara similitud al comparar ambas imágenes, es posible identificar diferencias entre una y la otra, donde la cicatriz generada por Cell2Fire modificado abarca un área mayor, distinguiéndose zonas en el sector noroeste y sureste que pasan de ser zonas alcanzadas por el fuego. Otro punto a destacar es que las cicatrices de incendio coinciden en gran parte en la zona perimetral ubicada tanto al este como al oeste.

Las siguientes imágenes corresponden a árboles de propagación, los cuales muestran a través de un mapa de calor los tiempos en los cuales fueron alcanzadas las zonas, pudiendo distinguir así qué zonas se quemaron primero y cuales resultaron ser quemadas en los últimos periodos del incendio.

Propagation Tree: traveling times [min]

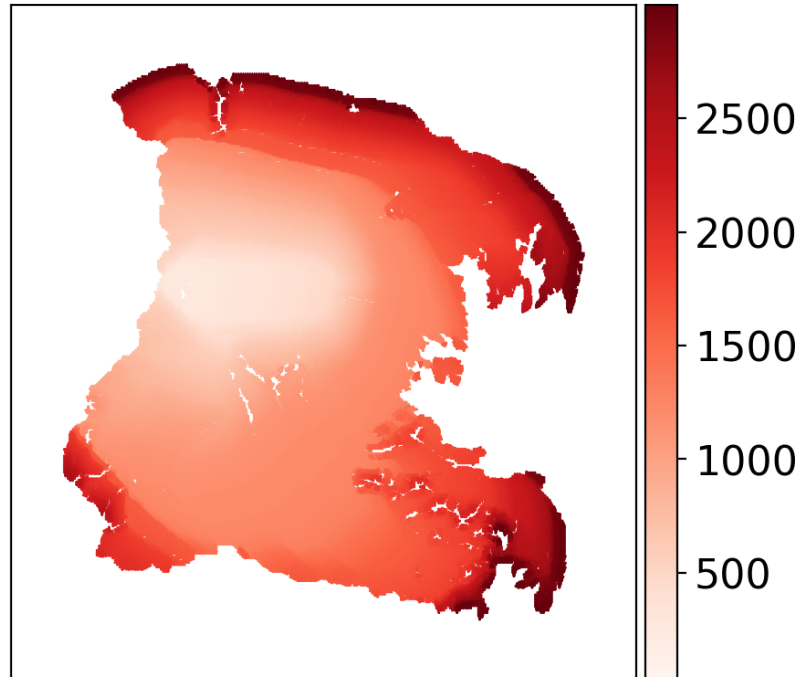


Figura 4.7: Árbol de propagación incendio El Portillo Sim 1: Cell2Fire Original

Propagation Tree: traveling times [min]

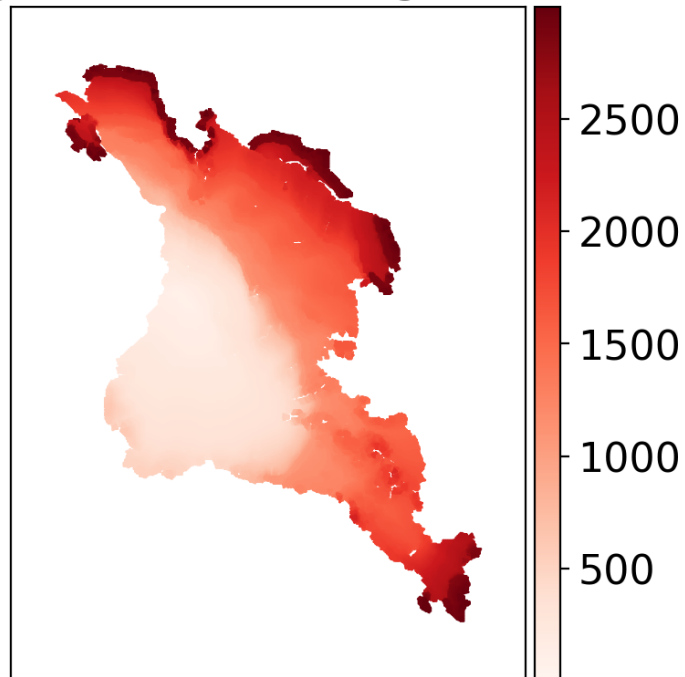


Figura 4.8: Árbol de propagación incendio El Portillo Sim 2: Cell2Fire Modificado

Si bien existen similitudes entre ambas cicatrices, se observan cambios en el comportamiento del fuego, donde en el árbol de propagación generado utilizando campos de viento heterogéneos se ve un avance más veloz del fuego, distinguiéndose una gran zona en forma de llama color coral. A partir de esta zona, se identifican sectores en el perímetro de la misma en los cuales el avance del fuego se detiene completamente y otras en donde continúa su propagación. A continuación se presentan las estadísticas generadas por Cell2Fire de ambas simulaciones de incendio:

**Estadísticas final de simulación incendio El Portillo Sim 1: Cell2Fire Original:**

- **Número de celdas disponibles:** 172.043 (68,8172 %)
- **Número de celdas quemadas:** 36.294 (14,5176 %)
- **Número de celdas no combustibles:** 41.663 (16,6652 %)
- **Tiempo total de ejecución:** 18 minutos 39 segundos

**Estadísticas final de simulación incendio El Portillo Sim 2: Cell2Fire Modificado:**

- **Número de celdas disponibles:** 163.157 (65,2628 %)
- **Número de celdas quemadas:** 45.180 (18,072 %)
- **Número de celdas no combustibles:** 41.663 (16,6652 %)
- **Tiempo total de ejecución:** 712 minutos 53 segundos

Para este experimento se esperaba que las cicatrices de incendio generadas por Cell2Fire modificado fuera bastante similar a la generada por la versión sin modificar, y si bien existen similitudes en la forma que va tomando la cicatriz es posible observar que desde los primeros periodos la forma de la cicatriz es distinta y avanza mucho más en forma vertical para la versión que utiliza grillas de viento, lo que indica que la inclusión de los campos de viento tiene un efecto significativo en la simulación en sí.

Una vez corrida la simulación, se observó que los campos de viento utilizados para la simulación tuvieron un efecto de acelerar el crecimiento de la cicatriz, pero en su mayoría sin quemar área que en periodos posteriores a los 50 periodos simulados para este caso. Por lo cual no resulta posible saber si se está simulando de una buena manera el incendio, al no tener un registro como tal periodo a periodo de cómo fue avanzando el fuego en realidad para este incendio. Se destaca que se limitó la simulación a 50 periodos debido a que fue imposible la simulación de los 127 periodos debido a que el coste computacional resulta muy alto (archivo de rapidez de viento 498 MB y dirección de viento 119 MB) y el programa no es capaz de computarlo.

Un aspecto importante a destacar es la gran diferencia entre tiempos de simulación, donde para mismos periodos la versión sin modificar corre en un computador con un procesador AMD Ryzen 5 3500X en poco menos de 19 minutos, cuando su contraparte que utiliza campos de viento demora cerca de 12 horas de simulación. Este problema se debe en gran medida al cambio de dimensionalidad, pasando de dos vectores con 50 observaciones distintas (una para cada periodo) de rapidez y dirección de viento, a dos matrices que representan el viento con 50 columnas (una para cada periodo) por 2500 filas (una por cada celda).

## 4.2.2. Resultados Valparaíso: Comparación de métodos de interpolación

Los siguientes resultados muestran las cicatrices finales obtenidas utilizando campos de viento generados por los tres métodos de interpolación propuestos en conjunto con campos homogéneos de humedad relativa y temperatura utilizando IDW de manera arbitraria interpolando en la ubicación del punto de ignición.

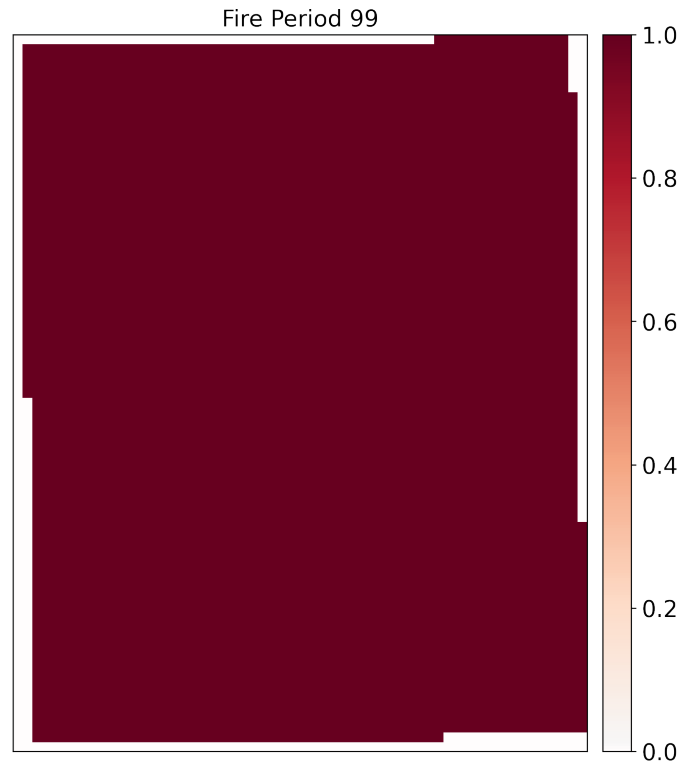


Figura 4.9: Cicatriz final incendio Valparaíso utilizando campos de viento generados por IDW

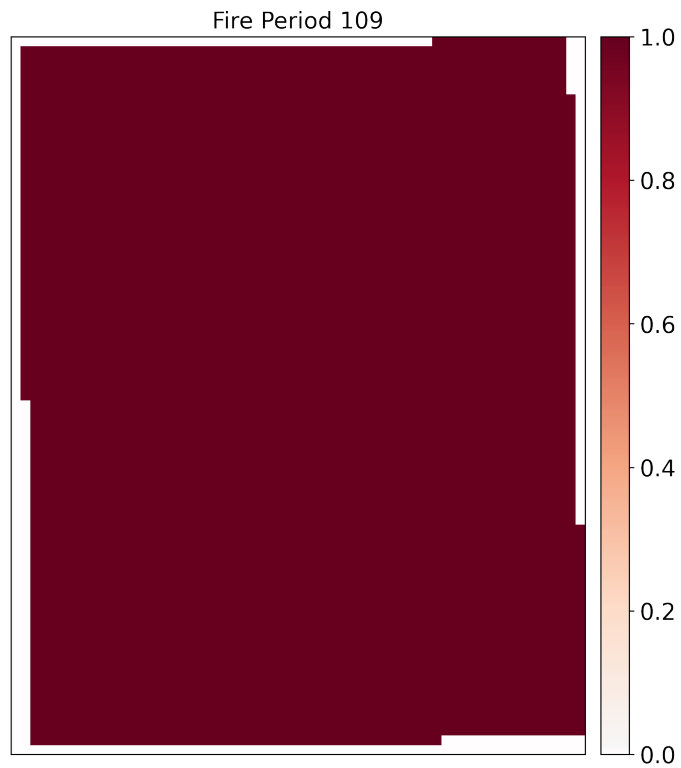


Figura 4.10: Cicatriz final incendio Valparaíso utilizando campos de viento generados por Palomino and Martin

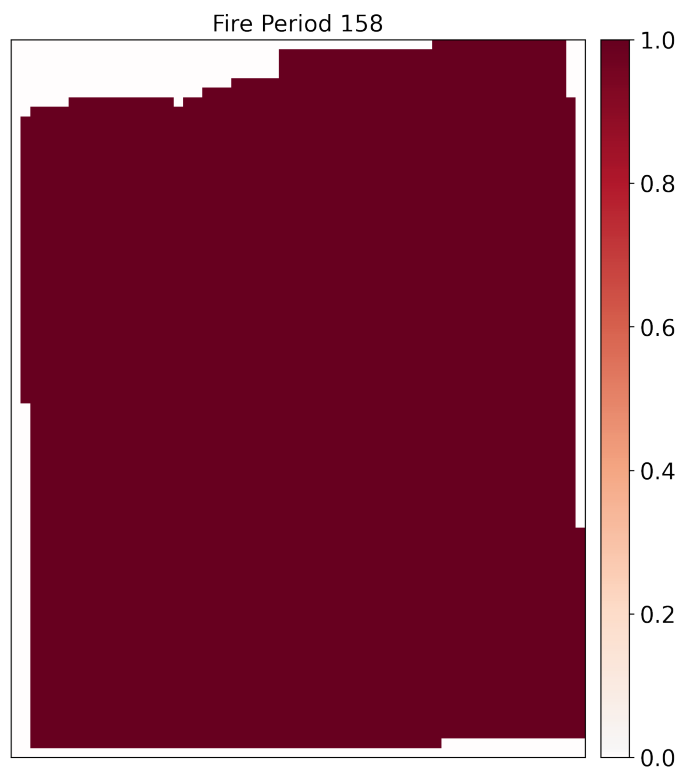


Figura 4.11: Cicatriz final incendio Valparaíso utilizando campos de viento generados por WindNinja

Analizando la cicatriz final creada utilizando cada uno de los métodos descritos se observa que tanto para el caso del campo de viento generado por IDW como por Palomino and Martin la cicatriz de incendio se extiende y quema toda el área considerada, con la diferencia que para IDW lo hace después de 98 periodos en comparación con Palomino and Marin que lo hace en 108 periodos. En contraste, al utilizar vientos generados por WindNinja, la simulación alcanza a correr los 157 periodos considerados quemando una gran parte del mapa pero no por completo.

En cuanto a su similitud con la cicatriz real del incendio ocurrido en Valparaíso, ninguna de las simulaciones presentadas anteriormente coincide o se aproxima de una buena manera a esta cicatriz, donde las generadas por IDW y Palomino and Martin terminan en un número inferior de periodos a los considerados puesto que logran quemar todo el bosque. En contraste, en la cicatriz generada utilizando los vientos por el método WindNinja el fuego no alcanza a incinerar toda la zona, pero si un 90,8% de esta, abarcando un área mayor a la del incendio real y no guardando similitudes en la forma de esta.

### **4.2.3. Resultados Bosques Sintéticos: Influencia de variables meteorológicas heterogéneas en cicatriz incendio**

#### **4.2.3.1. Experimento 1:**

A continuación se presenta la de cicatriz de incendio y árbol de p[ropagación generados para la primera configuración de simulación con bosques homogéneos. Para la misma se utilizó un viento experimental con dirección Sur a Norte para la porción izquierda del terreno, y en dirección totalmente opuesta para la porción restante (de Norte a Sur). Por otro lado se consideraron humedad relativa 35%, temperatura 30°C y rapidez de viento  $30\frac{km}{h}$  iguales para cada punto dentro del bosque, de modo de lograr observar tanto el efecto que tiene en la cicatriz de incendio los cambios en la dirección de viento, como la factibilidad de configuraciones de variables meteorológicas que versiones sin modificar de Cell2Fire no son capaces de realizar.

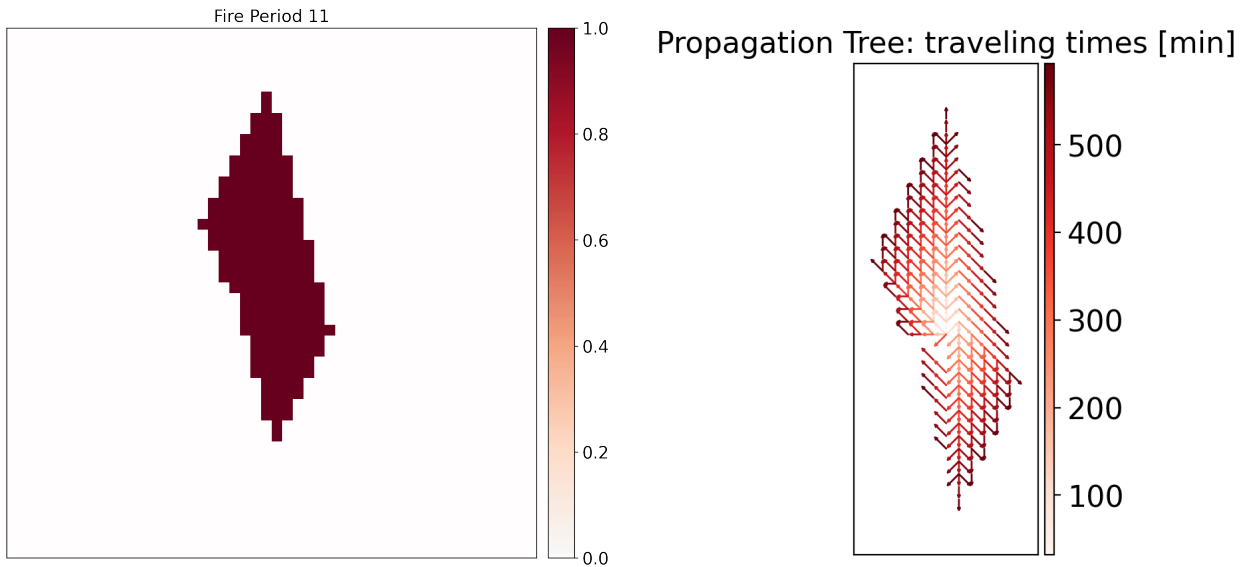


Figura 4.12: Outputs generados Experimento 1: a la izquierda la cicatriz final en bosque homogéneo después de los 10 periodos de simulación; a la derecha el árbol de propagación correspondiente

Observando tanto la cicatriz de incendio como el árbol de propagación es posible identificar que a partir del punto de ignición la mitad izquierda de la cicatriz crece en dirección Sur a Norte, mientras que la mitad derecha lo hace de Norte a Sur. Esto se condice con lo esperado ya que si bien el incendio va expandiéndose quemando todo a su alrededor, la dirección del viento en el momento del avance del mismo es la que define en gran parte el rumbo que tomará la cicatriz. Un punto que se destaca de esta configuración es que no era posible de realizar en la versión anterior de Cell2Fire debido a la limitación de los vientos.

#### 4.2.3.2. Experimento 2:

Las siguientes ilustraciones muestran la cicatriz de incendio y árbol de propagación para la segunda configuración. Esta última es bastante similar a la anterior (Experimento 1) con la diferencia que para esta ocasión la porción de viento del costado derecho, que va en dirección Norte a Sur, va a una velocidad de  $5 \frac{km}{h}$ . El objetivo de esta configuración es tanto ilustrar el efecto que puede llegar a tener cambios en la rapidez del viento en la cicatriz de incendio, como demostrar que gracias a la modificación en el código de Cell2Fire, este tipo de configuraciones son posibles. Se prefirió optar por mantener la configuración de dirección de viento del Experimento 1 para a su vez poder comparar ambas cicatrices.

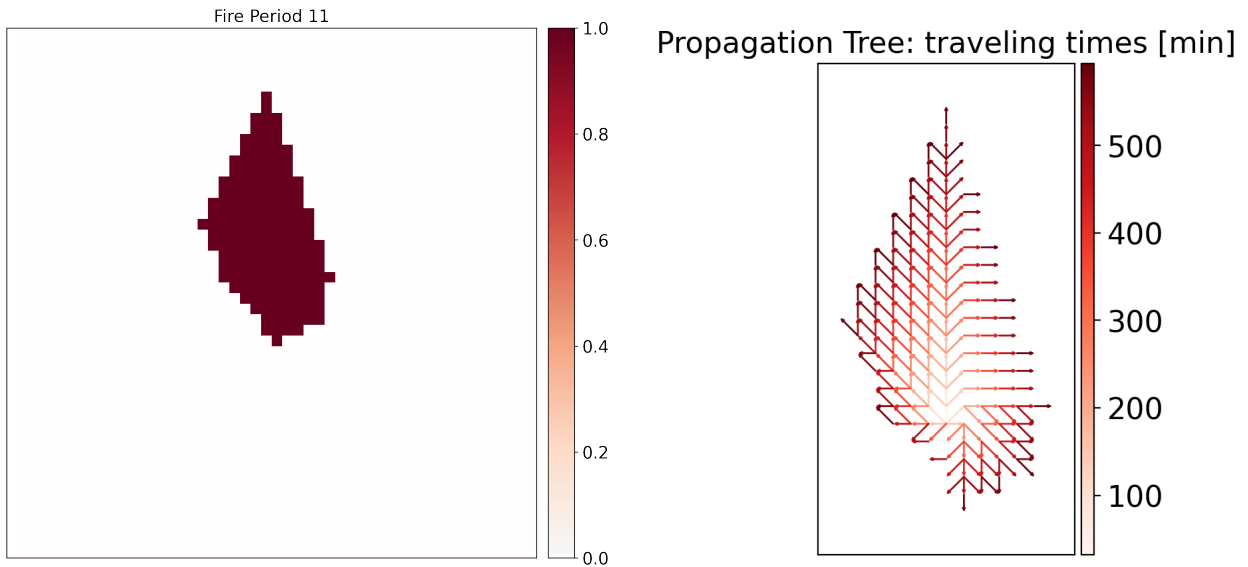


Figura 4.13: Outputs generados Experimento 2: a la izquierda la cicatriz final en bosque homogéneo después de los 10 periodos de simulación; a la derecha el árbol de propagación correspondiente

Observando tanto la diferencia de la cicatriz generada como comparándola con el Experimento 1, es posible identificar que el crecimiento del lado derecho de la cicatriz se vio desacelerado en relación con el lado izquierdo, mostrando así el efecto que puede tener la rapidez de viento en el avance de los incendios simulados.

#### 4.2.3.3. Experimento 3:

Las siguientes imágenes corresponden a la cicatriz final y el árbol de propagación para el Experimento 3, este consta de viento en dirección Sur a Norte a  $20 \frac{km}{h}$  y temperatura de  $30^{\circ}C$ . A su vez se consideró que la porción izquierda del bosque tuviera una humedad relativa de 35 % (la misma que los experimentos pasados), mientras que la mitad derecha tuviera una humedad relativa del 70 %, de modo de mostrar el efecto de esta variable en incendios forestales.



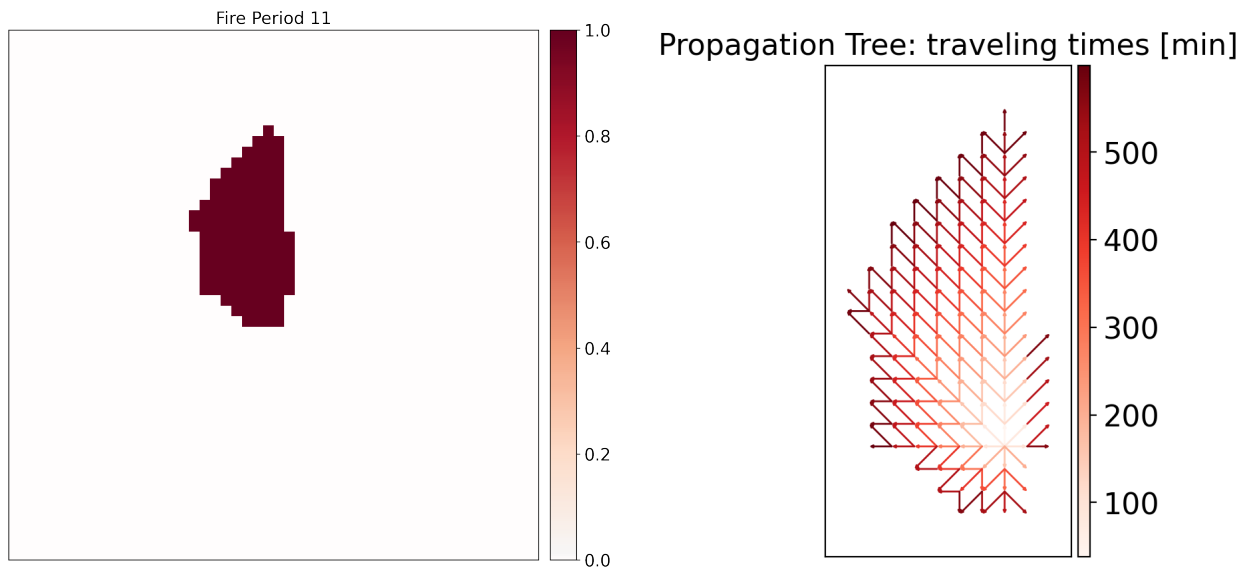


Figura 4.14: Outputs generados Experimento 3: a la izquierda la cicatriz final en bosque homogéneo después de los 10 periodos de simulación; a la derecha el árbol de propagación correspondiente

En este experimento es posible observar como afecta la humedad relativa en la propagación de incendios, en donde a una menor humedad relativa (35 %) la propagación de la cicatriz es considerablemente mayor en comparativa con la mitad derecha de la cicatriz, en el que se utilizó una humedad relativa del 70 %. Nuevamente este tipo de configuración no era posible a realizar en Cell2Fire anteriormente.

#### 4.2.3.4. Experimento 4:

A continuación se presenta el árbol de propagación y la cicatriz final de incendio para el experimento 4, en el cual la porción derecha del bosque consideró una temperatura de 30°C, mientras que la otra mitad una temperatura de 60°C. El viento va en dirección Sur a Norte a  $30 \frac{km}{h}$  a lo largo de todo el terreno y la humedad relativa para todo el bosque es de 35 %. Se busca observar el efecto de la temperatura en incendios forestales.

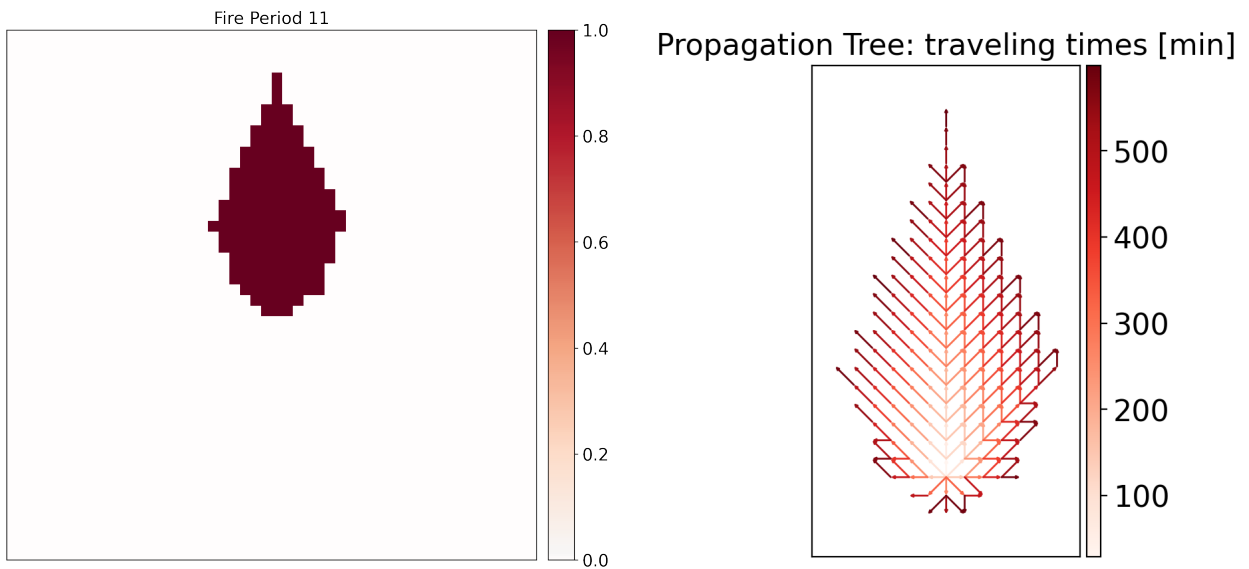


Figura 4.15: Outputs generados Experimento 4: a la izquierda la cicatriz final en bosque homogéneo después de los 10 periodos de simulación; a la derecha el árbol de propagación correspondiente

A primera vista no se logran apreciar diferencias entre el lado izquierdo de la cicatriz y el derecho, en donde se consideraron 30 °C para la primera mitad y 60 °C para la segunda. Sin embargo si se observa el árbol de propagación es posible identificar que para la mitad que tiene una menor temperatura, no existió una propagación desde el Sur hacia el Norte entre celdas, sino que esta fue en dirección Noroeste. Fuera de esta apreciación se observa que la cicatriz de incendio generada no tiene grandes diferencias entre una mitad y la otra.

# Conclusiones

El siguiente estudio expone la implementación de grillas de variables meteorológicas con el objetivo de simular incendios forestales, a la par de investigar sobre la generación de dichas grillas o campos meteorológicos de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, mediante el uso de métodos de interpolación y la evaluación del rendimiento de estos métodos. Posterior a este proceso, se analiza el efecto que puede llegar a tener la inclusión de grillas o campos meteorológicos en las cicatrices de incendio generadas por Cell2Fire, identificando diferencias no sólo en el rendimiento en sí de un método para generar meteorología, sino que también exponiendo el efecto que puede llegar a tener la meteorología en el avance de incendios forestales.

En cuanto a la bondad de los métodos considerados para predecir humedad relativa, si es que el objetivo es contar con datos que sean lo más precisos posibles, y teniendo en cuenta el rango de valores que esta variable puede tomar (desde 0% hasta un 100%) errores que rondan entre un 3% y un 8% pueden significar errores considerables de estimación, por otro lado desde una perspectiva que considere el ocupar estos datos como valores de entrada para la simulación de incendios forestales, pueden considerarse como aproximaciones aceptables, considerando como objetivo final de una simulación de incendios forestales el lograr predecir el comportamiento del fuego. Por otro lado, en el caso de la estimación de la temperatura se tiene que los métodos revisados en este trabajo obtienen predicciones con buenos resultados que no superan los  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  de RMSE, que considerando el efecto visto en la cicatriz de incendio de la figura 4.15, no significaría un gran cambio en el avance de la cicatriz, transformando tanto a IDW como Palomino and Martin como buenos predictores de la variable temperatura.

Considerando las variables que definen el viento, magnitud o rapidez de este y la dirección, se puede concluir que en general WindNinja destaca como un mejor método de interpolación, principalmente por tener con diferencia mejores resultados a la hora de predecir la dirección de el mismo. Sin embargo, a pesar de demostrar tener un mejor rendimiento entre los diferentes métodos, no se obtuvieron errores de predicción menores a  $20^{\circ}$ , ángulo que por sí mismo significa un cambio considerable de sentido.

De la mano con el párrafo anterior, mediante los resultados vistos en la comparación de Cell2Fire considerando campos de viento homogéneos y heterogéneos en el incendio El Portillo, es posible evidenciar como la cicatriz generada utilizando viento heterogéneo se expande y abarca un área notablemente mayor que su contraparte, por lo que se puede dar cuenta de que efectivamente considerar viento heterogéneo afecta en la formación y el avance de la cicatriz, ya que si bien para el caso que se desarrolla en este trabajo se observa un aumento de tamaño, también es posible que ocurra lo contrario, por lo que la principal conclusión que

se extrae es que considerar el viento como una variable que puede variar su valor en cada celda, termina afectando de manera significativa en como evolucionan y terminan desarrollándose los incendios forestales simulados por Cell2Fire. En adición, es importante destacar el aumento no menor del tiempo de ejecución del simulador, por lo que sería importante evaluar el valor que genera el considerar las variables meteorológicas como heterogéneas en la simulación de incendios forestales.

Una de las limitaciones constantes dentro de este trabajo fue la del hardware, por ejemplo, haciendo imposible la ejecución de el incendio El Portillo considerando las 4 variables meteorológicas (rapidez de viento, dirección de viento, temperatura y humedad relativa). Si bien el utilizar un computador con mejores componentes podría ser la respuesta, también es importante destacar que una de las características de Cell2Fire es la de ser un simulador capaz de ejecutarse en computadores sin grandes prestaciones, por lo que nuevamente se presenta la interrogante del valor que genera para la simulación de incendios el considerar la meteorología como heterogénea.

Por otro lado mediante la implementación de grillas de viento fue posible evidenciar los grandes cambios en los tiempos de ejecución en comparación con el uso de vientos homogéneos. En este sentido surge la inquietud de que tan valioso resulta para el proyecto la inclusión de grillas de datos meteorológicos, a lo que si se considera las evaluaciones de rendimiento de los modelos de interpolación probados, pareciera no generar valor dentro de la ejecución del simulador. Por lo mismo se optó por no integrar en este trabajo campos meteorológicos heterogéneos para las variables de temperatura y humedad relativa en algunas simulaciones, priorizando una buena representación del viento que tiene un efecto mayor en cuanto al desplazamiento de la cicatriz de incendio, a pesar de esto, si es posible simular utilizando campos de temperatura y humedad relativa, pero los tiempos de ejecución aumentan considerablemente.

Otro punto importante a destacar es la recolección y generación de datos para la simulación de incendios forestales. En general los datos son recolectados por estaciones meteorológicas, presentando la primera problemática que corresponde a la distribución de estas mismas. Como es posible ver en la Figura 3.3 las estaciones meteorológicas no solo se encuentran bastante distantes del punto de ignición, sino que la gran mayoría están concentradas en un sector, mientras que hay otras grandes zonas sin la presencia de estaciones meteorológicas. Una buena distribución de estaciones meteorológicas es necesaria para que el proceso de interpolación de datos sea exitoso, por lo mismo es que si bien ninguno de los métodos para generar campos de viento terminó arrojando una cicatriz de incendio parecida a la que se dio en la realidad, no es posible determinar si la razón de esto es por efecto de los métodos de interpolación en sí o porque las distancias entre los puntos a predecir y las estaciones meteorológicas son muy grandes.

Mediante la realización de este trabajo fue posible evidenciar la relevancia que tiene para Chile la gestión de los incendios forestales y el largo camino que se tiene por recorrer para una óptima gestión de los mismos a futuro, la cual debe considerar tanto un buen levantamiento de datos, como garantizar que exista un medio al menos un medio seguro para que personal que se interese por este problema, pueda tener acceso a los mismos. Muy de la mano con lo anterior es la necesidad de plantear el desarrollo de una red de estaciones meteorológicas a

lo largo del país, y es que debido a la gran variada y rica topografía del país, es necesario el progreso de la red meteorológica teniendo en cuenta que tanto en la actualidad como a futuro se tiene que lidiar con incendios forestales, por lo que si se busca optimizar recursos y no recaer en grandes gastos financieros, se debe invertir en este tipo de políticas que habiliten generar planes de prevención frente a incendios forestales.

Finalmente, si bien puede que la integración de variables meteorológicas de forma homogénea no genere realmente valor para el desarrollo de Cell2Fire (debido a un aumento considerable en las especificaciones del computador en donde se ejecute), es importante destacar que mediante el trabajo realizado se dan indicios de que efectivamente una meteorología que varía en el espacio-bosque considerado para la simulación de incendios si afecta en el desarrollo de los siniestros, por lo que se debe tener en cuenta este factor para trabajos futuros de Cell2Fire.

# Bibliografía

Castillo Soto, M., & Garfias Salinas, R. (2014). Estudio del comportamiento del fuego mediante simulación de incendios forestales en Chile. *Geographicalia*, 58, 81. [https://doi.org/10.26754/ojs\\_geoph/geoph.201058818](https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.201058818)

CONAF. (s. f.). <https://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/>

Escobar, L. (2022, 26 febrero). Detrás de las llamas. CIPER Chile. <https://www.ciperchile.cl/2017/02/08/detras-de-las-llamas/>

Forthofer, J. M., Butler, B. W., & Wagenbrenner, N. S. (2014a.). A comparison of three approaches for simulating fine-scale surface winds in support of wildland fire management. Part I. Model formulation and comparison against measurements. *International Journal of Wildland Fire*, 23(7), 969. <https://doi.org/10.1071/wf12089>

Forthofer, J. M., Butler, B. W., McHugh, C. W., Finney, M. A., Bradshaw, L. S., Stratton, R. D., Shannon, K. S., & Wagenbrenner, N. S. (2014b). A comparison of three approaches for simulating fine-scale surface winds in support of wildland fire management. Part II. An exploratory study of the effect of simulated winds on fire growth simulations. *International Journal of Wildland Fire*, 23(7), 982. <https://doi.org/10.1071/wf12090>

Heward, H. (2019). Surface Fire. *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*, 1-5. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8\\_211-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8_211-1)

Model charts - ECMWF, ICON, GFS, UKMO, GEM, etc. (s. f.). Meteologix - bookmark this page. <https://meteologix.com/cl/model-charts>

Montes, C. (2019, 21 abril). Cambio climático: el implacable aumento de la temperatura en Chile. *La Tercera*. <https://www.latercera.com/que-pasa/noticia/cambio-climatico-implacable-aumento-la-temperatura-chile/623054/>

Ozelkan, E., Chen, G., & Ustundag, B. B. (2016). Spatial estimation of wind speed: a new integrative model using inverse distance weighting and power law. *International Journal of Digital Earth*, 9(8), 733-747. <https://doi.org/10.1080/17538947.2015.1127437>

Pais, C., Carrasco, J., Martell, D. L., Weintraub, A., & Woodruff, D. L. (2021). Cell2Fire: A Cell-Based Forest Fire Growth Model to Support Strategic Landscape Management Plan-

ning. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.692706>

Palomino, I., & Martín, F. (1995). A Simple Method for Spatial Interpolation of the Wind in Complex Terrain. *Journal of Applied Meteorology*, 34(7), 1678-1693. <https://doi.org/10.1175/1520-0450-34.7.1678>

Reardon, J. (2019). Ground Fire. *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*, 1-6. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8\\_27-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8_27-1)

Valenzuela, N. L., & Bueno, M. (2012). Incendios forestales: principales consecuencias económicas y ambientales en Chile. *Revista Interamericana de Ambiente y Turismo - RIAT*; Vol. 7, Núm. 1 (2011): RIAT; 18-24, 7(1), 18-24.

Xanthopoulos, G., & Athanasiou, M. (2020). Crown Fire. *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*, 183-197. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-52090-2\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-52090-2_13)

Yong, K., Khan, I. A., Ismail, M., Albani, A., & Muzathik, A. (2010). Wind mapping in Malaysia using inverse distance weighted method. UMTAS 2011.

# Anexos

## Anexo A - Coordenadas geográficas estaciones meteorológicas Santiago

Nombre	Lat	Lon	Altura	Red de datos
CerroNavia	-33,43307	-70,73205509	493	SINCA
ElBosque	-33,547016	-70,66616286	573	SINCA
Independencia	-33,422261	-70,65113863	551	SINCA
LaFlorida	-33,516667	-70,5881601	595	SINCA
OH	-33,464177	-70,66070229	529	SINCA
Pudahuel	-33,437785	-70,75014409	486	SINCA
PuenteAlto	-33,591356	-70,59443068	663	SINCA
Quilicura	-33,365857	-70,74821854	470	SINCA

Figura 7.1: Ubicación estaciones meteorológicas utilizadas para medir errores de mediciones en Santiago



## Anexo B - Coordenadas geográficas estaciones meteorológicas utilizadas en incendio Valparaíso

Nombre	Lat	Lon	Altura	Red de datos
Colmo	-32,920837	-71,439824	22	SINCA
Junta de Vecinos	-32,934929	-71,524749	73	SINCA
Cerro Navia	-33,43307	-70,732055	493	SINCA
Los Andes	-32,8464264	-70,5864753	832	SINCA
Pudahuel	-33,437785	-70,750144	488	SINCA
Centro Quintero	-32,7877206	-71,5322259	38	SINCA
La Greda	-32,7482762	-71,4742143	13	SINCA
Los Maitenes	-32,764345	-71,4545094	46	SINCA
Puchuncavi	-32,718731	-71,407326	46	SINCA
Sur	-32,8010522	-71,483406	71	SINCA
Valle Alegre	-32,8076047	-71,4363079	29	SINCA
Ventanas	-31,8405424	-71,4564046	360	SINCA
Concon	-32,924756	-71,515479	60	SINCA
Las Gaviotas	-32,915616	-71,4814814	78	SINCA
Loncura	-32,7949141	-71,4964201	50	SINCA
Vina del Mar	-33,0203347	-71,550097	16	SINCA

Figura 7.2: Ubicación estaciones meteorológicas utilizadas para simular incendio Valparaíso